



UNIVERSITÄT  
HOHENHEIM

**Bedarfsgerechte Stickstoffernährung von  
Hopfen (*Humulus lupulus L.*) durch  
Düngesysteme mit Fertigation**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften

**(Dr. sc. agr.)**

Fakultät Agrarwissenschaften  
Institut für Kulturpflanzenwissenschaften  
Düngung & Bodenstoffhaushalt

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf  
Fakultät nachhaltige Agrar- und Energiesysteme  
Prof. Dr. Thomas Ebertseder

vorgelegt von

**Johannes Stampfl**

Stuttgart, 2021

Die vorliegende Arbeit wurde am **18.02.2021** von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als "Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften" angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: **24.03.2021**

Leiter der Prüfung: Prof. Dr. Thilo Streck

Betreuer, Berichterstatter, 1. Prüfer: Prof. Dr. Thomas Ebertseder (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf)

Mitberichterstatter, 2. Prüfer: Prof. Dr. Franz Wiesler

Weiterer Prüfer: Prof. Dr. Torsten Müller

Diese Dissertation wurde im Rahmen des von der **Erzeugergemeinschaft HVG** finanzierten Forschungsprojekts „Verbesserung der Nährstoffeffizienz von Hopfen durch Düngesysteme mit Fertigation“ am Hopfenforschungszentrum Hüll der **Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft** erarbeitet.



## **Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden folgende Abschlussarbeiten erstellt:**

**Schlagenhauser A. (2018):** *Methoden zur Feststellung des Stickstoffernährungszustandes im Hopfen.* Bachelorarbeit, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.

**Waldinger M. (2019):** *Auswirkung differenzierter Stickstoffdüngung auf Wachstumsverlauf und Ertragsbildung von Hopfen – Möglichkeiten der Nutzung von Reflexionsmessungen.* Bachelorarbeit, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.

**Riedl I. (2019):** *Einfluss von Wasser- und Düngerapplikation auf die Verteilung von Wurzeln und Mineralstickstoff im Boden von Hopfen.* Bachelorarbeit, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.

**Weiß F. (2020):** *Einfluss von Bewässerung und Düngung auf die Verteilung der Wurzeln und der Gehalte an P, K und Mg im Boden von Hopfen.* Bachelorarbeit, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.

**Arnold S. (2020):** *Ertragsaufbau der Hopfensorte Herkules in Abhängigkeit von Form und Zeitpunkt der Stickstoffdüngung.* Bachelorarbeit, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising-Weihenstephan.

**Baum A. (2020):** *Ertragsaufbau der Hopfensorte Perle in Abhängigkeit von der Form und des Zeitpunkts der Stickstoffdüngung.* Bachelorarbeit, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising-Weihenstephan.

**Waldinger M. (2020):** *Einsatz isotopisch ( $^{15}\text{N}$ ) markierten Stickstoffs zur Untersuchung der Aufnahme, Verteilung und Einlagerung von Stickstoff in Hopfen (*Humulus lupulus L.*) – Nutzung von SPAD-Meter Messungen zur Bestimmung der Stickstoffversorgung von Hopfen im Fertigationssystem.* Masterarbeit, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens .....</b>	<b>3</b>
2.1 Biologie und Anbau der Hopfenpflanze .....	3
2.2 Hopfeninhaltsstoffe .....	6
2.3 Agronomische Grundlagen .....	8
2.3.1 Ertragsbildung und Ertragsaufbau .....	8
2.3.2 Stickstoffversorgung und Stickstoffdüngung .....	10
2.3.3 Bewässerung und Fertigation .....	15
2.4 Chlorophyllwert- und Reflexionsmessungen .....	22
<b>3 Fragestellung und Zielsetzung .....</b>	<b>27</b>
<b>4 Material und Methoden .....</b>	<b>29</b>
4.1 Durchgeführte Feldversuche – Überblick .....	29
4.2 Standortauswahl und Standortbeschreibung .....	31
4.3 Witterung im Untersuchungszeitraum .....	34
4.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	36
4.4.1 Allgemeiner Versuchsablauf .....	36
4.4.2 Versuchsvarianten und N-Düngung .....	36
4.4.2.1 Versuchsansatz 1 .....	36
4.4.2.2 Versuchsansatz 2 .....	37
4.4.2.3 Versuchsansatz 3 .....	41
4.4.3 Versuchsanlage .....	42
4.4.4 Bewässerungssysteme .....	44
4.4.4.1 Aufbau .....	44
4.4.4.2 Fertigation und Bewässerungssteuerung .....	45
4.4.5 Beurteilung der Pflanzenentwicklung .....	47

4.4.6	Versuchsernte.....	48
4.5	Untersuchungsmethoden.....	50
4.5.1	Bodenprobenahme und -untersuchung.....	50
4.5.2	Ernteproben .....	51
4.5.2.1	Doldenertrag und Alphasäuregehalt .....	51
4.5.2.2	Restpflanzenmasse .....	52
4.5.2.3	Stickstoffgehalt und Stickstoffentzug .....	54
4.5.3	Biomasse und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf .....	55
4.5.4	Stickstoffversorgungszustand .....	57
4.5.4.1	Chlorophyllwert und Blatt-N-Gehalt.....	57
4.5.4.2	Reflexionsoptische Messungen .....	59
4.5.5	Stickstoffeinlagerung und Wiederaustrieb.....	60
4.5.6	Ertragsaufbau .....	61
4.5.7	Feinwurzelverteilung und Lagerungsdichte im Boden.....	63
4.5.8	<sup>15</sup> N-Tracer-Methode .....	64
4.6	Statistische Auswertung.....	67
<b>5</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>69</b>
5.1	Versuchsansatz 1 – Zeitpunkt & Höhe der N-Düngung .....	69
5.1.1	Entwicklungsverlauf und Habitus .....	69
5.1.2	Doldenertrag und Alphasäuregehalt .....	72
5.1.3	Restpflanzen- und Gesamtbiomasse .....	74
5.1.4	Stickstoffgehalt.....	76
5.1.5	Stickstoffentzug.....	78
5.1.6	Apparente Stickstoffausnutzung und Stickstoffeffizienz.....	81
5.1.7	Nmin-Gehalte.....	83
5.1.8	Stickstoffgehalt in Speicherwurzeln und Austrieb .....	83
5.1.9	Biomassebildung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf .....	85
5.1.10	Chlorophyllwerte .....	90
5.1.10.1	Messwerte im Vegetationsverlauf .....	90
5.1.10.2	Abbildung des N-Gehalts .....	93
5.1.11	Lichtreflexion und Vegetationsindices.....	94
5.1.11.1	Abbildung des N-Gehalts .....	95
5.1.11.2	Abbildung der Biomasse und N-Aufnahme .....	96
5.1.11.3	Messwerte im Vegetationsverlauf .....	99

---

5.2	Versuchsansatz 2 – Düngesysteme mit Fertigation.....	100
5.2.1	Entwicklungsverlauf und Habitus .....	101
5.2.2	Doldenertrag und Alphasäuregehalt .....	106
5.2.3	Restpflanzenbiomasse .....	110
5.2.4	Stickstoffgehalt .....	113
5.2.5	Stickstoffentzug .....	117
5.2.6	Nmin-Gehalte.....	120
5.2.7	Apparente Stickstoffausnutzung und Stickstoffeffizienz.....	121
5.2.8	Stickstoffgehalt in Speicherwurzeln und Austrieb .....	125
5.2.9	Chlorophyllwerte im Vegetationsverlauf.....	128
5.2.10	Seitentriebwachstum, Habitus und Ertragsaufbau .....	136
5.2.11	Verteilung und Recovery von <sup>15</sup> N-markiertem UAN-N .....	140
5.2.11.1	Entwicklung der <sup>15</sup> N-Gehalte im Vegetationsverlauf .....	140
5.2.11.2	<sup>15</sup> N-Recovery in der oberirdischen Biomasse .....	144
5.2.11.3	<sup>15</sup> N-Gehalte in Speicherwurzeln .....	145
5.3	Versuchsansatz 3 – Wasser- & N-Applikationsform .....	147
5.3.1	Doldenertrag und Alphasäuregehalt .....	147
5.3.2	Restpflanzenbiomasse .....	149
5.3.3	Stickstoffentzug, -saldo, -effizienz und Nmin-Gehalte .....	150
5.3.4	Feinwurzelverteilung.....	152
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>156</b>
6.1	Biomassebildung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf .....	156
6.2	Erfassung des aktuellen N-Versorgungszustandes .....	162
6.3	Auswirkungen einer in Höhe und Zeit variierten N-Düngung .....	167
6.4	Bewertung von N-Düngesystemen mit Fertigation.....	183
6.5	Effekte durch ober- und unterirdische Bewässerung .....	188
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>193</b>
<b>8</b>	<b>Summary .....</b>	<b>197</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>200</b>
	<b>Curriculum Vitae.....</b>	<b>218</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Alpha- und Beta-Säuren des Hopfens (Kammhuber, 2008a) .....	7
Abb. 2.2: Basis Habitus-Formen einer Hopfenpflanze: 1) Kopfbetont, 2) Zylindrisch und 3) Konisch (Rybacek, 1991).....	9
Abb. 2.3: Absoluter & relativer Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme von Hopfen (Eigene Darstellung nach Portner et al. (2007)).....	11
Abb. 2.4: Wasserverteilung bei ober- und unterirdischer Tropfbewässerung auf Sand-, Lehm- und Schluffboden (Verändert nach Schütze et al. (2013)).....	18
Abb. 2.5: Reflexionsspektrum von Mais mit unterschiedlichen Chlorophyll- und Stickstoffgehalten (Schlemmer et al., 2013).....	23
Abb. 4.1: Geografische Lage der Versuchsstandorte und des Hopfenforschungsinstituts Hüll (eigene Darstellung nach LDBV, 2020).....	31
Abb. 4.2: Anlageschema eines Feldversuchs - sechs Varianten (A bis F) und vier Wiederholungen ([1] bis [4]) verteilt auf zwei vollständig randomisierte Blöcke mit jeweils einer Messwiederholung. ....	44
Abb. 4.3: Düngereinspeisevorrichtung und Aufbau der Versuchsbewässerungsanlagen. ....	45
Abb. 4.4: Entwicklungsverlauf einer Hopfenpflanze – Zeitliche Aufeinanderfolge der unterschiedlichen Entwicklungsstadien; Erste Ziffer Makrostadium, zweite Ziffer Mikrostadium. ....	48
Abb. 4.5: Geerntete Versuchsparzelle (10 Pflanzen bzw. 20 Einzelreben) im Feld (a) sowie Doldenproben in Kartoffelsäcken (b) und Rebenhäckselp Proben in perforierten Kunststoffbeuteln (c). ....	50
Abb. 4.6: Getrocknete Rebenhäckselp Proben - Verarbeitungsschritte. ....	53
Abb. 4.7: Zerkleinerung und Homogenisierung getrockneter Doldenproben für die Analyse des Gesamt-N-Gehalts. ....	55
Abb. 4.8: Bestimmung der Biomassebildung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf. ....	57
Abb. 4.9: Messpunkt am fünfklappigen Blatt zur Erfassung des Chlorophyllwertes. ....	59
Abb. 4.10: Vorgehensweise zur Bestimmung des Ertragsaufbaus: Zerteilung der Rebenabschnitte in Seitentriebe und Zentralrebe (a, b, c) sowie Bestimmung der Frischmasse (d), Doldenanzahl und Doldengröße (e). ....	62
Abb. 5.1: Braunverfärbung der Doldenblätter bei Reduktion der N-Menge am Beispiel der Sorte Herkules im Versuchsjahr 2018 – Vergleich von 120 kg N ha <sup>-1</sup> (N5) und 180 kg N ha <sup>-1</sup> (N6).....	71
Abb. 5.2: Reduktion des Längenwachstums der Seitentriebe (d, e) und Beeinflussung des Habitus in Abhängigkeit des Zeitpunkts der N-Applikation: a) N2 – Nur I. N-Gabe, b) N3 – Nur II. N- Gabe, c) N4 – Nur III. N-Gabe. ....	71
Abb. 5.3: Versuchsserie 1 – Jahre 2017/2018: Mittlerer Verlauf der Biomassebildung und N- Aufnahme der Sorten Perle, Tradition und Herkules unter nicht limitiertem N-Angebot (N6).....	86

Abb. 5.4: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme der Sorte Herkules in Abhängigkeit der N-Düngung.....	88
Abb. 5.5: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme der Sorte Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.....	89
Abb. 5.6: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Herkules in Abhängigkeit der N-Düngung; Minimumwerte zum Zeitpunkt der Reife bei 30 bis 34.....	90
Abb. 5.7: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.....	91
Abb. 5.8: Versuchsserie 1 – Jahr 2019: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Herkules in Abhängigkeit der N-Düngung; Minimumwerte zum Zeitpunkt der Reife bei 31.....	92
Abb. 5.9: Versuchsserie 1 – Jahr 2019: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.....	93
Abb. 5.10: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Lineare Regression zwischen dem Chlorophyllwert und dem a) Blatt-N-Gehalt bzw. dem b) N-Gehalt der Gesamtpflanze der Sorte Herkules zu unterschiedlichen Messterminen. ....	94
Abb. 5.11: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Lineare Regression zwischen dem auf der oberen Messhöhe erfassten REIP bzw. IR G und dem N-Gehalt der Gesamtpflanze der Sorte Herkules zu unterschiedlichen Messterminen; Bestimmtheitsmaße vgl. Tab. 5.14. ....	96
Abb. 5.12: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Lineare Regression zwischen dem auf der mittleren Messhöhe erfassten REIP bzw. IR G und der Gesamtbiomasse bzw. der N-Aufnahme der Gesamtpflanze der Sorte Herkules zu unterschiedlichen Messterminen; Bestimmtheitsmaße vgl. Tab. 5.15. ....	98
Abb. 5.13: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Messwerte der Vegetationsindices REIP und IR G auf der mittleren Messhöhe der Sorte Herkules zu unterschiedlichen Messterminen in Abhängigkeit der N-Düngung.....	99
Abb. 5.14: Einfluss der N-Düngung auf das Seitentriebwachstum: V-Serie 2 - lehmiger Standort - Sorte Herkules - 02.06.2018; a) Kein Stickstoff (F1); b) 3/3 granuliert (F2). ....	103
Abb. 5.15: Einfluss des Zeitpunkts der N-Düngung auf das Seitentriebwachstum und den Habitus der Hopfenpflanze: V2_L_PE_18: a) KW23 (F6b); b) KW25 (F6); V2_L_HS_19: c) KW23 (F6b); d) KW26 (F6d). ....	104
Abb. 5.16: Einfluss der Stickstoffdüngung (2018) auf den Wiederaustrieb im Folgejahr (2019) (V2_L_HS_19): a) Reguläre N-Düngung; b) Reduzierte N-Düngung; c) Keine N-Düngung... ..	105
Abb. 5.17: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Herkules am a) lehmigen bzw. b) sandigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung; Maximaler Chlorophyllwert bei F6a (b) bei 51,3; Minimumwerte zum Zeitpunkt der Reife bei 30 (a) bzw. 33 (b). ....	129
Abb. 5.18: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Perle am a) lehmigen bzw. b) sandigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	131

Abb. 5.19: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Herkules am a) lehmigen bzw. b) sandigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung; Minimumwerte zum Zeitpunkt der Reife bei 34 (a) bzw. 29 (b). .....	133
Abb. 5.20: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Perle am a) lehmigen bzw. b) sandigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	135
Abb. 5.21: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Lineare Regression zwischen der Doldenanzahl und dem Doldenertrag bzw. der Doldenanzahl und der Doldengröße, gemessen an den Seitentrieben des oberen Längenabschnitts.....	139
Abb. 5.22: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Delta <sup>15</sup> N-Gehalte unterschiedlicher Höhenabschnitte (Unten, Mitte, Oben) der Sorte Herkules im Vegetationsverlauf mit Differenzierung in Haupt- und Seitentriebe sowie Blatt- (B) und Doldenproben (D); a)=Variante F6b; b) Variante F6; c) Variante F6x; Ausbringung der <sup>15</sup> N-angereicherten N-Gaben am 22. Juni bzw. 5. Juli.....	142
Abb. 5.23: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Delta <sup>15</sup> N-Gehalte unterschiedlicher Höhenabschnitte (Unten, Mitte, Oben) der Sorte Perle im Vegetationsverlauf mit Differenzierung in Haupt- und Seitentriebe sowie Blatt- (B) und Doldenproben (D); a)=Variante F6b; b) Variante F6. Ausbringung der <sup>15</sup> N-angereicherten N-Gaben am 22. Juni bzw. 5. Juli. ....	144
Abb. 5.24: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: <sup>15</sup> N-Recovery in Abhängigkeit von Zeitpunkt und Höhe der N-Düngung; Unterteilung in Dolden, Restpflanze und Gesamtpflanze.....	145
Abb. 5.25: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Delta <sup>15</sup> N-Gehalte der Speicherwurzeln in Abhängigkeit des Erntetermins. ....	146
Abb. 5.26: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Verlauf der N <sub>min</sub> -Gehalte (0 bis 90 cm); F = Frühjahr; H = Herbst.....	152
Abb. 5.27: Exemplarische Feinwurzelverteilung (Anzahl an Wurzelspitzen je Zählfeld) mit Andeutung der Position des ober- bzw. unterirdischen Tropfschlauches (blauer Punkt).....	153
Abb. 5.28: Versuchsansatz 3 – Jahr 2019: Mittlere Lagerungsdichte (LD) unterhalb des oberirdisch (Damm) bzw. unterirdisch verlegten Tropfschlauches.....	155

## Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1: Anzahl und Schwerpunkt der im Versuchszeitraum im Rahmen der unterschiedlichen Versuchsansätze/-serien durchgeführten Feldversuche. ....	29
Tab. 4.2: Überblick zu durchgeführten Feldversuchen. ....	30
Tab. 4.3: Charakterisierung der Versuchsstandorte: Bodenschätzungsdaten (LfU, 2020) und bodenchemische Kennwerte (eigene Analysen). ....	33
Tab. 4.4: Monatliche Durchschnittstemperatur, Niederschlagsmenge und klimatische Wasserbilanz im Zeitraum von 2017 bis 2019, gemessen an der Wetterstation in Hüll (LfL, 2020a).....	34
Tab. 4.5: Tägliche Niederschlagssumme in den Monaten Juni, Juli und August im Zeitraum von 2017 bis 2019, gemessen an der Wetterstation in Hüll (LfL, 2020a).....	35
Tab. 4.6: Versuchsvarianten und N-Düngemengen in den Feldversuchen des Versuchsansatzes 1 im Zeitraum von 2017 bis 2019 (I. bis III. Zeitpunkte der N-Gaben – April, Mai, Juli). ....	37
Tab. 4.7: Ausgebrachte Gesamt-N-Mengen in den Einzelversuchen des Versuchsansatzes 2 im Zeitraum von 2017 bis 2019. ....	38
Tab. 4.8: Stickstoffverteilung der Varianten des Versuchsansatzes 2 im Jahr 2017; Fertigungsvarianten (F3 - F6): Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe.....	39
Tab. 4.9: Stickstoffverteilung der Varianten des Versuchsansatzes 2 - 2018; Varianten mit Fertigung (F5 - F6b): Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe. ....	40
Tab. 4.10: Stickstoffverteilung der Varianten des Versuchsansatzes 2 im Jahr 2019; Fertigungsvarianten (F6 - F6x): Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe. ....	41
Tab. 4.11: Überblick zu den im Rahmen des Versuchsansatzes 3 geprüften Varianten.....	42
Tab. 4.12: Stickstoffverteilung der Varianten des Versuchsansatzes 3 (2017 - 2019); Fertigungsvarianten (B5, B8): Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe. ....	42
Tab. 4.13: Schnitttermine im Versuchsjahr 2017. ....	56
Tab. 4.14: Schnitttermine im Versuchsjahr 2018. ....	57
Tab. 4.15: Stickstoffverteilung der Varianten F6b, F6 und F6x der Sorten Perle und Herkules am lehmigen Standort des Versuchsansatzes 2 im Versuchsjahr 2019; Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe. ....	64
Tab. 4.16: Termine für die Entnahme der Blatt- und Blüten- bzw. Doldenproben. ....	66
Tab. 5.1: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	72
Tab. 5.2: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.....	74
Tab. 5.3: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlere Restpflanzen- und Gesamt-Biomasse als Trockenmasse (TM) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung.....	75

Tab. 5.4: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlere Restpflanzen- und Gesamt-Biomasse als Trockenmasse (TM) der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	76
Tab. 5.5: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung.....	77
Tab. 5.6: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	78
Tab. 5.7: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze und Anteil der Dolden am Gesamt-N-Entzug der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	79
Tab. 5.8: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze und Anteil der Dolden am Gesamt-N-Entzug der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	80
Tab. 5.9: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung.....	81
Tab. 5.10: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	82
Tab. 5.11: Nmin-Gehalte im Boden (0 bis 90 cm) an den Standorten des Versuchsansatzes 1 zu Beginn & Ende Vegetationsperiode (Frühjahr und Herbst).....	83
Tab. 5.12: Versuchsserie 1 – Sorte Herkules – Jahre 2019/2020: Mittlerer N-Gehalt in Speicherwurzeln (vor Vegetationsbeginn) bzw. Trieben des Wiederaustriebs (Frühjahr) in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	84
Tab. 5.13: Versuchsserie 1 – Jahre 2017/2018: Relativer Verlauf der mittleren Biomassebildung und N-Aufnahme der Sorten Perle, Tradition und Herkules unter nicht limitiertem N-Angebot (N6).....	87
Tab. 5.14: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Bestimmtheitsmaße der linearen Regression zwischen dem N-Gehalt der Gesamtpflanze und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices der Sorte Herkules in Abhängigkeit des Messtermins und der Messhöhe. ....	95
Tab. 5.15: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Bestimmtheitsmaße der linearen Regression zwischen der Gesamtbiomasse bzw. der N-Aufnahme der Gesamtpflanze und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices der Sorte Herkules in Abhängigkeit des Messtermins und der Messhöhe.....	97
Tab. 5.16: Versuchsserie 2 – Überblick zu den geprüften Varianten: Anteil und Verteilung des granuliert bzw. über Fertigation ausgebrachten Stickstoffs. ....	100
Tab. 5.17: Versuchsserie 2 – 2017: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	107
Tab. 5.18: Versuchsserie 2 – 2018: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	109
Tab. 5.19: Versuchsserie 2 – 2019: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	110

Tab. 5.20: Versuchsserie 2 – Jahr 2017: Mittlere Restpflanzenbiomasse der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	111
Tab. 5.21: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlere Restpflanzenbiomasse der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	112
Tab. 5.22: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlere Restpflanzenbiomasse der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	113
Tab. 5.23: Versuchsserie 2 – Jahr 2017: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	114
Tab. 5.24: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	115
Tab. 5.25: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	116
Tab. 5.26: Versuchsserie 2 – Jahr 2017: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	117
Tab. 5.27: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	119
Tab. 5.28: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	120
Tab. 5.29: Nmin-Gehalte im Boden (0 bis 90 cm) an den Standorten des Versuchsansatzes 2 zu Beginn & Ende Vegetationsperiode (Frühjahr und Herbst). ....	120
Tab. 5.30: Versuchsserie 2 – Jahr 2017: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	122
Tab. 5.31: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	123
Tab. 5.32: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung. ....	125
Tab. 5.33: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer N-Gehalt von Speicherwurzeln (vor Vegetationsbeginn) der Sorten Herkules und Perle am lehmigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	126
Tab. 5.34: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer N-Gehalt von Trieben des Wiederaustriebs (Frühjahr) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung. ....	126
Tab. 5.35: Versuchsserie 2 – Jahr 2020: Mittlerer N-Gehalt von Speicherwurzeln (vor Vegetationsbeginn) der Sorten Herkules und Perle am lehmigen Standort in Abhängigkeit des Erntetermins und der N-Düngung. ....	127
Tab. 5.36: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Verteilung des Doldenertrags am Beispiel der Sorten Herkules und Perle; Gerüsthöhe: 7,0 m; Unterteilung der Gesamtpflanze in 4 Längenabschnitte zu je 1,50 m (Basis – Oben) ab der Bruchstelle des Drahtes, Abschnitt „Kopf“ > Drahtbruchstelle; Differenzierung in Z-Rebe und S-Triebe (Verzweigungen > 10	

cm) in den Abschnitten Basis bis Oben; Einzelrebenenertrag: Herkules = $928 \pm 87$ g/Rebe, Perle = $782 \pm 44$ g/Rebe (10 % H <sub>2</sub> O).....	136
Tab. 5.37: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Gesamtseitentrieblänge und prozentuale Veränderung je Längenabschnitt in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der N-Düngung am Beispiel der Sorte Herkules; Angabe der Standardabweichung als $\pm$ .....	137
Tab. 5.38: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Doldenertrag je Längenabschnitt (Basis bis Oben) bzw. Kopf und Veränderung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der N-Düngung am Beispiel der Sorte Herkules; Angabe der Standardabweichung als $\pm$ .....	139
Tab. 5.39: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlerer Ertrag (Wassergehalt 10 %) in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung; Differenzierung in Hangober- und Hangunterseite.....	148
Tab. 5.40: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung; Differenzierung in Hangober- und Hangunterseite.....	149
Tab. 5.41: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlere Restpflanzenbiomasse in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung; Differenzierung in Hangober- und Hangunterseite.....	150
Tab. 5.42: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlerer N-Entzug und mittlerer N-Saldo in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung.....	151
Tab. 5.43: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlere N-Effizienz in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung.....	152
Tab. 5.44: Versuchsansatz 3 – Jahr 2019: Feinwurzelverteilung in unterschiedlichen Bereichen des Profils in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung; Angabe der Standardabweichung als $\pm$ .....	154
Tab. 5.45: Versuchsansatz 3 – Jahr 2019: Feinwurzelverteilung in unterschiedlichen Tiefen des Profils in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung.....	155

# Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
*	signifikant
**	hoch signifikant
***	sehr hoch signifikant
°	Grad
°C	Grad Celsius
‰	Promille
AB	auf Bifang
AHL	Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung
ANOVA	Analysis of Variance
at%	Atomprozent
B	Blattprobe
C	Kohlenstoff
CaCl <sub>2</sub>	Calciumchlorid-Lösung
CAL	Calcium-Acetat-Lactat-Extrakt
Chl	Chlorophyll
cm	Zentimeter
cm <sup>2</sup>	Quadratcentimeter
CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	Harnstoff
CoA	Coenzym A
C <sub>org</sub>	Organischer Kohlenstoff
D	Diluvial
d	Tag
D	Doldenprobe
DMAPP	Dimethylallyldiphosphate
g	Gramm
h	Stunde
H <sub>2</sub> O	Wasser
ha	Hektar
Hang-OS	Hangoberseite
Hang-US	Hangunterseite
HS	Herkules
HT	Hallertauer Tradition
HWP	Hauptwendepunkt
IRG	Infrared Green
K <sub>2</sub> O	Kali
KAS	Kalkammonsalpeter
kg	Kilogramm
KNO <sub>3</sub>	Kaliumnitrat
KW	Kalenderwoche
L	Lehm
l	Liter
LD	Lagerungsdichte
IS	lehmiger Sand

---

m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MgO	Magnesium
mm	Millimeter
N	Stickstoff
n	Stoffmenge [mol]
N.A.	Natural Abundance
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ammoniumsulfat
n.s.	nicht signifikant
N <sub>2</sub> O	Lachgas
NB	neben Bifang
ndA	nach der Ausbringung
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Ammoniumnitrat
nm	Nanometer
N <sub>min</sub>	mineralischer Bodenstickstoff
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrat
NSI	Nitrogen Sufficiency Index
N <sub>t</sub>	Gesamtstickstoff
Ø	Durchschnitt
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphat
PE	Perle
PIBP	Phlorisobutyrophenone
PIVP	Phlorisovalerophenone
PMBP	Phlormethylbutanophenone
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
REIP	Red Edge Inflection Point
R <sub>NIR</sub>	Reflexion nahinfraroter Wellenlängenbereich
R <sub>R</sub>	Reflexion roter Wellenlängenbereich
S	Sand
SI	schwach lehmiger Sand
SPAD	Soil Plant Analysis Development
S-Triebe	Seitentriebe
t	Tonne
T	Termin
TM	Trockenmasse
UAN	Urea Ammonium Nitrate
VPS	Valerophenon-Synthetase
Z-Rebe	Zentralrebe
δ	Delta
Σ	Summe

# 1 Einleitung

Hopfen (*Humulus lupulus L.*) wurde im Jahr 2018 weltweit auf einer Fläche von mehr als 60.000 ha kultiviert und dient vor allem als Rohstoff zur Herstellung von Bier. Obwohl der Anbau der Kulturpflanze auf allen Kontinenten der Erde betrieben wird, befinden sich mehr als zwei Drittel der Anbauflächen in Deutschland und den USA (Barth, 2019). Als weltweit größte Anbaugelände sind die Hallertau in Bayern und das Yakima Valley im US-Bundesstaat Washington zu nennen, welche sich vor allem in ihren klimatischen Bedingungen unterscheiden.

Die Wasserversorgung stellt beim Anbau der Sonderkultur häufig einen Faktor dar, der sowohl den Ertrag als auch die Qualität stark limitieren kann. Zusätzliche Bewässerungssysteme sind dabei in semiariden Anbaugeländen wie dem Yakima Valley eine Grundvoraussetzung, ohne welche der kommerzielle Anbau der Pflanze dort nicht möglich wäre. Aber auch in grundsätzlich humiden Gebieten wie der Hallertau hat die zusätzliche Bewässerung von Hopfen aufgrund der zunehmenden Häufigkeit auftretender Trockenperioden, infolge ungleichmäßiger Niederschlagsverteilung, in den vergangenen Jahren zur Ertragsabsicherung sowie Risikominimierung an Bedeutung gewonnen. Neben der Sicherstellung der Wasserversorgung von Pflanzen bieten Bewässerungssysteme auch die Möglichkeit, Pflanzennährstoffe mit dem Wasser gezielt auszubringen. Diese als Fertigation bezeichnete Form der Düngung wird in der Landwirtschaft in ariden und semiariden Regionen der Welt mit hohem Bewässerungsbedarf eingesetzt. Im Hopfenanbau wurde Fertigation bisher vor allem im Yakima Valley genutzt. Dort wird ein Großteil der benötigten Pflanzennährstoffe über das Bewässerungswasser appliziert, wohingegen der Nährstoffbedarf in der Hallertau vor allem durch die Ausbringung granulierter Düngemittel gedeckt wird.

Als mengenmäßig wichtigster und am stärksten ertragslimitierender Nährstoff gilt auch bei Hopfen, wie bei vielen anderen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, Stickstoff (N). Problematisch dabei ist, dass überschüssiger, nicht von den Pflanzen aufgenommener Stickstoff, unterschiedlichen Verlustprozessen unterliegt und z. B. als klimaschädliches Lachgas ( $N_2O$ ) in die Atmosphäre oder als Nitrat ( $NO_3^-$ ) in das Oberflächen- und Grundwasser entweichen kann, worin die gleichzeitig hohe Umweltrelevanz des wichtigen Pflanzennährstoffs begründet liegt.

Da seit Anfang der 1990er-Jahre kaum Untersuchungen zum Stickstoffhaushalt der Hopfenpflanze durchgeführt wurden, ist für aktuell in der Hallertau genutzte Hopfensorten und Anbausysteme nur wenig über die Auswirkungen einer zeitlich und mengenmäßig differenzierten N-Ernährung bekannt. Aufgrund der hohen Umweltrelevanz des Nährstoffs Stickstoff wird die maximale Höhe der N-Düngung jedoch auch im Hopfenbau zunehmend durch gesetzliche Regelungen begrenzt. Um trotz dieser Entwicklung eine optimale N-Versorgung der Hopfenpflanze zu gewährleisten, besteht derzeit ein hoher Forschungsbedarf. Neben der züchterischen Optimierung könnten in der Hallertau auch neue Düngungsmethoden, wie etwa die Ausbringung von Stickstoff über das Bewässerungswasser eingesetzt werden, um einen effizienteren Einsatz der gesetzlich noch erlaubten Stickstoffmenge zu erreichen. Aus diesem Grund wird an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft seit dem Jahr 2017 im Rahmen eines von der Erzeugergemeinschaft HVG finanzierten Forschungsprojekts untersucht, ob Düngesysteme mit Fertigation einen Beitrag zur Verbesserung der Nährstoffeffizienz der Hopfenpflanze leisten können.

Ziel dieser Arbeit ist es Stickstoff-Düngesysteme mit Fertigation, unter den Bedingungen in der Hallertau, im Hinblick auf eine bedarfsgerechte Stickstoffernährung der Hopfenpflanze zu analysieren und weiterhin zu bewerten, inwieweit durch die Nutzung von Fertigation die Effizienz der N-Düngung im Hopfenbau erhöht werden kann.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Biologie und Anbau der Hopfenpflanze

Hopfen, *Humulus lupulus L.* ist eine diözische, perennierende und rechtswindende Pflanze aus der Familie der Cannabaceae (Small, 1978). Von Bedeutung ist die Sonderkultur aufgrund der hohen Gehalte an spezifischen Sekundärmetaboliten (Čeh et al., 2007), welche ausschließlich von weiblichen Pflanzen gebildet werden (Neve, 1991) und essenziell für die Herstellung von Bier sind.

Die perennierenden Eigenschaften der Hopfenpflanze beruhen auf unterirdischen, im Boden überdauernden Pflanzenorganen. Aufgrund morphologischer sowie funktioneller Unterschiede können diese in das Rhizom sowie ein weitverzweigtes Wurzelsystem 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 sowie der Speicherung von Reservestoffen für den Wiederaustrieb (Kohlmann und Kastner, 1975; Neve, 1991; Rybacek, 1991). Nach Untersuchungen von Graf (2016) und Graf et al. (2014) kann eine einzelne Hopfenpflanze in Abhängigkeit von Standort und Sorte aufgrund des ausgehenden Wurzelsystems ein Bodenvolumen von 2,2 bis 7,4 m<sup>3</sup> erschließen. Des Weiteren können die unterschiedlichen Wurzeltypen der Hopfenpflanze wie folgt unterteilt werden: mehrjährige lignifizierte Wurzeln mit ausgeprägtem Wachstum bis zu einer Länge von 3,5 Meter, junge weiße Wurzeln die aus den Mehrjährigen wachsen und sprossbürtige weiße Wurzeln die sich im aufgeschütteten Dammbereich bilden. Die mehrjährigen, dickeren Wurzeln dienen auch als Speicherwurzeln für Reservestoffe (Rybacek, 1991). Da im Zuge der Ernte alle oberirdischen Teile der Hopfenpflanze entfernt werden, ist die Einlagerung von Reservestoffen bei Hopfen von besonderer Bedeutung. Der Wiederaustrieb im darauffolgenden Frühjahr erfolgt durch die über diese Reservestoffe ernährten Knospen (Kohlmann und Kastner, 1975). Als mengenmäßig wichtigste Reservestoffe zählen bei Pflanzen im allgemeinen Kohlenhydrate, wobei auch Proteine und Lipide gespeichert werden können (Kindl, 1991; Strasburger und Sitte, 1991). Als wichtigstes Speicherorgan für Kohlenhydrate beschreibt Eckel (1993) bei Hopfen die mehrjährigen Speicherwurzeln, welche dem Rhizom, bedingt durch Konzentrations- sowie Biomasseunterschiede, in ihrer Bedeutung überlegen sind. Zu Beginn der Vegetation ist das Längenwachstum des

Sprosses der Hopfenpflanze stärker als die Blattentwicklung (Williams, 1960), wodurch Kohlenhydrate im Wurzelstock zunächst abgebaut werden (Thomas, 1967). Nach Untersuchungen von Eckel (1993) steigt der Gesamt-Kohlenhydratgehalt in den Speicherwurzeln unter den Bedingungen in der Hallertau ab Anfang Juli erneut an, wobei ein Großteil der Einlagerung ab Ende Juli stattfindet. Neben Kohlenhydraten werden in den Speicherwurzeln von Hopfen auch N-Reserven angelegt, wovon den Pflanzen ein Teil für den Wiederaustrieb zur Verfügung steht (Seiffert, 1995; Zattler, 1936, 1956b, 1956a). Die Akkumulation der Reservestoffe in den Speicherwurzeln dauert bis zum Blattfall (physiologische Reife) oder wie bei der Kultivierung bis zur Ernte der Pflanzen (Thomas, 1982). Erfolgt eine zu frühe Ernte, sind noch nicht ausreichend Reservestoffe in den Speicherwurzeln eingelagert, wodurch die Pflanzen im Folgejahr eine geringere Vitalität und Widerstandskraft gegen Krankheiten aufweisen (Lutz et al., 2009; Zattler, 1965). Ob ein Zusammenhang zwischen N-Düngung, N-Versorgungszustand und N-Einlagerung sowie dem Wiederaustrieb im Folgejahr besteht, wurde bisher nicht analysiert.

Unter optimaler Bewirtschaftung können Hopfenpflanzen im Anbau in Abhängigkeit von Sorte und Standort bis zu 25 Jahre gleichbleibend hohe Erträge liefern (Engelhard et al., 2011b). Im Frühjahr werden je nach Anbaugebiet verschiedene mechanische und chemische Verfahren zur zeitlichen Steuerung des Austriebs sowie zur Unterdrückung von falschem und echtem Mehltau (*Pseudoperonospora humili* und *Podosphaera macularis*) angewendet. In den mitteleuropäischen Gebieten erfolgt ein Zurückschneiden der unterirdischen Sprossorgane des Vorjahres, wodurch ein Teil der Knospen sowie der aufgeschüttete Damm entfernt werden (Biendl et al., 2012). Neben der Steuerung des Austriebzeitpunkts sowie der phytosanitären Bedeutung dient diese pflanzenbauliche Maßnahme auch der Gewinnung von Fehsern zur vegetativen Vermehrung. Aus den verbleibenden Knospen entwickelt sich anschließend, während der Phase des Austriebs, eine Vielzahl an Trieben, welche ab einer Länge von 40 bis 60 cm beginnen sich rechts zu winden (Zattler, 1965). Von diesen werden je Pflanze 4 bis 6 Triebe an zwei Aufleitdrähte oder -schnüre angeleitet, welche den Pflanzen als Kletterhilfe dienen. Im weiteren Wachstumsverlauf entwickeln sich die angeleiteten Triebe zu sechskantigen Haupttrieben mit Klimmhaaren, die das Hochwachsen an der Kletterhilfe ermöglichen (Neve, 1991).

Durch das Aufackern werden entlang der Pflanzreihen neue Dämme aufgeschüttet und geformt, wodurch das Austreiben weiterer Triebe aus dem Wurzelstock verhindert und

das Unkrautwachstum unterdrückt wird. Am unteren Teil der verschütteten Haupttriebe bilden die Pflanzen im weiteren Vegetationsverlauf sekundäre Sommerwurzeln aus. Diese können zusätzlich Nährstoffe sowie Wasser aufnehmen. Häufig wird dabei das gesamte Dammvolumen erschlossen, die Intensität der Durchwurzelung variiert jedoch in Abhängigkeit von Bodenart, Witterung und Bewirtschaftung (Graf et al., 2014; Kohlmann und Kastner, 1975).

Die Haupttriebe einer Hopfenpflanze sind durch Nodien untergliedert, deren Anzahl und Abstand von der Sorte, dem Anbaujahr und den Wachstumsbedingungen abhängig sind. Die Internodien der Sprossachsen sind im Inneren hohl. Im Wachstum befinden sich stets nur die oberen zwei bis drei Abschnitte (Borde et al., 1989). An den Nodien bilden die Pflanzen zunächst zwei schmale gegenständige Nebenblätter, aus deren Achsel jeweils ein langgestieltes Laubblatt wächst. Die Form der gezahnten Laubblätter ist altersabhängig, wobei jüngere Blätter in der Regel einlappig sind, ältere dagegen fünflobig. Nachdem die Hopfenpflanze eine bestimmte Wuchshöhe und Anzahl an Nodien erreicht hat, etwa bei halber Gerüsthöhe, beginnt die Ausbildung der in den Blattachsen angelegten Seitentriebe. Da ein Großteil der Blüten an diesen Trieben gebildet wird, ist deren Anzahl und Ausbildung von entscheidender Bedeutung für die Ertragsbildung (Engelhard et al., 2011a; Kohlmann und Kastner, 1975; Zattler, 1965).

Der Übergang vom vegetativen Wachstum in die generative Phase beginnt unter den Bedingungen in der Hallertau ab Anfang Juli, ausgelöst durch bestimmte Lichtverhältnisse. Die Blühinduktion erfolgt, sobald eine maximale Tageslänge von 16 bis 18 Stunden erreicht wurde und die Tage anschließend wieder kürzer werden, weshalb Hopfen eine Kurztagpflanze darstellt. Möglich ist eine Induktion jedoch nur, wenn die Pflanze eine bestimmte sortenabhängige Mindestgröße erreicht hat, welche mit der Anzahl an Nodien am Haupttrieb beschrieben werden kann (Biendl et al., 2012; Thomas und Schwabe, 1969). Thomas und Schwabe (1970) ermittelten in Untersuchungen, dass sobald die sogenannte „ripeness to flower“ erreicht wurde, eine rapide Verringerung des Durchmessers des Apikalmeristems der Haupttriebe eintritt.

Je nach Sorte und Wachstumsverhältnissen vollzieht sich die Blüte über einen Zeitraum von 3 bis 4 Wochen. Bei den Blüten einer weiblichen Hopfenpflanze handelt es sich um Blütenstände bestehend aus Einzelblütchen, welche aufgrund der Windbestäubung klein und unauffällig sind (Kohlmann und Kastner, 1975). Die einzelnen Blütchen entwickeln sich im Verlauf der Ausdoldung zu einem Zapfen oder einer zusammengesetzten Dolde,

bestehend aus einer gewellten Spindel mit Deck- und Vorblättern. An den Vorblättern sitzen Lupulindrüsen, welche ein gelbes klebriges Pulver (Lupulin) mit den wertgebenden Inhaltsstoffen synthetisieren (Rybacek, 1991). Erfolgt eine Befruchtung der Blüten wird in der taschenartigen Vertiefung am unteren Ende der Vorblätter ein Samen gebildet (Kohlmann und Kastner, 1975). Bei der Produktion von Hopfen für die Bierherstellung ist dies jedoch unbedingt zu vermeiden, weil der hohe Fettsäuregehalt der Samen die Schaum- und Geschmacksstabilität des Bieres negativ beeinflusst und so zu einer erheblichen Minderung der Brauqualität führt (Biendl et al., 2012).

## 2.2 Hopfeninhaltsstoffe

Die sekundären Inhaltsstoffe der Hopfendolden können auf Grundlage der physikalisch-chemischen Eigenschaften in Bitterstoffe (Harze), ätherische Öle und Polyphenole unterteilt werden (Steenackers et al., 2015). Während es sich bei den Harzen und Ölen um Inhaltsstoffe des Lupulins handelt, sind die polyphenolischen Substanzen in den Doldenblättern enthalten (Biendl et al., 2012).

Die Gruppe der Harze, welche bisher bei keiner anderen Pflanzenart gefunden wurde, stellt eine Besonderheit des Hopfens dar (Neve, 1991). Diese werden durch ihre Löslichkeit in kaltem Methanol und Diethylether definiert (Mander und Liu, 2010). Auf Basis der Löslichkeit in Hexan ist eine weitere Klassifizierung in lösliche Weichharze und unlösliche Hartharze möglich (Steenackers et al., 2015). Die Weichharze werden in sogenannte Alpha- und Beta-Säuren unterteilt, wobei die Alpha-Säuren von den Brauern als primäres wirtschaftliches Qualitätsmerkmal angesehen werden, da sie ein Maß für das Bitterpotenzial im Bier darstellen (Kammhuber, 2005). Alpha- und Beta-Säuren (Abb. 2.1) sind di- bzw. triprenylierte Derivate des Phloroglucinols, die jeweils eine Mischung aus Homologen darstellen welche sich nur in ihrer Alkanoyl-Seitenkette unterscheiden (Biendl et al., 2012). Die Hauptbestandteile der Alpha- und Beta-Säure werden als n-, Co- und Ad-Humulon bzw. Lupulon bezeichnet (Kammhuber, 2008a). Zusätzlich existieren weitere Nebenhomologe, wie das Prä- und Post-Humulon bzw. Lupulon, welche aufgrund der geringen Mengen jedoch unbedeutend sind. Die Hauptbittere im Bier entsteht schließlich weder durch Alpha- noch Beta-Säuren, sondern durch Iso-Alpha-Säuren, die während des Brauprozesses gebildet werden (Biendl et al., 2012). In früheren Untersuchungen wurde häufig der Begriff des Bitterstoffgehalts der Hopfendolden verwendet. Dieser Wert wird definiert durch den Humulon- und Lupulon-Gehalt (Zattler, 1965).

Der Biosyntheseweg der Alpha- und Beta-Säuren sowie die dabei beteiligten Enzyme wurden bisher nicht vollständig aufgeklärt. Jedoch ist bekannt, dass der aromatische Ring des Humulon und Lupulon, ein Phloroglucinol-Derivat, durch die Kondensation eines Acyl-Coenzym-A (CoA) und dreier Malonyl-CoA Moleküle durch das Enzym Valerophenon-Synthetase (VPS) gebildet wird. Dabei existieren drei verschiedene Acyl-CoAs: Isovaleryl-CoA, Isobutyryl-CoA und 2-methylbutyryl-CoA. Deren Bildung wiederum aus den verzweigt-kettigen Aminosäuren Leucin, Valin und Isoleucin erfolgt. Entsprechend der unterschiedlichen Herkunft der Acyl-CoA-Moleküle werden die drei Haupt-Phloroglucinol-Derivate als Phlorisovalerophenone (PIVP), Phlorisobutyrophenone (PIBP) und Phlormethylbutanophenone (PMBP) bezeichnet. Im weiteren Verlauf der Synthese folgt eine zwei- bzw. dreifache Prenylierung der resultierenden Phloroglucinol-Derivate mit Dimethylallyldiphosphate (DMAPP) durch eine *Humulus L.* spezifische aromatische Prenyltransferase. Es entsteht zunächst das Zwischenprodukt Deoxyhumulone und anschließend das Humulon und Lupulon (Clark et al., 2013; Goese et al., 1999; Okada und Ito, 2001; Tsurumaru et al., 2012).

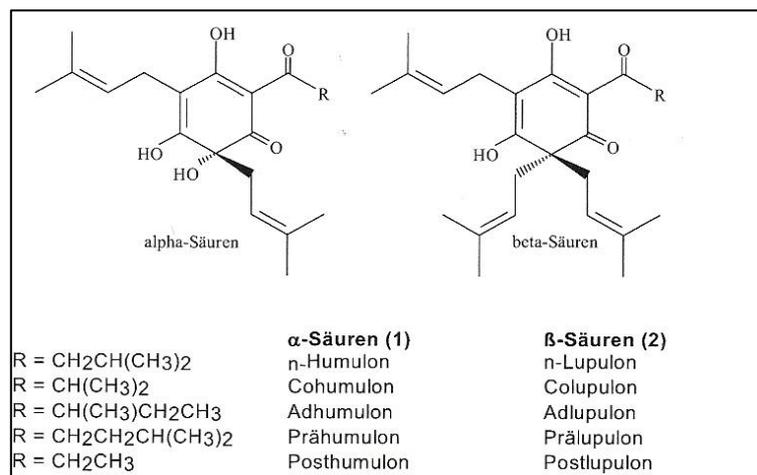


Abb. 2.1: Alpha- und Beta-Säuren des Hopfens (Kammhuber, 2008a)

Der Geruch des Hopfens, auch als grünes Hopfenaroma bezeichnet, wird durch die enthaltenen ätherischen Öle hervorgerufen. Während die Zusammensetzung des ätherischen Öls vor allem von der Sorte abhängt, wird der Gehalt auch durch das Anbauggebiet und das Erntejahr beeinflusst. Die Vielzahl an flüchtigen Verbindungen, aus denen sich das gesamte ätherische Öl zusammensetzt, wird in Kohlenwasserstoffe und sauerstoffhaltige Verbindungen unterteilt. Als wichtigste Indikatorsubstanz für das Hopfenaroma im Bier gilt Linalool 11 ein Monoterpenoxid aus der Gruppe der sauerstoffhaltigen Verbindungen, dessen Anteil maximal 1,5 % des Gesamtöls beträgt (Biendl et al., 2012).

Polyphenole, die dritte Gruppe der Sekundärmetaboliten des Hopfens, kommen in vielen Pflanzenarten vor und haben heute aufgrund vielfältiger, gesundheitlich positiver Eigenschaften einen hohen ernährungsphysiologischen Stellenwert erlangt (Biendl, 2006). Der Gesamtgehalt an Polyphenolen in getrockneten Hopfendolden kann je nach Sorte bis zu 8 % betragen (Kammhuber, 2008b). Zu den besonderen Verbindungen des Hopfens zählt insbesondere das prenylierte Chalcon Xanthohumol aus der Gruppe der Prenylflavonoide, welches eine Vielzahl an positiven Wirkungsweisen hat, vor allem aber durch das anticancerogene Potenzial bekannt wurde (Biendl, 2006).

## **2.3 Agronomische Grundlagen**

Im kommerziellen Anbau der Sonderkultur Hopfen ist aus agronomischer Sicht sowohl der Doldenertrag als auch der Gehalt an Alphasäure, als wertgebender Inhaltsstoff, von Bedeutung. Das grundsätzliche Niveau von Ertrag und Alphasäuregehalt wird durch das genetisch fixierte, umweltunabhängige Ausgangspotenzial und somit der Hopfensorte bestimmt. Weltweit werden derzeit 283 verschiedene Hopfensorten mit stark unterschiedlichen Ertrags- und Alphasäuregehaltspotenzialen kultiviert (IHB, 2020). Dabei erfolgt eine Differenzierung in Bitter- und Aroma-sorten, wobei Erstere in der Regel ein höheres Ertrags- und Alphasäuregehaltsniveau aufweisen.

### **2.3.1 Ertragsbildung und Ertragsaufbau**

Die im Anbaugebiet Hallertau kultivierten Hopfensorten zeigen deutliche Unterschiede in ihren morphologischen und entwicklungsphysiologischen Eigenschaften sowie den Doldenerträgen und Alphasäuregehalten. Engelhard et al. (2011a) analysierten die Ursachen der Ertragsunterschiede verschiedener Hopfensorten in der Hallertau. Dabei konnte gezeigt werden, dass diese sich in ihrem Ertragsaufbau grundsätzlich unterscheiden und eine hohe Variation genetisch bedingter morphologischer Merkmalsausprägungen aufweisen. Neben der Doldenanzahl und dem durchschnittlichen Doldengewicht stellen auch die Anzahl und Länge der Seitentriebe sowie die Anzahl an Nodien und damit der Habitus ertragsrelevante Faktoren einer Hopfenpflanze dar. Weitere Analysen zur Variabilität von Hopfen stammen von Cernea (2000, 2002) und Cernea et al. (2008). Auf Basis der Untersuchung von 126 verschiedenen Sorten wurde der Habitus, welcher durch die Parameter Seitentriebanzahl, Seitentrieblänge sowie Nodienanzahl bestimmt wird, als wesentlicher Faktor für die Ertragsbildung definiert. Als weitere ertragsrelevante Faktoren

werden die Doldenanzahl und das durchschnittliche Doldengewicht genannt. Auch Rybacek (1991) beschreibt die Bedeutung des Habitus für den Ertrag und definiert folgende Basis Habitus-Formen einer Hopfenpflanze: kopfbetont, zylindrisch und konisch (Abb. 2.2). Dabei wird eine möglichst zylindrische Form als optimal hinsichtlich des Ertrags und der Qualität angesehen.



Abb. 2.2: Basis Habitus-Formen einer Hopfenpflanze:  
1) Kopfbetont, 2) Zylindrisch und 3) Konisch  
(Rybacek, 1991).

Da ein Großteil der Dolden an den Seitentrieben gebildet wird (vgl. 2.1), ist ein sortenspezifisch optimaler Habitus für die Ertragsbildung von Bedeutung. Dabei werden Wachstum und Entwicklung der Seitentriebe einer Hopfenpflanze auch durch Umweltfaktoren wie dem Standort, der Witterung oder der Produktionstechnik beeinflusst. Aus der Praxis ist bekannt, dass ungünstige Witterungsbedingungen in Form von hohen Temperaturen und Trockenheit während der Ausbildung der Seitentriebe zu Einschränkungen in deren Wachstum und somit suboptimalen Habitus-Formen führen können, wodurch letztendlich auch das Ertragspotenzial reduziert wird.

### 2.3.2 Stickstoffversorgung und Stickstoffdüngung

Für optimales Pflanzenwachstum ist neben einer gleichmäßigen Wasserversorgung auch eine ausgeglichene Nährstoffversorgung von Bedeutung. Der mengenmäßig wichtigste Makronährstoff ist Stickstoff (Hawkesford et al., 2012), welcher auf landwirtschaftlichen Flächen häufig am stärksten ertragslimitierend wirkt (Craswell und Godwin, 1984), zugleich aber auch negative umweltökologische Effekte zur Folge haben kann.

Auch die Sonderkultur Hopfen hat aufgrund des hohen Biomassezuwachses während der Wachstumsperiode und der Erzeugung einer blattreichen Pflanzenmasse einen hohen Stickstoffbedarf (Zattler, 1965). Nach den Untersuchungen von Zattler (1965) wirkt sich eine Düngung mit Stickstoff am stärksten auf das Wachstum und die Entwicklung der Hopfenpflanze sowie auf den Doldenertrag aus. Auch Doerell (1931), zitiert in Schäufele (1966), konnte bereits in Versuchen zeigen, dass das Wachstum der Hopfenpflanze durch Stickstoff stark zu beeinflussen ist.

Grundlegende Untersuchungen zum Nährstoffhaushalt der Hopfenpflanze wurden von Portner et al. (2007) in der Hallertau, Seiffert und Claassen (1993) sowie Seiffert (1995) in Tettwang, Gingrich et al. (1994) in den USA, Rybacek (1991) in Tschechien, Schäufele (1966) in der Hallertau sowie in Tettwang und Zattler (1934, 1936, 1954b, 1956c, 1965) in der Hallertau durchgeführt. Dabei ist anzumerken, dass ein Großteil der untersuchten Sorten, mit Ausnahme der von Portner et al. (2007) erforschten, im heutigen Anbau nicht mehr existieren oder kaum noch eine Bedeutung haben. Des Weiteren unterscheiden sich die damaligen Anbausysteme von den heutigen deutlich. Neuere Untersuchungen zum Nährstoffhaushalt der Hopfenpflanze liegen nicht vor. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird auf den aktuellen Stand des Wissens im Hinblick auf den Nährstoff Stickstoff eingegangen.

#### **Verlauf der Stickstoffaufnahme:**

Zur zeitlichen Anpassung des Stickstoffangebots an den Bedarf der Hopfenpflanze sind Kenntnisse über den Verlauf von Wachstum und Stickstoffaufnahme essenziell. Die aktuellsten Erkenntnisse zu Biomassebildung und N-Aufnahmeverlauf des Hopfens stammen aus Untersuchungen, die im Zeitraum von 1998 bis 2000 in der Hallertau durchgeführt und von Portner et al. (2007) veröffentlicht wurden (Abb. 2.3). Für neuere Hopfenorten existieren hingegen keine Daten. Dabei konnte ermittelt werden, dass der Verlauf der N-Aufnahme in den Spross über den Wachstumsverlauf und Bedarf des Sprosses an

die Biomassebildung der Hopfenpflanze gekoppelt ist. Weiterhin zeigt der Verlauf beider Parameter deutlich, dass ein Zeitraum höchster Biomassebildungs- und N-Aufnahmeraten existiert. Vergleichbare Beobachtungen konnten auch Gingrich et al. (1994), Schäufele (1966), Seiffert (1995), Seiffert und Claassen (1993) und Zattler (1965) in ihren Untersuchungen machen. Seiffert (1995) bringt diese Phase mit der Ausbildung der Seitentriebe und Blüten, den wichtigen Prozessen der Ertragsbildung, in Verbindung und ermittelte in diesem Zeitraum Stickstoffaufnahme von bis zu  $3,7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Tag}^{-1}$ . Weiterhin wird aus den Daten ersichtlich, dass die prozentuale N-Aufnahme, gemessen an der Gesamt-N-Aufnahme, der Biomassebildung vorausgeht, was auch von Seiffert, Gingrich, Schäufele und Zattler beschrieben wurde. In allen Untersuchungen wurde ausschließlich die Stickstoffaufnahme in die oberirdische Biomasse betrachtet. Obwohl von verschiedenen Autoren darauf hingewiesen wird, dass N-Reserven für den Wiederaustrieb der Hopfenpflanze von Bedeutung sind (Seiffert, 1995; Zattler, 1954a), wurde die Einlagerung von Stickstoff in die unterirdischen Überdauerungsorgane in Abhängigkeit von der N-Düngung bisher nicht analysiert.

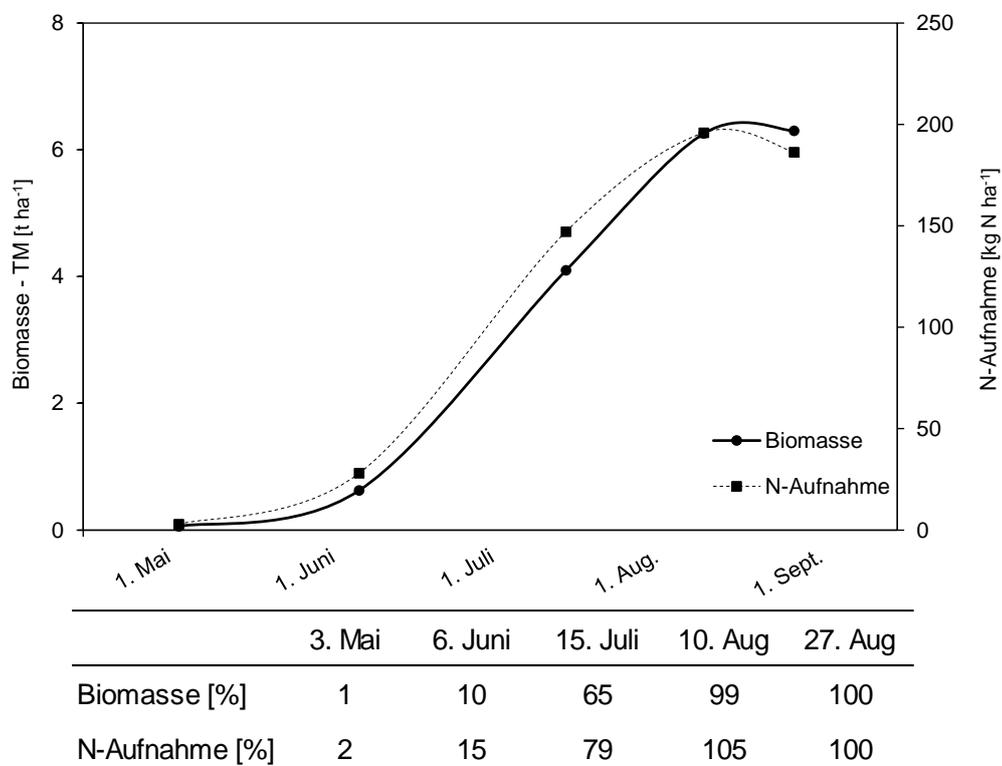


Abb. 2.3: Absoluter & relativer Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme von Hopfen (Eigene Darstellung nach Portner et al. (2007)).

**Stickstoffmangel:**

Eine Unterversorgung der Hopfenpflanze mit Stickstoff oder ein Stickstoffmangel führt zunächst zu einer reduzierten Grünfärbung und somit zu einer Aufhellung der Blätter. Bei zunehmender Unterversorgung ergibt sich eine hängende Blattstellung, die Blätter vergilben und fallen von unten beginnend vorzeitig ab. Des Weiteren werden Wachstum und Entwicklung der Pflanze während der vegetativen Phase verlangsamt und es kommt zur Bildung von verkürzten, unfruchtbaren Seitentrieben oder einer fehlenden Ausbildung dieser, wodurch sich letztendlich die Ertragsbildung verringert (Kohlmann und Kastner, 1975; Zattler, 1965). Im Verlauf der generativen Phase führt Stickstoffmangel zu einer beschleunigten Abreife der Pflanzen (Linke und Rebl, 1950; Schäufele, 1966). Inwieweit sich eine Stickstoffunterversorgung auf die N-Einlagerung und N-Reserven der Überdauerungsorgane auswirkt, wurde bisher nicht untersucht.

**Stickstoffüberschuss:**

Eine Überversorgung der Hopfenpflanze mit Stickstoff führt zu einer dunkleren Grünfärbung der Blätter, langen Seitentrieben sowie stark ausgeprägtem vegetativem Wachstum mit hoher Biomassebildung, wodurch auch Lichtmangel im Pflanzenbestand entstehen kann. Die Streckung der Internodien nimmt zu, weshalb sich die Anzahl an Nodien am Hauptspross reduziert und somit insgesamt weniger Seitentriebe gebildet werden können. Auch an den Seitentrieben ergibt sich eine verstärkte Streckung der Internodien und im Verhältnis zum starken vegetativen Wachstum verringert sich der Blüten- und Doldenansatz. Weiterhin kann eine übermäßige N-Versorgung eine ungleichmäßige Ausdoldung sowie Reifeverzögerung bewirken und bei bestimmten Sorten zu größeren Dolden mit dickeren und locker gegliederten Spindeln führen. Dabei kann im Verhältnis zur Größe der Deck- und Vorblätter sowie der Spindeln auch eine Reduktion des Lupulingehalts eintreten (Kohlmann und Kastner, 1975; Zattler, 1965). Überhöhte N-Düngemengen führen außerdem zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Pilzkrankheiten wie beispielsweise *Verticillium* (Lutz, 2019).

Des Weiteren ist bekannt, dass bei übermäßiger N-Düngung eine Verringerung des Bitterstoffgehalts möglich ist (Kohlmann und Kastner, 1975; Zattler, 1965). Der negative Zusammenhang zwischen der Höhe der Stickstoffdüngung und dem Bitterstoffgehalt wurde von Zattler (1965) basierend auf eigenen Untersuchungen (Zattler, 1949; Zattler et al., 1960; Zattler und Jehl, 1951) umfangreich beschrieben. Auch die von Doerell (1927),

zitiert in (Zattler, 1965) in Deutschland, sowie Keller und Magee (1952, 1954) in den USA angestellten Feldversuche zeigten deutlich, dass überhöhte Stickstoffdüngemengen zu einer Reduzierung der Bitterstoffgehalte führen können. Hingegen konnten Thompson und Burgess (1952) diesen Zusammenhang in Versuchen in England nicht herstellen. Aufgrund der Untersuchungen von Keller und Magee (1954) an unterschiedlichen Hopfensorten ist jedoch davon auszugehen, dass der Einfluss der N-Düngung auf den Bitterstoffgehalt sortenspezifisch ist. Auch Iskra et al. (2019) ermittelten in Feldversuchen, durchgeführt in den Bundesstaaten Oregon und Washington (USA), an unterschiedlichen Hopfensorten einen negativen Einfluss steigender Stickstoffgaben auf den Alphasäuregehalt.

### **Stickstoffdüngung:**

Die Frage der optimalen Höhe der Stickstoffdüngung von Hopfen wurde in den vergangenen 30 Jahren weltweit in verschiedenen Arbeiten analysiert und beschrieben.

In Deutschland untersuchten ALLB Tettngang (1993) und Seiffert (1995) im Anbaugebiet Tettngang sowie Roßbauer (1998) in der Hallertau im Rahmen langjähriger Düngeversuche den zusätzlichen N-Düngebedarf des Hopfens unter Berücksichtigung des zu Vegetationsbeginn im Boden vorhandenen mineralischen Stickstoffs (N<sub>min</sub>). Dabei wurde, ausgehend von unterschiedlich hohen N-Sollwerten, durch Abzug des N<sub>min</sub>-Gehalts die zu applizierende N-Menge berechnet und variiert. In Tettngang ermittelte Seiffert (1995) dass ein N-Sollwert von 220 kg N/ha ausreicht, um den Maximalertrag zu erreichen. Aufgrund des Fehlens niedrigerer Sollwertstufen konnte jedoch keine Aussage hinsichtlich geringerer N-Düngemengen abgeleitet werden. Dieser Sollwert wurde auch in den Versuchen von ALLB Tettngang (1993) bestätigt. In der Hallertau kam Roßbauer (1998) zu dem Ergebnis, dass ein N-Sollwert von 225 kg N/ha ausreicht, um optimale Doldenerträge zu erzielen, wohingegen eine Verringerung auf 180 kg N/ha eine Ertragsreduktion verursacht.

In zweijährigen N-Düngeversuchen in Slowenien (Bavec et al., 2003) konnte gezeigt werden, dass eine Verringerung der N-Düngung von 200 auf 160 kg N/ha keine Reduktion des Doldenertrags zur Folge hat, wobei der N<sub>min</sub>-Gehalt bei 53 kg N/ha lag. Cochran (2018) sowie Takle und Cochran (2017) stellten im Rahmen einjähriger Düngeversuche in Iowa (USA) fest, dass eine N-Düngemenge von 112 kg N/ha ausreichte, um

Maximalerträge zu erzielen, wobei anzumerken ist, dass der zu Versuchsbeginn im Boden vorhandene mineralische Stickstoff (N<sub>min</sub>) nicht bestimmt wurde.

Eine umfangreichere Studie zu den Auswirkungen von Höhe und Zeitpunkt der N-Düngung auf den Ertrag und die Qualität von Hopfen wurde von Iskra et al. (2019) in den US-Anbaugebieten Corvallis in Oregon und Yakima Valley in Washington durchgeführt. Als Ergebnis der mehrjährigen Feldversuche wird angeführt, dass eine Steigerung der N-Düngung bei den Sorten Tomahawk und Willamette bis 180 kg N/ha ertragswirksam war, eine weitere Erhöhung jedoch keinen Mehrertrag lieferte, sondern den Gehalt an Alpha-säure reduzierte. Dabei ist zu beachten, dass der zu Vegetationsbeginn im Boden vorhandene mineralische Stickstoff nicht berücksichtigt wurde. Weiterhin wurde an der Sorte Simcoe der Einfluss des Zeitpunkts der N-Applikation untersucht, wobei für den Alpha-säuregehalt eine Reduktion bei später N-Applikation festgestellt wurde.

Eine zusammenfassende Aussage zur Frage der optimalen Höhe der Stickstoffdüngung von Hopfen ist aufgrund der unterschiedlichen Sorten und zum Teil nicht analysierten N<sub>min</sub>-Gehalten nicht möglich. Des Weiteren stammen die beschriebenen Ergebnisse mit Ausnahme der in den USA erhobenen Daten aus Untersuchungen an älteren, heutzutage nicht mehr im Anbau befindlichen Hopfensorten. Dies gilt vor allem für die von Roßbauer (1998) veröffentlichten und für das Anbaugebiet Hallertau relevanten Versuchsergebnisse. Vor dem Hintergrund, dass die derzeit in der Hallertau genutzten Sorten im Vergleich zu früheren eine höhere Biomassebildung erreichen (Engelhard et al., 2011a), besteht die Frage, inwieweit die Ergebnisse von Roßbauer (1998) für aktuelle Sorten noch gültig sind. Für die gegenwärtig in der Hallertau im Anbau genutzten Hopfensorten existieren keine Daten aus Stickstoffsteigerungsversuchen. Der notwendige N-Düngebedarf wird aktuell, ausgehend von einem N-Sollwert in Höhe von 220 bzw. 230 kg N/ha, durch Abzug des N<sub>min</sub>-Gehalts und Berücksichtigung weiterer Zu- und Abschläge aufgrund des Ertragsniveaus, sowie standortspezifischer Gegebenheiten berechnet. Zur Deckung des errechneten N-Düngebedarfs werden sowohl organische als auch mineralische N-Düngemittel genutzt. Nach Beratungsempfehlungen kann die Applikation der mineralisch auszubringenden N-Menge in drei gleichen Gaben erfolgen, wobei für deren Verteilung die Zeitpunkte Mitte bis Ende April, Ende Mai und Ende Juni bis Anfang Juli vorgeschlagen werden (LfL, 2020b). Während die Ausbringung des mineralischen Stickstoffs in der Hallertau hauptsächlich durch das oberflächige Streuen granulierter N-Düngemittel

erfolgt, wird in semiariden Anbaugebieten wie dem Yakima Valley (USA) ein Großteil des Stickstoffs über das Bewässerungswasser appliziert.

### 2.3.3 Bewässerung und Fertigation

Für ein stabiles Ertragsniveau stellt die Sonderkultur Hopfen neben einer ausgeglichenen Nährstoffversorgung vor allem hohe Ansprüche an die Wasserversorgung, wobei nicht nur die absolute Wassermenge, sondern auch die zeitliche Verteilung der Niederschläge von Bedeutung ist (Münsterer, 2012). Die Aufrechterhaltung eines spezifischen Wassergehalts im Bereich des Wurzelsystems ist für optimales Pflanzenwachstum essenziell (Savva und Frenken, 2002), da der Bodenwassergehalt sowohl den Wasserhaushalt der Pflanze, als auch die Nährstoffverfügbarkeit und Nährstoffaufnahme beeinflusst.

Der Einfluss der Wasserversorgung auf Wachstum und Entwicklung sowie Ertrag und Inhaltsstoffsynthese der Hopfenpflanze wurde von verschiedenen Autoren untersucht und beschrieben. Srećec et al. (2004; 2008) verdeutlichten auf Basis mehrjähriger Feldversuche an der Sorte Aurora in Kroatien die negativen Effekte hoher Temperaturen sowie negativer klimatischer Wasserbilanzen auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe. Dieser Zusammenhang wurde durch empirische Modelle zusätzlich bestätigt (Srećec et al., 2013). Auch in pflanzenbaulichen Versuchen in Tschechien konnte die Bedeutung der Niederschlagsverteilung während der Vegetation ermittelt werden (Koren, 2007). Des Weiteren zeigten Donner et al. (2020), Kučera und Krofta (2009), Mozny et al. (2009), sowie Potop (2014) für die tschechische Hopfensorte Saazer, auf Basis empirischer Modelle, die Bedeutung der Witterungsparameter Temperatur sowie Niederschlag für den Alphasäuregehalt und Doldenertrag. Auch in Slowenien analysierten Pavlovic et al. (2012; 2013) in Modellen den Einfluss verschiedener Witterungsparameter und stellten den Einfluss des Niederschlags sowohl für den Ertrag, als auch für den Gehalt an Alphasäuren heraus. Des Weiteren zeigten Keukeleire et al. (2007) in Belgien die Sensibilität von Hopfen gegenüber ungünstigen Witterungsbedingungen auf.

Der Anbau von Hopfen erfolgt weltweit in klimatisch sehr unterschiedlichen Regionen. Die Möglichkeit zur Bewässerung stellt dabei in semiariden Anbaugebieten wie dem Yakima Valley (WA, USA) eine wichtige Grundvoraussetzung dar, ohne welcher der kommerzielle Anbau der Sonderkultur nicht möglich wäre. In humiden Anbauregionen, wie der Hallertau hingegen, finden Bewässerungssysteme vor allem zur Ertragsabsicherung

sowie Risikominimierung in Jahren mit Trockenperioden oder auf Standorten mit geringer Wasserspeicherfähigkeit des Bodens Anwendung.

Dabei werden im Hopfenbau vor allem Tropfbewässerungssysteme genutzt. Tropfbewässerung zählt zu den Verfahren der Mikrobewässerung und wird definiert als Bewässerungsmethode durch welche das Wasser in Tropfenform über Emitter auf die Bodenoberfläche ausgebracht wird (ASABE, 2015). Im Gegensatz zu anderen Bewässerungsformen wie Oberflächen- und Beregnungs-, aber auch Mikrosprinklerverfahren kann durch Tropfbewässerung eine höhere Wasserausnutzungseffizienz erreicht werden, da ein geringerer Anteil der gesamten Bodenoberfläche befeuchtet wird. Die Wasserverluste durch Evaporation reduzieren sich im Vergleich zu anderen Bewässerungsverfahren deutlich (Schwankl und Hanson, 2006; Shock, 2013).

Die Effekte zusätzlicher Bewässerung auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen wurden weltweit in einer Vielzahl an Versuchen analysiert. Für Tschechien zeigten Kopecký et al. (1998), Kopecký und Slašík (1997), Slašík (2000) und Svoboda et al. (2008), dass Ertrag und Qualität durch Zusatzbewässerung über Tropf- oder Mikrosprinklersysteme effektiv stabilisiert werden können. Auch in Spanien ermittelten Fandiño et al. (2015; 2019) in Feldversuchen, dass die Bewässerung von Hopfen zu höheren Doldenerträgen und Alphasäuregehalten und somit zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit führt. In den USA zeigten Nakawuka (2013) und Nakawuka et al. (2017) im Yakima Valley an vier unterschiedlichen Hopfensorten, dass durch Defizitbewässerung eine deutliche Verringerung des Doldenertrags eintritt und dass die Wassernutzungseffizienz [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] sortenspezifisch stark schwanken kann. Auch Wample und Farrar (1983) heben die Bedeutung von zusätzlicher Bewässerung im Yakima Valley hervor. Untersuchungen von Delahunty und Johnston (2011) in Maine im Nordosten der USA ergaben, dass eine zusätzliche Tropfbewässerung in den Sommermonaten, trotz des humiden Klimas in der Region, zu Ertragssteigerungen führt. Im Anbaugebiet Hallertau in Deutschland konnte im Rahmen vierjähriger Feldversuche zur Optimierung der Tropfbewässerung gezeigt werden, dass durch eine zusätzliche Bewässerung nur in Perioden mit starker Trockenheit eine Ertragsstabilisierung erreicht wird (Graf, 2016). Dabei ist anzumerken, dass die untersuchte Sorte Herkules, wie auch die verwandten Sorten Magnum und Taurus, aufgrund des Ursprungs des Zuchtmaterials, mit hoher Wahrscheinlichkeit eine erhöhte Trockenheitstoleranz aufweisen (Lutz, 2013; Stampfl, 2013). Unter den Bedingungen in der Hallertau erstreckt sich die Bewässerungsperiode von Mitte Juni bis Anfang September.

Treten in diesem Zeitraum Perioden mit Wasserdefiziten auf, erfolgt unter Berücksichtigung der aktuellen Evapotranspirationsrate, der nutzbaren Feldkapazität sowie des Bodenwassergehalts die Bemessung der Wassergaben.

Tropfbewässerungssysteme können in Abhängigkeit von der Positionierung der Tropfschläuche in oberirdische sowie unterirdische Systeme unterteilt werden (Devasirvatham, 2009; Michel und Sourell, 2014). Seit der Entwicklung moderner Tropfbewässerungssysteme erfuhren oberirdische Varianten ein deutlich stärkeres Wachstum, als unterirdische Systeme. Dies begründet sich wahrscheinlich in den zusätzlichen Problemen unterirdischer Systeme, welche durch blockierte Emitter und Wurzelinfusionen hervorgerufen werden können (Camp und Lamm, 2003). Bei oberirdischen Systemen liegen die Tropfschläuche mit den integrierten Emittlern entweder auf der Bodenoberfläche oder sind an einer Gerüstanlage befestigt. Hingegen werden die Schläuche bei unterirdischen Anlagen dauerhaft unterhalb der Bodenoberfläche installiert (Lamm und Camp, 2006). Die Ausstoßraten der Emitter unterscheiden sich in der Regel nicht voneinander, jedoch weisen Tropfleitungen zur unterirdischen Installation eine höhere Wandstärke auf (Coolong, 2016). Die Schläuche werden bei unterirdischen Systemen so tief installiert, dass keine Beeinträchtigung durch die Bodenbearbeitung erfolgt und die Lebensdauer mehrere Jahre beträgt (Camp und Lamm, 2003).

Erfolgt die Wasserausbringung durch unterirdische Tropfbewässerung, unterscheidet sich das Verteilungsmuster des Wassers im Boden im Vergleich zur oberirdischen grundsätzlich, da auch eine Ausbreitung entgegen der Schwerkraft stattfindet (Sne, 2006). Über Tropfbewässerung appliziertes Wasser bewegt sich im Boden in einem dreidimensionalen Strömungsmuster (Kafkafi und Tarchitzky, 2011). Die tatsächliche Verteilung im Feld, ausgehend von einer punktförmigen Quelle, wird neben den Faktoren Schwerkraft und Kapillarkräfte zusätzlich durch eine Vielzahl an Bodenfaktoren beeinflusst. Zu diesen gehören hydraulische Bodeneigenschaften, Textur und Struktur eines Bodens, undurchlässige Schichten im Profil sowie die horizontale und vertikale Permeabilität (Cote et al., 2003; Gärdenäs et al., 2005; Skaggs et al., 2010; Vermeiren und Jobling, 1980). In verschiedenen Untersuchungen wurde gezeigt, dass die vertikale sowie horizontale Verteilung des Wassers, ausgehend von punktförmigen Quellen, als Funktion der Ausstoßrate dargestellt werden kann (Bresler, 1977; Li et al., 2003). Bei geringen Applikationsraten erfolgt vor allem eine vertikale Ausbreitung des Wassers, wohingegen die Ausbringung der gleichen Wassermenge in kürzerer Zeit zu einer verstärkten horizontalen Verteilung

führt. Neuere Untersuchungen zur Wasserverteilung bei ober- und unterirdischer Tropfbewässerung liefern Schütze et al. (2013). Bei unterirdischer Tropfbewässerung in einer Tiefe von 0,25 m erfolgt auch eine Verteilung in vertikaler Richtung entgegen der Schwerkraft, wobei die obersten Bodenschichten nicht befeuchtet werden (Abb. 2.4). Auf Sandboden verteilt sich das Wasser sowohl bei ober- als auch bei unterirdischer Bewässerung grundsätzlich verstärkt vertikal in Richtung der Schwerkraft, auf Lehm- und Schluffboden hingegen auch horizontal.

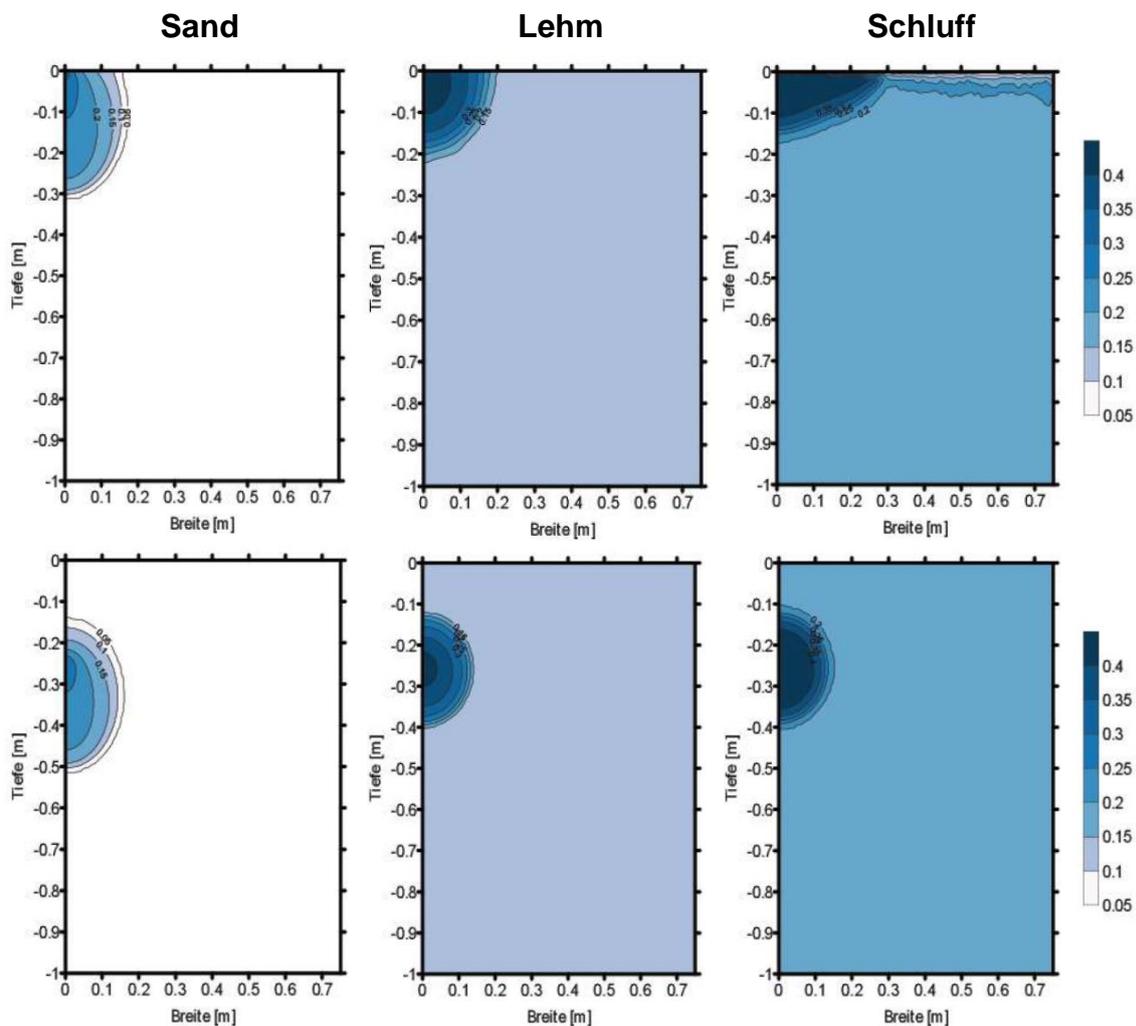


Abb. 2.4: Wasserverteilung bei ober- und unterirdischer Tropfbewässerung auf Sand-, Lehm- und Schluffboden (Verändert nach Schütze et al. (2013)).

Im Hopfenbau werden weltweit sowohl ober- als auch unterirdische Tropfbewässerungssysteme eingesetzt. Erfolgt die Installation der Bewässerungsanlage unterirdisch, befindet sich der Tropfschlauch in einer Tiefe von ca. 30 cm und liegt ebenso weit von der

Pflanzreihe entfernt, etwa im Bereich der Fahrspuren. Bei einem oberirdischen System wird der Tropfschlauch auf der Bodenoberfläche entlang der Pflanzenreihen verlegt. In mitteleuropäischen Anbaugebieten, in welchen im Frühjahr das Schneiden und im weiteren Verlauf das erneute Aufackern der Dämme erfolgt, erfordert die oberirdische Tropfbewässerung jährlich ein Auslegen und Einrollen der Tropfschläuche und damit höheren Arbeitsaufwand.

Die Auswirkungen der Positionierung des Tropfschlauches wurden von Graf (2016) im Rahmen mehrjähriger Feldversuche unter den Bedingungen in der Hallertau analysiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch oberirdische Tropfbewässerung tendenziell höhere Doldenerträge erzielt werden können. In den einjährigen Feldversuchen von Stampfl (2017), durchgeführt an zwei Sorten und zwei Standorten, lag die Ertragssteigerung durch oberirdische Bewässerung im Vergleich zur unterirdischen in Abhängigkeit von Sorte und Standort zwischen 3,9 und 11,6 %.

Neben der Sicherstellung der Wasserversorgung von Pflanzen bieten Bewässerungssysteme auch die Möglichkeit, Pflanzennährstoffe mit dem Wasser auszubringen, wodurch die Nährstoffversorgung exakt an den Bedarf des Pflanzenbestands angepasst werden kann (Ayars et al., 2006). Durch die direkte Nährstoffapplikation in die aktive Wurzelzone werden die Effizienz von Düngemitteln optimiert und verbesserte Wachstumsbedingungen geschaffen (Neilsen et al., 1998). Des Weiteren können durch die gezielte und regelmäßige Nährstoffausbringung der Gesamtbedarf sowie Auswaschungsverluste reduziert werden (Ayars et al., 1999). Diese Art der Nährstoffversorgung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen wird als Fertigation bezeichnet (Bar-Yosef, 1991) und kommt in der Landwirtschaft vor allem in ariden und semiariden Regionen zum Einsatz.

Vor dem Hintergrund einer verbesserten Nährstoffaufnahme sowie einer verringerten Verlagerung von Nährelementen in tiefere Bodenschichten, können durch Fertigation bei vielen Kulturen Ertrag und Qualität verbessert werden (Alva et al., 2008). Vor allem bei Mikrobewässerungssystemen wie der Tropfbewässerung, die nur einen Teil der Fläche befeuchten, sind konventionelle Düngesysteme mit breitflächiger Düngerausbringung ineffizient (Evans und Waller, 2006; Hagin et al., 2003; Kafkafi und Tarchitzky, 2011; Magen, 1995). Dabei stellt Fertigation bei Tropfbewässerungssystemen sowohl in semiariden, als auch humiden Klimaregionen eine effektive Methode dar, um der Nährstoffverarmung befeuchteter Zonen entgegenzuwirken (Evans, 1999). Aufgrund der mangelnden Wasser- und somit auch Nährstoffverteilung bei Tropfbewässerungssystemen existieren

neben Düngesystemen mit vollständiger Fertigation auch Verfahren, bei denen zu Vegetationsbeginn ein Teil des Nährstoffbedarfs durch konventionelle Ausbringung abgedeckt wird (Evans und Waller, 2006). Durch Fertigation können sowohl Mehr- als auch Einzelnährstoffdünger direkt in die aktive Wurzelzone appliziert werden (Paschold, 2010). Der am häufigsten eingesetzte Nährstoff ist Stickstoff, aber auch Phosphat und Kali spielen eine wichtige Rolle (Boman und Obreza, 2002; Burt, 1998). Um eine präzise Nährstoffversorgung, angepasst an den wechselnden Bedarf der Pflanzen im Vegetationsverlauf zu ermöglichen, sind Kenntnisse über kulturspezifisch benötigte Nährstoffmengen sowie Aufnahmeraten im Wachstumsverlauf essenziell. Der Einsatz von Fertigation erfolgt sowohl bei einjährigen Pflanzenarten als auch Dauerkulturen. Die Auswirkungen von Düngesystemen mit Fertigation wurden an verschiedenen Kulturen untersucht.

Boman (1995) analysierte bei Grapefruit-Bäumen in einem vierjährigen Feldversuch, ob die Nährstoffausbringung über ein kombiniertes Düngesystem mit oberflächlich granulierter Applikation und Fertigation, Vorteile gegenüber der ausschließlich granulierten Ausbringung aufweist. Als Ergebnis wird angeführt, dass durch eine kombinierte Düngung in drei von vier Jahren signifikant höhere Erträge erreicht wurden, woraus auch eine verbesserte Nährstoffeffizienz resultierte. Die durchschnittliche Ertragssteigerung lag bei Düngesystemen mit Fertigation bei 9 %. Des Weiteren analysierten Ng Kee Kwong et al. (1999) in zweijährigen Feldversuchen an Zuckerrohr die Effekte einer Stickstoffausbringung über ein Tropfbewässerungssystem im Vergleich zur regulären granulierten N-Applikation. Die Ergebnisse zeigen, dass die N-Düngung über Fertigation eine höhere Effizienz erreicht und eine Reduktion der N-Menge im Vergleich zur Referenzmethode um 30 % ermöglicht, ohne dass eine Verringerung des Zuckerertrags eintritt. Auch Asokaraja (2016) belegte in Feldversuchen an verschiedenen ein- und mehrjährigen Kulturen, darunter Zuckerrohr und Bananen, dass eine Nährstoffausbringung über Fertigation Ertrag und Qualität verbessert sowie die Wasser- und Nährstoffverwertung erhöht.

Bei der Sonderkultur Hopfen wurde diese Form der Nährstoffausbringung bisher vor allem im größten amerikanischen Anbaugebiet, dem Yakima Valley genutzt, da die Wirksamkeit oberflächlich applizierter Nährstoffe während der Vegetation aufgrund der klimatischen Bedingungen dort gering ist. In Abhängigkeit betriebsspezifischer Gegebenheiten, wie dem Einsatz organischer Düngemittel, werden unterschiedliche Anteile der benötigten Gesamtnährstoffmengen über Fertigation ausgebracht. Verbreitet werden Systeme genutzt, bei welchen ein Teil des Nährstoffbedarfs gegen Ende des Winters in granulierter

Form appliziert wird und anschließend, während der Hauptwachstumsphase der Hopfenpflanze, ein Großteil über das Bewässerungswasser ausgebracht wird (Iskra et al., 2019). Hauptsächlich wird dabei Stickstoff durch wöchentliche Gaben in Höhe von 6 – 22 kg/ha appliziert (Delahunty und Johnston, 2014). Jedoch erfolgt zunehmend auch eine gezielte Ausbringung von Mehrnährstofflösungen, deren Zusammensetzung je nach Entwicklungsstadium an den spezifischen Bedarf der Hopfenpflanze angepasst wird. Um die N-Düngung am aktuellen Bedarf der Pflanzen auszurichten, wird der Nitratgehalt in den Blattstielen voll entwickelter Blätter mehrmals im Verlauf der Vegetation analysiert (Delahunty und Johnston, 2014; Gingrich et al., 1994). Auf Basis des ermittelten N-Versorgungszustandes erfolgt anschließend wöchentlich eine Anpassung der N-Düngung durch Fertigation. Neuere, praxisorientierte Untersuchungen beschäftigen sich mit der Frage einer kontinuierlichen Nährstoffversorgung. Dabei wird im Gegensatz zur sogenannten Stoßdüngung mit wöchentlichen N-Gaben bei jedem Bewässerungszyklus eine geringe Menge an Nährstoffen, angepasst an den täglichen Bedarf der Pflanze in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums, appliziert.

Delahunty und Johnston (2014) führten im Anbaujahr 2014 in Maine im Nordosten der USA einen einjährigen Versuch zur Fertigation bei Hopfen durch. Dabei wurden an zwei- und fünfjährigen Pflanzen verschiedener Hopfensorten die Auswirkungen einer N-Düngung über Tropfbewässerung untersucht und mit dem praxisüblichen Düngesystem, bei welchem dieselbe Menge an Stickstoff oberflächlich gestreut wurde, verglichen. Als Ergebnis wird angeführt, dass Fertigation bei allen untersuchten Sorten zu einer signifikanten Verbesserung der Erträge führen kann, wobei die deutlichsten Unterschiede bei jüngeren Pflanzen erfasst wurden.

Auch Donner und Ježek (2019) untersuchten im Rahmen dreijähriger Feldversuche (2017 bis 2019) an der Hopfensorte Saazer in Tschechien die Auswirkungen von Fertigation. Dabei wurde ein Systemvergleich zwischen granulierter Düngung mit Blattdüngung und einem kombinierten System bestehend aus granulierter Düngung, Blattdüngung und Fertigation angestellt. Über Fertigation wurde mehrmals eine Mehrnährstofflösung appliziert, dabei unterschieden sich auch die insgesamt ausgebrachten Nährstoffmengen für N, Phosphat ( $P_2O_5$ ), Kali ( $K_2O$ ), Magnesium ( $MgO$ ), Schwefel und Zink. Als Ergebnis wird angeführt, dass der Doldenertrag durch das geprüfte Düngesystem mit Fertigation in jedem Versuchsjahr signifikant gesteigert werden konnte. Die erfasste Ertragssteigerung erreichte im Vergleich zur Referenzvariante bis zu 33 %. Auch Graf

(2016) kam im Rahmen seiner Arbeiten zu dem Schluss, dass die zusätzliche Ausbringung von Nährstoffen über das Bewässerungswasser ein Optimierungspotenzial für die Tropfbewässerung darstellt.

Erste Untersuchungen zur Nutzung von Fertigation unter den Bedingungen in der Hallertau stammen von Stampfl (2017). In einjährigen Feldversuchen im Anbaujahr 2016 wurde an zwei Sorten und zwei Standorten die Effektivität einer Stickstoff-Düngung über Fertigation im Vergleich zur granulierten N-Ausbringung geprüft. Ab Ende Juni wurde insgesamt 1/3 der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser appliziert, während in der Referenzvariante dieselbe N-Menge Anfang Juli in granulierter Form ausgebracht wurde. Die Ergebnisse zeigten keine Unterschiede zwischen den geprüften Düngevarianten. Als Ursache wird der Witterungsverlauf mit regelmäßigen Niederschlägen und somit optimalen Bedingungen für die Verfügbarkeit des gestreuten Stickstoffs sowie die N-Mineralisation genannt.

## 2.4 Chlorophyllwert- und Reflexionsmessungen

Durch die Anpassung der Stickstoffdüngung an den tatsächlichen Bedarf der Pflanze kann eine Optimierung agronomischer Kennzahlen bei gleichzeitiger Minimierung negativer umweltökologischer Effekte erfolgen. Um dieses Ziel zu erreichen werden neben Bodenuntersuchungsmethoden auch verschiedene Verfahren zur Erfassung des aktuellen Versorgungszustandes einer Pflanze genutzt. Dabei werden destruktive Methoden die den tatsächlichen Gehalt an Stickstoff durch die Analyse von Pflanzenproben bestimmen sowie nicht-destruktive Verfahren, welche eine indirekte Bestimmung unterschiedlicher Pflanzenparameter ermöglichen, unterschieden. Als Ansatzpunkt verschiedener nicht-invasiver Methoden dienen die spezifischen Eigenschaften der in Pflanzenteilen enthaltenen Pigmentverbindungen, welche durch Sensoren erfasst werden können (Muñoz-Huerta et al., 2013; Padilla et al., 2018).

Die in Pflanzenblättern enthaltenen Carotinoide sowie das Chlorophyll a und Chlorophyll b absorbieren eindringendes Sonnenlicht des sichtbaren Wellenlängenspektrums. Deren Absorptionsmaxima liegen im blauen Bereich zwischen 400-500 nm sowie im roten Bereich bei 600-700 nm. Hingegen werden im Bereich der grünen (500-600 nm) und nahinfraroten Wellenlängen (> 700 nm) deutlich geringere Anteile des einfallenden Lichts absorbiert, wodurch Reflexion und Transmission ansteigen (Buschmann et al., 2000). Die

Intensität der Lichtabsorption wird dabei durch die Höhe des Chlorophyllgehalts beeinflusst (Vogelmann und Evans, 2002). Bei hohen Chlorophyllgehalten reduzieren sich Transmission und Reflexion im sichtbaren Bereich, wohingegen im nahinfraroten Spektrum die Reflexion zunimmt. Geringere Chlorophyllgehalte führen hingegen zu einem Anstieg der Reflexion im sichtbaren und einer verminderten Rückstrahlung im nahinfraroten Wellenlängenspektrum (Abb. 2.5). Weiterhin ist aus zahlreichen Untersuchungen bekannt, dass eine enge Beziehung zwischen dem Chlorophyllgehalt und der Stickstoffversorgung besteht (Schepers et al., 1998; Schlemmer et al., 2013), da hohe Anteile des in Blättern enthaltenen Stickstoffs in das Chlorophyll eingebaut sind (Moran et al., 2000). Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Lichtabsorption, Chlorophyllgehalt und N-Versorgung wurden unterschiedliche optische, nicht-destruktive Methoden entwickelt, die auf Basis des Lichtabsorptions- oder Lichtreflexionsverhaltens den aktuellen N-Versorgungszustand von Pflanzen bestimmen (Richardson et al., 2002).

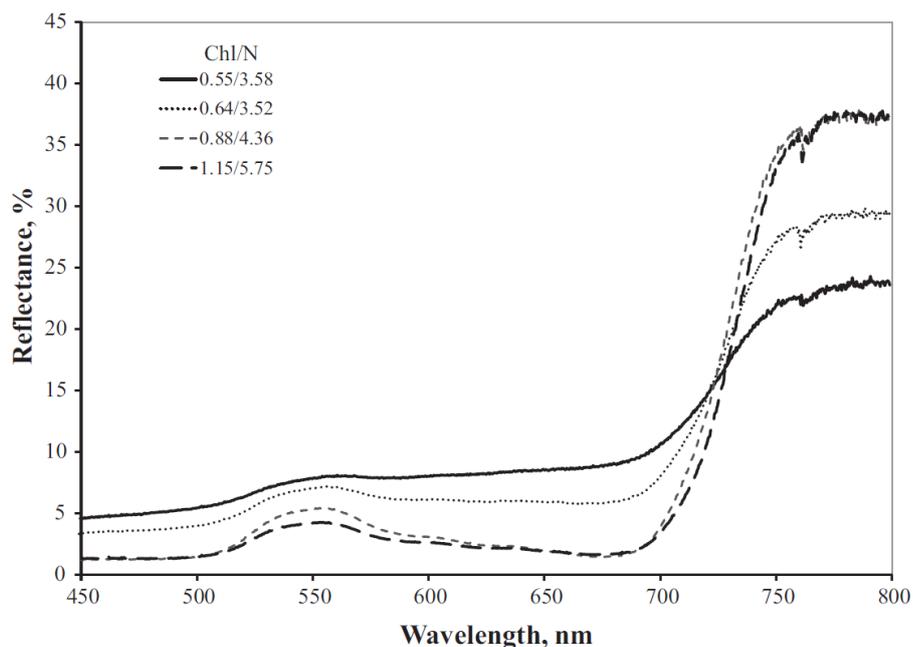


Abb. 2.5: Reflexionsspektrum von Mais mit unterschiedlichen Chlorophyll- und Stickstoffgehalten (Schlemmer et al., 2013).

Chlorophyllmeter wie das SPAD-Meter (Soil Plant Analysis Development Meter) erfassen die Lichtabsorption durch Messung des Transmissionsverhaltens bei 650 nm und 940 nm und generieren einen relativen Chlorophyll-Index (Konica Minolta, 2013). Neben der Blattdicke, deren Einfluss durch die Messung im nahinfraroten Wellenlängenbereich teilweise ausgeglichen wird, stellen der Krankheits- und Schädlingsbefall, die Strahlungsintensität sowie der Wasserstatus der Pflanzen weitere Einflussfaktoren dar (Samborski et

al., 2009 zitiert nach Ravier et al., 2017). Markwell et al. (1995) ermittelten eine enge Beziehung zwischen dem Chlorophyllgehalt und dem Chlorophyllmeter-Index am Beispiel von Sojabohnen und Mais. Der Zusammenhang zwischen dem Chlorophyllmeter-Index und dem N-Versorgungsstatus wurde unter anderem von Schepers et al. (1992) an Mais, Neilsen et al. (1995) an Apfelbäumen, Wood et al. (1992) an Baumwolle sowie von Fox et al. (1994) an Weizen aufgezeigt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine übermäßige Stickstoffversorgung durch Chlorophyllmeter-Indices nicht zuverlässig erfasst werden kann, da ab einem bestimmten N-Niveau ein Sättigungseffekt eintritt (Rostami et al., 2008; Schepers et al., 1998; Yang et al., 2014) und die Messgenauigkeit mit steigendem Chlorophyllgehalt abnimmt (Richardson et al., 2002). Weiterhin ist auch bekannt, dass das physiologische Alter eines Blattes die Höhe des Index beeinflusst und die Messwerte zunächst bis zu einem Maximum ansteigen und anschließend wieder fallen. Folglich eignen sich sehr junge Blätter nicht für eine Bestimmung des N-Versorgungszustandes, zumal diese auch eine erhöhte Heterogenität aufweisen (Li et al., 2009). Gianquinto et al. (2004) beschreiben, dass auch die Lichtintensität und somit die Lage des Blattes im Sonnen- oder Schattenbereich einer Pflanze Einfluss auf das Messergebnis hat.

Die Nutzung von Chlorophyllmeter-Indices zur Optimierung der N-Düngung wird sowohl bei acker-, als auch gartenbaulichen Kulturen verfolgt (Padilla et al., 2018; Zebarth et al., 2009). Dabei sind die Auswertung und Interpretation der Messdaten abhängig von den Faktoren Pflanzenart, Sorte, Entwicklungsstadium sowie den klimatischen Bedingungen (Schepers et al., 1998). Die verschiedenen Ansatzpunkte zur Interpretation der Messwerte basieren auf der Festlegung von Schwellenwerten, über welchen durch zusätzlichen Stickstoff keine Verbesserung agronomischer Parameter zu erwarten ist, bzw. unter welchen zusätzlicher Stickstoff zu positiven Effekten führt. Erschwert wird die Definition von Grenzwerten durch sortenspezifische Kurvenverläufe (Gianquinto et al., 2004). Neuere Untersuchungen beschäftigen sich auch mit der Entwicklung von sortenspezifischen dynamischen Schwellenwerten auf Basis von quadratischen Regressionsfunktionen zur Anpassung des Grenzwertes im Verlauf der Vegetation (Zheng et al., 2015). Eine verbreitete Vorgehensweise bei der Auswertung und Interpretation von Chlorophyllwerten ist die Berechnung eines Nitrogen-Sufficiency-Index (NSI). Dabei erfolgt ein Vergleich der Messwerte von niedrig und höher gedüngten Pflanzen eines Referenzbereichs. Liegt der berechnete Index unter 1,0 weisen die reduziert gedüngten Pflanzen einen zusätzlichen N-Bedarf auf (Padilla et al., 2018; Schepers et al., 1998).

Während das Lichttransmissionsverhalten direkt am Blatt gemessen wird, können reflexionsbasierte Verfahren auch aus größerer Entfernung eingesetzt werden. Dadurch werden bei Reflexionsmessungen nicht nur Einzelblätter, sondern die Eigenschaften von verschiedenen Pflanzenteilen erfasst. Zusätzlich wirken sich dabei auch die spezifischen Eigenschaften des Bodens auf das Messergebnis aus. Reflexionsbasierte Sensoren können in aktive Systeme mit Lichtquelle und passive Systeme, die ausschließlich reflektiertes Sonnenlicht erfassen, unterteilt werden (Muñoz-Huerta et al., 2013). Hierzu können passive Spektrometer-Messsysteme wie das von Li et al. (2008) beschriebene FieldSpec mit hyperspektraler Auflösung im Bereich von 325-1075 nm eingesetzt werden. Auf Grundlage der ermittelten Reflexionssignatur in spezifischen Bereichen des Wellenlängenspektrums können Aussagen zu verschiedenen Pflanzenparametern wie dem Chlorophyllgehalt, dem N-Gehalt, der Biomasse, der N-Aufnahme sowie der Blattfläche getroffen werden (Muñoz-Huerta et al., 2013; Padilla et al., 2018). Um die Parameter mit hoher Genauigkeit zu erfassen, werden auf Basis der Reflexionswerte verschiedener Wellenlängen aus dem grünen (G), roten (R) und nahinfraroten (NIR) Bereich Vegetationsindices berechnet (Bannari et al., 1995; Scotford und Miller, 2005). Nachfolgend wird auf drei häufig genutzte Vegetationsindices eingegangen, welche auch im Rahmen dieser Arbeit Anwendung finden.

Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) nach Rouse et al. (1974) kombiniert Wellenlängen aus dem nahinfraroten (NIR) und roten (R) Wellenlängenbereich.

$$\text{NDVI} = (R_{\text{NIR}} - R_{\text{R}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{R}})$$

Grundsätzlich können über den NDVI die Blattfläche sowie Biomasseentwicklung abgebildet werden, jedoch tritt mit steigendem Biomasseaufwuchs ein Sättigungseffekt ein und die Sensitivität des Index sinkt (Scotford und Miller, 2004a; 2004b). Des Weiteren reagiert der Index auch auf eine differenzierte N-Düngung (Behrens et al., 2004) und bildet die N-Aufnahme, den N-Gehalt und den Chlorophyllgehalt ab (Li et al., 2008; Schlemmer et al., 2013).

Der Vegetationsindex Infrared Green (IRG), entwickelt von Takebe et al. (1990), wird als Quotient auf Basis einer Wellenlänge aus dem nahinfraroten (780 nm) und dem grünen Spektrum (550 nm) berechnet.

$$\text{IRG} = R_{780} / R_{550}$$

Der IRG eignet sich zur Abbildung des Chlorophyll- und N-Gehalts sowie des Biomasseaufwuchses und der N-Aufnahme. Dabei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass der Einsatz in den Morgen- oder Abendstunden zu starken Schwankungen der Reflexionswerte führen kann (Schächtl, 2004; Takebe et al., 1990).

Der Index Red Edge Inflection Point (REIP) wird auch als auch Hauptwendepunkt (HWP) bezeichnet und beschreibt die Stelle der maximalen Steigung der Lichtreflexion beim Übergang vom roten ins nahinfrarote Spektrum (Spicker, 2017).

$$\text{REIP} = R_{700} + 40 * [(0,5 * (R_{670} + R_{780}) - R_{700}) / (R_{740} - R_{700})]$$

Auch dieser Index eignet sich zur Abbildung des Chlorophyll- und N-Gehalts sowie des Biomasseaufwuchses und der N-Aufnahme (Behrens et al., 2006; Schlemmer et al., 2013; Spicker, 2017).

### 3 Fragestellung und Zielsetzung

Mit dem übergeordneten Ziel einer bedarfsgerechten Stickstoffernährung der Hopfenpflanze wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob Stickstoff-Düngesysteme, bei welchen ein Anteil der insgesamt auszubringenden N-Menge über das Bewässerungswasser appliziert wird, zu einer Optimierung der N-Düngung des Hopfens beitragen können. Diese Fragestellung erfordert einerseits grundlegende Untersuchungen zur Stickstoffernährung der Hopfenpflanze und andererseits eine gezielte Analyse der Auswirkungen von Bewässerung und Fertigation. Aufgrund dieser unterschiedlichen Teilaspekte werden verschiedene Fragen formuliert.

Im Kapitel Stand des Wissens wurde dargestellt, dass seit Anfang der 1990er-Jahre weder national noch international Untersuchungen zur Stickstoffernährung der Hopfenpflanze durchgeführt wurden. Für aktuelle Hopfensorten und Anbausysteme ist nicht bekannt welche Effekte sich durch eine differenzierte Stickstoffdüngung ergeben. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit zunächst analysiert, welche Auswirkungen ein in Zeit und Höhe variiertes N-Angebot hat. Dabei ist aufgrund der perennierenden Eigenschaften einer Hopfenpflanze neben einer einjährigen Betrachtungsweise auch eine mehrjährige Untersuchung folgender Parameter erforderlich:

- Habitus, Biomassebildung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf
- Ertragsaufbau, Ertragsbildung, Alphasäuregehalt und Gesamtbiomassebildung
- Stickstoffaufnahme, apparente Stickstoffausnutzung und Stickstoffeffizienz
- Stickstoffeinlagerung und Wiederaustrieb im Frühjahr

Um die Auswirkungen einer Stickstoffernährung über das Bewässerungswasser zu analysieren, sollen unterschiedliche N-Düngesysteme mit Fertigation geprüft werden. Das Ziel ist, auf Basis eines Systemvergleichs der derzeitigen Düngepraxis mit ausschließlich granulierter N-Ausbringung und Düngesystemen mit Fertigation, Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Dabei stellt sich auch die Frage, mit welcher Geschwindigkeit über Fertigation applizierter Stickstoff von den Pflanzen aufgenommen wird.

Hinsichtlich des Einflusses der Wasserversorgung ist bekannt, dass Hopfen auf Trockenperioden mit Ertrags- und Qualitätseinbußen reagiert, diese durch zusätzliche Bewässerung jedoch kompensiert werden können. Dabei ist zu differenzieren zwischen Effekten durch die Wasserversorgung an sich und durch eine verbesserte Nährstoffversorgung

aufgrund der Zusatzbewässerung. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, welche Effekte sich durch eine zusätzliche Bewässerung der Hopfenpflanze im Hinblick auf die Stickstoffernährung ergeben. Des Weiteren erfolgt ein Vergleich der ober- und unterirdischen Tropfschlauchpositionierung unter Berücksichtigung des Einflusses von granulierter N-Düngung sowie Düngesystemen mit Fertigation.

Durch die Anpassung der Stickstoffdüngung an den tatsächlichen Bedarf der Pflanze im Verlauf der Vegetationsperiode soll eine Optimierung agronomischer Kennzahlen bei gleichzeitiger Minimierung negativer umweltökologischer Effekte erreicht werden. Hierfür sind Kenntnisse über den aktuellen N-Versorgungszustand der Pflanze erforderlich. Für Hopfen existieren keine Verfahren zur nicht-invasiven Erfassung der N-Versorgung. Deshalb wird im Rahmen der Untersuchungen weiterhin geprüft, ob eine Messung des Chlorophyllwertes mit einem SPAD-Meter oder die Erfassung der Reflexionssignatur mit einem passiven Spektrometer und die Ableitung von Vegetationsindices Aussagen zum Stickstoffernährungszustand der Hopfenpflanze liefern können.

## 4 Material und Methoden

Die im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Vorgehensweisen und Untersuchungsmethoden mussten vor deren Anwendung zunächst entwickelt und validiert werden, da für Hopfen für viele der Fragestellungen bisher keine standardisierte Methodik existierte.

### 4.1 Durchgeführte Feldversuche – Überblick

Um experimentelle Daten für die Untersuchung der Forschungsfragen zu gewinnen, wurden im Zeitraum von 2017 bis 2019 im Hopfenanbaugebiet Hallertau Feldversuche durchgeführt. Aufgrund unterschiedlicher Fragestellungen wurden verschiedene Versuchsansätze verfolgt und Versuchsserien gebildet (Tab. 4.1) und somit die Möglichkeit geschaffen, Teilaspekte gezielter zu betrachten. Dieses Vorgehen ermöglichte außerdem den Einfluss von Störfaktoren im Feld, vor allem Bodenunterschiede, aufgrund reduzierter Versuchsgrößen, zu minimieren. Jede Versuchsserie setzte sich aus mehreren Einzelversuchen zusammen, welche an unterschiedlichen Standorten und Sorten durchgeführt wurden. Die Versuchsserie 1 bestand jährlich aus zwei Feldversuchen und diente der Untersuchung der Auswirkungen eines zeitlich und mengenmäßig variierten Stickstoffangebots, wobei auch die Biomasseentwicklung sowie der N-Aufnahmeverlauf untersucht wurden. Im Rahmen der Versuchsserie 2 wurden jährlich an zwei Standorten und zwei Sorten unterschiedliche N-Düngesysteme mit Fertigation getestet. Der Versuchsansatz 3 diente zur Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen.

*Tab. 4.1: Anzahl und Schwerpunkt der im Versuchszeitraum im Rahmen der unterschiedlichen Versuchsansätze/-serien durchgeführten Feldversuche.*

	2017	2018	2019	Schwerpunkt
Versuchsansatz/-serie 1	2	2	2	Zeitpunkt und Höhe der N-Düngung
Versuchsansatz/-serie 2	4	4	4	N-Düngesysteme mit Fertigation
Versuchsansatz/-serie 3	1	1	1	Wasser- und N-Applikationsformen

Die Sorte hat bei Hopfen einen starken Einfluss auf den Habitus der Pflanze sowie das grundsätzliche Ertragsniveau (vgl. 2.3.1). Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb

ausschließlich die im Anbau bedeutendsten Aromasorten Perle (PE) und Tradition (HT) sowie die Hochalphasorte Herkules (HS) für Untersuchungen verwendet.

Die Feldversuche des Versuchsansatzes 1 wurden im Jahr 2017 mit den Sorten Perle und Herkules durchgeführt (Tab. 4.2). Da eine Versuchsfortführung jedoch an keinem der Standorte möglich war, erfolgte im darauffolgenden Jahr (2018) eine Neuanlage der Feldversuche. Eine geeignete Fläche mit der Sorte Perle war nicht vorhanden, weshalb ab 2018 neben Herkules die Aromasorte Tradition verwendet wurde. Im dritten Versuchsjahr 2019 erfolgte eine Fortführung auf den Standorten des Vorjahres (2018). Die Versuchsserie 2 diente der Analyse unterschiedlicher N-Düngesysteme mit Fertigation. Dabei wurden die Sorten Perle und Herkules je an einem sandigen und lehmigen Standort verwendet. Diese Feldversuche wurden im ersten Jahr (2017) angelegt und über drei Jahre fortgeführt, wobei jährlich eine Anpassung einzelner Düngevarianten erfolgte. Im Rahmen des Versuchsansatzes 3 wurde der Einfluss von Bewässerung sowie unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen untersucht. Da Sorten aus der Gruppe der Hochalphasorten grundsätzlich eine höhere Trockenheitstoleranz aufweisen (vgl. 2.3.3), erfolgten diese Untersuchungen ausschließlich an der Aromasorte Perle.

Tab. 4.2: Überblick zu durchgeführten Feldversuchen.

Versuchsansatz/-serie	Standort	Sorte	Jahr	Abkürzung
V 1	-	PE	2017	V1_PE_17
		HS		V1_HS_17
		HT	2018/2019	V1_HT_18 /19
		HS		V1_HS_18 /19
V 2	Sand (S)	PE	2017/2018/2019	V2_S_PE_17 /18 /19
		HS		V2_S_HS_17 /18 /19
	Lehm (L)	PE		V2_L_PE_17 /18 /19
		HS		V2_L_HS_17 /18 /19
V 3	-	PE	2017/2018/2019	V3_PE_17 /18 /19

## 4.2 Standortauswahl und Standortbeschreibung

Die Anlage und Durchführung der Feldversuche erfolgten aufgrund der mehrjährigen Etablierungsphase einer Hopfenpflanze sowie der begrenzten Verfügbarkeit von bereits mit Hopfen bepflanzten Versuchsflächen an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft ausschließlich in Praxishopfungärten. Bei der Standortauswahl stand, wie bereits erläutert, zunächst die Sorte im Vordergrund. Des Weiteren war die geografische Lage von Bedeutung, da für die Ernte von größeren Feldversuchen bei Hopfen spezielle technische Vorrichtungen benötigt werden, die in der Hallertau nur am Hopfenforschungsinstitut in Hüll bei Wolnzach vorhanden sind. Um die Eignung potentieller Flächen zu prüfen, wurden auch Luftbilder zur Einschätzung der Homogenität eines Schlages auf Basis des Pflanzenbestandes genutzt. Dabei ist anzumerken, dass laut standortkundlicher Landschaftsgliederung große Teile des Hopfenanbaugebiets Hallertau in den sandigen sowie lößlehmreichen Bereichen des Tertiärhügellandes liegen (LfU, 2020), woraus stark wechselnde Bodenverhältnisse resultieren. Die geografische Lage der einzelnen Versuchsstandorte kann der Abb. 4.1 entnommen werden.

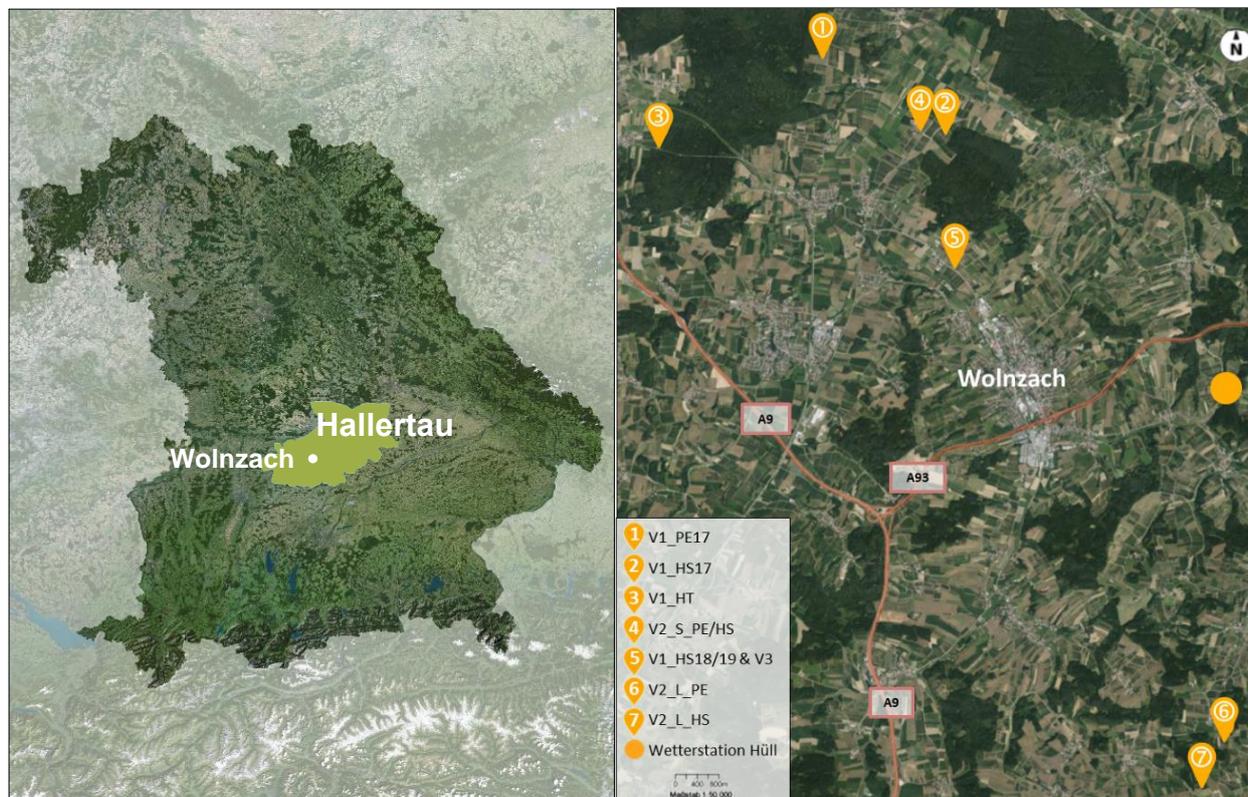


Abb. 4.1: Geografische Lage der Versuchsstandorte und des Hopfenforschungsinstituts Hüll (eigene Darstellung nach LDBV, 2020).

Eine grundsätzliche Charakterisierung der Versuchsstandorte kann auf Basis von Bodenschätzungsdaten sowie analysierten bodenchemischen Kennwerten erfolgen (Tab. 4.3). Die Bezeichnung der Standorte „Sand“ (S) und „Lehm“ (L) des Versuchsansatzes 2 kann mit der jeweils vorherrschenden Bodenart lehmiger Sand (IS) bzw. Lehm (L) begründet werden. Weiterhin sind die höheren  $N_t$ -Gehalte am lehmigeren Standort zu beachten, welche auf die langjährig erfolgte organische Düngung zurückzuführen sind. Langjährige organische Düngung erfolgte auch am Standort von V1\_PE\_17. Am Versuchsstandort V3\_PE ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund des Verlaufs der Pflanzreihen in Richtung des Gefälles eine deutlich sichtbare Kolluviumbildung an der Hangunterseite bzw. Bodenerosion an der Hangoberseite vorlagen. Aufgrund der langjährigen Erosion weist der Boden an der Hangoberseite einen deutlich höheren Sand- und Kiesanteil auf.

Tab. 4.3: Charakterisierung der Versuchsstandorte: Bodenschätzungsdaten (LfU, 2020) und bodenchemische Kennwerte (eigene Analysen).

	V1_PE_17	V1_HS_17	V1_HT_18/19	V1_HS_18/19	V2_S_PE	V2_S_HS	V2_L_PE	V2_L_HS	V3_PE
Bodenart	SI	IS	SI	IS	IS	IS	L	L	IS
Zustandsstufe	3	2	3	2-3	4	3	4	4	2-3
Entstehungsart	D	D	D	D	D	D	D	D	D
Bodenzahl	31-37	53	36	50-56	42	47	60	63	50-52
Ackerzahl	31-34	53	31-35	50-56	41	47	55	57	50-52
pH	6,1	4,5	6,2	5,7	5,3	5,8	5,7	6,1	5,7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [mg 100g <sup>-1</sup> ] <sup>1)</sup>	29	32	15	14	23	21	16	35	19
K <sub>2</sub> O [mg 100g <sup>-1</sup> ] <sup>1)</sup>	33	12	23	11	19	19	21	28	14
MgO [mg 100g <sup>-1</sup> ] <sup>2)</sup>	9	3	11	5	11	8	14	10	4
C <sub>org</sub> [%]	1,81	1,44	0,97	0,66	1,34	1,23	1,48	1,39	0,99
N <sub>t</sub> [%]	0,17	0,13	0,09	0,07	0,11	0,10	0,17	0,15	0,08

1) CAL-Extrakt; 2) CaCl<sub>2</sub>-

### 4.3 Witterung im Untersuchungszeitraum

Der für die Versuchsergebnisse relevante Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum 2017 bis 2019 wird auf Basis der an der Wetterstation am Hopfenforschungsinstitut in Hüll (Abb. 4.1) erhobenen Daten beschrieben (Tab. 4.4, Tab. 4.5). Im Versuchsjahr 2017 herrschte im Zeitraum von Mitte Juni bis Ende Juli, während der Hauptwachstumsphase des Hopfens, ein Niederschlagsdefizit. Ab Ende Juli nahm die Niederschlagshäufigkeit zu, der Monat August wies eine ausgeglichene Wasserbilanz auf. Das zweite Versuchsjahr 2018 war in den Monaten Juni und Juli geprägt durch einzelne Starkniederschlagsereignisse mit regional sehr unterschiedlichen Niederschlagsmengen. Ab Ende Juli führten hohe Temperaturen und ausbleibende Niederschläge zu einer stark ausgeprägten Trockenheit. Im dritten Versuchsjahr 2019 fielen vor allem im Juli kaum Niederschläge, wohingegen der Monat August eine deutlich gleichmäßigere Niederschlagsverteilung aufwies.

Tab. 4.4: Monatliche Durchschnittstemperatur, Niederschlagsmenge und klimatische Wasserbilanz im Zeitraum von 2017 bis 2019, gemessen an der Wetterstation in Hüll (LfL, 2020a).

	Temperatur [°C]			Niederschlag [mm]			Wasserbilanz [mm]		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	2017	2018	2019
Januar	-5,7	3,6	-0,4	36	85	89	28	72	80
Februar	2,4	-2,8	1,6	33	28	40	16	16	22
März	6,9	2,6	6,3	38	46	42	-6	13	-6
April	7,5	12,9	10,2	100	6	20	42	-80	-64
Mai	14,2	16,5	11,0	87	95	126	-20	-20	49
Juni	<b>18,7</b>	<b>17,9</b>	<b>19,8</b>	<b>59</b>	<b>139</b>	<b>70</b>	<b>-69</b>	<b>24</b>	<b>-66</b>
Juli	<b>18,8</b>	<b>19,2</b>	<b>19,3</b>	<b>78</b>	<b>67</b>	<b>37</b>	<b>-32</b>	<b>-57</b>	<b>-81</b>
August	<b>18,6</b>	<b>19,7</b>	<b>18,7</b>	<b>97</b>	<b>87</b>	<b>99</b>	<b>1</b>	<b>-22</b>	<b>6</b>
September	11,8	15,0	13,7	70	53	36	24	-10	-20
Oktober	9,8	10,2	10,2	69	44	54	39	9	29
November	4,0	4,3	4,9	53	23	39	41	12	29
Dezember	1,4	2,8	2,4	67	95	40	57	88	34
Ø bzw. Σ	9,0	10,2	9,8	785	767	692	120	44	15

Tab. 4.5: Tägliche Niederschlagssumme in den Monaten Juni, Juli und August im Zeitraum von 2017 bis 2019, gemessen an der Wetterstation in Hüll (LfL, 2020a).

Tag	2017 [mm d <sup>-1</sup> ]			2018 [mm d <sup>-1</sup> ]			2019 [mm d <sup>-1</sup> ]		
	Juni	Juli	August	Juni	Juli	August	Juni	Juli	August
1	0	0	2	0	0	0	0	3	0
2	0	4	2	0	0	0	0	3	4
3	0	0	0	0	0	0	1	0	12
4	5	0	4	0	2	0	0	0	0
5	1	0	0	0	1	0	0	0	0
6	14	0	0	1	38	0	0	0	0
7	2	1	0	31	0	0	0	2	5
8	0	0	9	0	0	0	0	1	0
9	12	3	5	0	0	0	0	0	0
10	3	0	8	0	2	7	1	0	12
11	0	3	7	11	0	0	3	5	7
12	0	3	0	58	0	0	0	1	12
13	0	0	1	9	0	6	0	6	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	3	6	0	0	0	0	0	0	2
16	0	0	32	0	1	0	16	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	17	0	0	0	0	0	0
19	0	0	1	0	0	0	0	0	15
20	0	0	0	0	0	0	11	0	27
21	0	0	0	0	4	0	0	3	1
22	1	0	0	0	21	0	38	0	0
23	0	3	0	0	0	0	1	0	0
24	0	2	0	0	0	9	0	0	0
25	0	6	0	1	0	3	0	0	0
26	0	36	0	0	0	0	0	0	0
27	5	2	1	0	0	0	0	0	0
28	0	3	0	23	0	0	0	7	0
29	10	0	0	4	0	57	0	6	1
30	2	4	0	0	0	0	0	0	0
31		2	9		0	6		0	0
<b>Σ</b>	<b>59</b>	<b>78</b>	<b>97</b>	<b>139</b>	<b>67</b>	<b>87</b>	<b>70</b>	<b>37</b>	<b>99</b>

## 4.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

### 4.4.1 Allgemeiner Versuchsablauf

Die Bewirtschaftung der Praxishopfungärten mit den Versuchsflächen erfolgte grundsätzlich praxisüblich, angepasst an die Bedingungen des jeweiligen Jahres. Während der Anlage der Feldversuche wurden zunächst die benötigten Versuchsflächen innerhalb der Praxishopfungärten markiert und Bodenproben für die Standard-Bodenuntersuchung sowie N<sub>min</sub>-Untersuchung entnommen. Aufbauend darauf folgte die Ermittlung des Düngedarfs. Die Nährstoffe Phosphat, Kali und Magnesium wurden je Standort und Jahr einheitlich über die gesamte Versuchsfläche gedüngt. An den Standorten der Versuchsserie 2 sowie des Versuchsansatzes 3 folgte ab Mai 2017 der Aufbau der Bewässerungsanlagen und Vorrichtungen zur Fertigation. Diese wurden speziell für die Durchführung der Versuche geplant und konzipiert, um eine exakte Dosierung des Düngers zum Bewässerungswasser sowie eine gleichmäßige Verteilung im Feld zu garantieren. Während der Vegetation wurden je nach Versuchsansatz unterschiedliche Messungen und Untersuchungen durchgeführt. Diese werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels detailliert erläutert. Ende August, kurz vor Erreichen der Erntereife, erfolgte die Kennzeichnung der Ernteparzellen. Der Ablauf der Versuchsernte wird ebenfalls im weiteren Verlauf genauer beschrieben. Nach der Ernte erfolgte im Herbst eine weitere Bodenbeprobung zur Untersuchung des N<sub>min</sub>-Gehalts.

### 4.4.2 Versuchsvarianten und N-Düngung

#### 4.4.2.1 Versuchsansatz 1

Der Versuchsansatz 1 diente der Untersuchung von Auswirkungen eines in Zeit und Höhe variierten N-Angebots. Dabei bestand jeder Einzelversuch jährlich aus sechs Varianten, wovon fünf zur Applikation unterschiedlicher N-Mengen zu verschiedenen Zeitpunkten genutzt wurden (Tab. 4.6). Als Referenz diente eine Kontrollvariante ohne N-Düngung (N1). Die Ausbringung des Stickstoffs erfolgte in Form von granuliertem Ammoniumnitrat (Kalkammonsalpeter KAS) mittels eines Düngerstreugeräts mit Reihenstreuvorrichtung. Dabei fand die Ablage der Düngerkörner technisch bedingt auf einem etwa ein Meter breiten Band statt. Aufgrund der Bedeutung des Düngemittels Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL bzw. UAN) für das sogenannte chemische Hopfenputzen wurde im ersten Versuchsjahr (2017) auch der Einsatz dieser Düngerform zum Zeitpunkt der zweiten N-Gabe (N3a) getestet. Die insgesamt auszubringende N-Menge wird bei Hopfen

üblicherweise auf drei gleiche Gaben verteilt, wobei sich in der Praxis die Zeitpunkte Mitte bis Ende April (I.), Ende Mai bis Anfang Juni (II.) sowie Ende Juni bis Anfang Juli (III.) etabliert haben (vgl. 2.3.2). Auch in den Düngeversuchen des Versuchsansatzes 1 erfolgte die Applikation der Einzelgaben innerhalb dieser Zeiträume. Bei Variante N6 wurde jeweils der gesamte ermittelte N-Düngebedarf, verteilt auf drei Gaben in gleicher Höhe, appliziert. N5 wurde genutzt, um die N-Düngung um 1/3 zu reduzieren, die Ausbringung der verbleibenden 2/3 erfolgte dabei zum Zeitpunkt der ersten zwei Termine. In den Varianten N2, N3 und N4 wurde jeweils nur 1/3 der ermittelten Gesamt-N-Menge zum Zeitpunkt der ersten, zweiten oder dritten N-Gabe gedüngt.

Tab. 4.6: Versuchsvarianten und N-Düngemengen in den Feldversuchen des Versuchsansatzes 1 im Zeitraum von 2017 bis 2019 (I. bis III. Zeitpunkte der N-Gaben – April, Mai, Juli).

V1_PE_17					V1_HS_17				
Variante	Stickstoffgaben [kg N ha <sup>-1</sup> ]				Variante	Stickstoffgaben [kg N ha <sup>-1</sup> ]			
	I.	II.	III.	Summe		I.	II.	III.	Summe
N1	0	0	0	0	N1	0	0	0	0
N2	57	0	0	57	N2	63	0	0	63
N3	0	57	0	57	N3	0	63	0	63
N3a	0	57*	0	57*	N3a	0	63*	0	63*
N5	57	57	0	114	N5	63	63	0	126
N6	57	57	57	170	N6	63	63	63	190

V1_HT_18/19					V1_HS_18/19				
Variante	Stickstoffgaben [kg N ha <sup>-1</sup> ]				Variante	Stickstoffgaben [kg N ha <sup>-1</sup> ]			
	I.	II.	III.	Summe		I.	II.	III.	Summe
N1	0	0	0	0	N1	0	0	0	0
N2	50	0	0	50	N2	60	0	0	60
N3	0	50	0	50	N3	0	60	0	60
N4	0	0	50	50	N4	0	0	60	60
N5	50	50	0	100	N5	60	60	0	120
N6	50	50	50	150	N6	60	60	60	180

\* Ausbringung in Form von AHL

#### 4.4.2.2 Versuchsansatz 2

Im Rahmen des Versuchsansatzes 2 erfolgte an zwei Sorten und zwei Standorten die Untersuchung unterschiedlicher N-Düngesysteme mit Fertigation. Dabei wurde ein Teil

der gesamt auszubringenden N-Menge über ein oberirdisches Tropfbewässerungssystem appliziert. Die auszubringende Gesamt-N-Menge (Tab. 4.7) wurde unter Berücksichtigung der N-Düngung im Vorjahr, des Nmin-Wertes sowie der Vorjahresergebnisse für jeden Versuch jährlich neu festgelegt.

Tab. 4.7: Ausgebrachte Gesamt-N-Mengen in den Einzelversuchen des Versuchsansatzes 2 im Zeitraum von 2017 bis 2019.

<b>Versuch</b>	<b>2017</b> [kg N ha <sup>-1</sup> ]	<b>2018</b> [kg N ha <sup>-1</sup> ]	<b>2019</b> [kg N ha <sup>-1</sup> ]
V2_S_PE	150	150	100
V2_L_PE	100	100	100
V2_S_HS	180	180	120
V2_L_HS	100	100	120/180 <sup>1)</sup>

1) N-Menge 180 kg ha<sup>-1</sup> ausschließlich bei Variante F6x

Das Auslegen von oberirdischen Tropfschläuchen ist bei Hopfen erst nach dem Formen der Dämme (Bifänge) möglich (vgl. 2.3.3), weshalb Stickstoff in frühen Entwicklungsstadien nicht über ein oberirdisches Bewässerungssystem ausgebracht werden kann. Folglich war es im Rahmen der Feldversuche nicht möglich die auszubringende N-Menge vollständig über Fertigation zu applizieren. Jeder Einzelversuch bestand jährlich aus sechs Varianten, wovon vier genutzt wurden, um verschiedene Systeme mit Fertigation zu testen. Als Referenz dienten eine nicht mit Stickstoff gedüngte Kontrolle (F1) sowie eine Variante bei welcher die gesamte N-Menge in granulierter Form (KAS), verteilt auf drei gleiche Gaben, gedüngt wurde (F2). Die Ausbringung des über Fertigation applizierten Stickstoffs erfolgte hingegen grundsätzlich als AHL bzw. UAN. Hierbei ist anzumerken, dass bei einem gezielten Vergleich von Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung und Ammoniumnitrat über Fertigation keine Unterschiede in Abhängigkeit der Stickstoffform ermittelt wurden. Alle Versuchsvarianten der Serie 2 wurden oberirdisch bewässert. Dabei unterschieden sich Bewässerungszeitpunkt und ausgebrachte Wassermenge der einzelnen Varianten eines Standortes nicht. Auf Basis der Erkenntnisse eines Versuchsjahres wurde die Verteilung des Stickstoffs bei Varianten mit Fertigation im Folgejahr jeweils angepasst.

Im ersten Versuchsjahr 2017 (Tab. 4.8) wurden in den Varianten F3 und F4 jeweils 2/3 der Gesamt-N-Menge verteilt auf zwei gleiche Gaben zu den Zeitpunkten Ende April und Ende Mai in granulierter Form ausgebracht. Die verbleibende N-Menge (1/3) wurde über Fertigation appliziert. Der Unterschied zwischen F3 und F4 bestand im Ausbringzeitraum

sowie der Höhe der Einzelgaben. Bei F3 wurde der Stickstoff über einen Zeitraum von 10 Wochen und 10 Einzelgaben bei der Sorte Perle bzw. 11 Wochen und 11 Einzelgaben bei der Sorte Herkules appliziert. Die Höhe der wöchentlich ausgebrachten N-Gabe war dabei konstant. Bei F4 hingegen wurde dieselbe Menge an Stickstoff auf 6 Gaben verteilt und über einen Zeitraum von 6 Wochen appliziert. Zusätzlich variierte die Höhe der wöchentlich ausgebrachten Einzelgaben. Ziel der N-Verteilung bei F4 war es, einen Großteil des über Fertigation applizierten Stickstoffs zum Zeitpunkt des Hauptwachstums zu konzentrieren. Hintergrund der Verteilung des Stickstoffs auf einen längeren Zeitraum war die Frage, ob die Applikation in späteren Entwicklungsstadien Auswirkungen auf die äußere Qualität oder Einlagerung von N-Verbindungen in den Wurzelstock haben kann. Die Varianten F5 und F6 folgten demselben Prinzip, allerdings wurde auf die Ausbringung einer zweiten granulierten N-Gabe verzichtet, wodurch insgesamt 2/3 des gesamten Stickstoffs über Fertigation appliziert werden konnten. Dies ermöglichte die Konzentration eines höheren Anteils der Gesamt-N-Menge auf die Hauptwachstumsphase bzw. auf die Hauptwachstumsphase sowie Doldenausbildung.

Tab. 4.8: Stickstoffverteilung der Varianten des Versuchsansatzes 2 im Jahr 2017; Fertigungsvarianten (F3 - F6): Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe.

KW <sup>1)</sup>	April	Mai		Juni				Juli				August				
	17	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
	[% der auszubringenden Gesamt-N-Menge]															
F1																
F2	33	33					33									
F3	33	33		3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	
F4	33	33		2,8	5,6	8,3	8,3	5,6	2,8							
F5	33			6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7		
F6	33			5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6							
F3*				3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0		
F5*				6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1		

\* Sorte Herkules: Bei F3 und F5 Ausbringung von 11 Einzelgaben; 1) Kalenderwoche.

Auf Basis der im Jahr 2017 gewonnenen Erkenntnisse erfolgte im zweiten Versuchsjahr 2018 die Anpassung einzelner Varianten (Tab. 4.9). Dabei wurden, aufgrund positiver Ergebnisse im Vorjahr (2017) bei Konzentration einer höheren N-Menge auf die Hauptwachstumsphase, die Varianten F3 und F4 durch F6a und F6b ersetzt. In allen Varianten mit Fertigation erfolgte die Ausbringung von 1/3 der Gesamt-N-Menge Ende April in

granulierter Form. Anschließend wurden bei F6b 2/3 der gesamten N-Menge, analog zu F6, auf 6 Gaben verteilt, wobei das Zeitfenster der Applikation um 2 Wochen früher begann. Des Weiteren erfolgte im zweiten Jahr 2018 in allen Varianten die Erfassung der Chlorophyllwerte an Blättern des Haupttriebs im unteren Pflanzenabschnitt. Bei F6a wurde Stickstoff über Fertigation erst ab Feststellung geringerer Messwerte im Vergleich zu F6b ausgebracht, um zu untersuchen, ob eine Veränderung der Chlorophyllwerte messbar ist. Als Entscheidungsmaß wurde ein Unterschied von größer als 1,0 SPAD-Punkte definiert. Auf Grundlage der erfassten Chlorophyllwerte wurde bei Herkules an beiden Standorten ab KW26 begonnen. Am lehmigeren Standort der Sorte Perle fand die Ausbringung ab KW27 statt. Die ab diesen Zeitpunkten ausgebrachte N-Menge entsprach der Variante F6 des jeweiligen Feldversuches. Am sandigeren Standort wurden zwar in KW27 ebenfalls geringere Messwerte erfasst, jedoch war die Entwicklung des Pflanzenbestands bereits weit fortgeschritten, sodass ein zweites Kriterium, nach welchem nach Abschluss des vegetativen Wachstums der Seitentriebe keine Ausbringung mehr erfolgen sollte, Anwendung fand.

Tab. 4.9: Stickstoffverteilung der Varianten des Versuchsansatzes 2 - 2018; Varianten mit Fertigation (F5 - F6b): Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einzelmengabe.

KW	April	Mai		Juni			Juli				August				
	17	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
	[% der auszubringenden Gesamt-N-Menge]														
F1															
F2	33	33				33									
F6a <sup>1)</sup>	33					11,1	16,7	16,7	11,1	5,6					
F6a <sup>2)</sup>	33						16,7	16,7	11,1	5,6					
F6a <sup>3)</sup>	33														
F6b	33		5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6							
F5	33				6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	
F6	33				5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6					
F5*					6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1

1) F6a Sorte Herkules beide Standorte; 2) F6a Sorte Perle lehmiger Standort; 3) F6a Sorte Perle sandiger Standort; F5\*: 11 Einzelmengaben bei Sorte Herkules.

Aufgrund der Ergebnisse aus den vorangegangenen Jahren (2017, 2018) stand im dritten Versuchsjahr 2019 der Zeitpunkt der N-Ausbringung über Fertigation im Vordergrund. Dafür wurden die Versuchsvarianten F5 und F6a durch F6c und F6d ersetzt (Tab. 4.10). In jeder Variante mit Fertigation (F6 bis F6d) wurden 2/3 der gesamten N-Menge verteilt auf einen Zeitraum von 6 Wochen über das Bewässerungswasser appliziert. Der

Unterschied zwischen den Varianten bestand im Beginn des 6-wöchigen Applikationszeitraums, dieser reichte von KW23 bis KW26.

Tab. 4.10: Stickstoffverteilung der Varianten des Versuchsansatzes 2 im Jahr 2019; Fertigungsvarianten (F6 - F6x): Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe.

KW	April	Mai	Juni				Juli				August				
	17	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
	[% der auszubringenden Gesamt-N-Menge]														
F1															
F2	33	33					33								
F6c	33			5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6						
F6b	33		5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6							
F6d	33					5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6				
F6	33				5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6					
F6x*	33				5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6					

\* Variante F6x mit Erhöhung der N-Düngung auf 180 kg N ha<sup>-1</sup> nur bei Herkules am lehmigeren Standort.

#### 4.4.2.3 Versuchsansatz 3

Der Versuchsansatz 3 diente zur Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen. Dabei wurden drei Bewässerungs- und drei Düngungsstufen unterschieden (Tab. 4.11). Unter den Stufen der Bewässerung wurden die in der Praxis bedeutendsten Formen verglichen: oberirdische Tropfschlauchverlegung auf dem Damm (Bifang) und unterirdische Verlegung neben dem Bifang. Als Referenz dienten nicht bewässerte Pflanzen. Unter den Stufen der N-Düngung wurden die vollständige Ausbringung der Gesamt-N-Menge in granulierter Form und die Kombination von granulierter Düngung mit Fertigation untersucht. Dabei dienten nicht mit Stickstoff gedüngte Pflanzen als Referenz.

Tab. 4.11: Überblick zu den im Rahmen des Versuchsansatzes 3 geprüften Varianten.

Variante	Bewässerung	N-Düngung
B1	Keine	Keine
B2		3/3 Granuliert
B3	Oberirdisch - „Auf Bifang“ (AB)	Keine
B4		3/3 Granuliert
B5		1/3 Granuliert + 2/3 Fertigation
B6	Unterirdisch - „Neben Bifang“ (NB)	Keine
B7		3/3 Granuliert
B8		1/3 Granuliert + 2/3 Fertigation

Bei ausschließlich granulierter N-Düngung erfolgte die Ausbringung der gesamten N-Menge verteilt auf drei Gaben in gleicher Höhe (Tab. 4.12). Bei dem kombinierten Düngesystem mit Fertigation wurde hingegen nur 1/3 des gesamten Stickstoffs in granulierter Form zum Zeitpunkt Ende April appliziert. Die restliche N-Menge (2/3) wurde über einen Zeitraum von 6 Wochen, verteilt auf 6 Gaben, appliziert, analog zum System von F6 des Versuchsansatzes 2. Dabei variierte die Höhe der wöchentlich ausgebrachten Einzelgaben. Die insgesamt ausgebrachte N-Menge lag im ersten Versuchsjahr 2017 bei 180 kg N ha<sup>-1</sup> und in den Folgejahren 2018 und 2019 jeweils bei 150 kg N ha<sup>-1</sup>.

Tab. 4.12: Stickstoffverteilung der Varianten des Versuchsansatzes 3 (2017 - 2019); Fertigungsvarianten (B5, B8): Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe.

KW	April		Mai					Juni				Juli				August
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
[% der auszubringenden Gesamt-N-Menge]																
B1, B3, B6																
B2, B4, B7		33					33						33			
B5, B8		33							5,6	11,1	16,7	16,7	11,1	5,6		

#### 4.4.3 Versuchsanlage

Bei der Anlage eines Feldversuchs in einem Hopfenfeld müssen spezifische Gegebenheiten wie der Reihenabstand, der Pflanzabstand, die Reihenanzahl, die Reihenlänge oder die Anordnung der Säulenreihen berücksichtigt werden. Im Anbaugesamt Hallertau beträgt der Reihenabstand in der Regel 3,2 Meter bei einem Pflanzabstand von 1,5 Meter, woraus eine Fläche von 4,8 m<sup>2</sup> je Einzelpflanze resultiert. Für eine repräsentative

Aussage einer einzelnen Parzelle sind laut Roßbauer (1985) mindestens 8 bis 10 Einzelpflanzen entsprechend 16 bis 20 Aufleitungen erforderlich. In jeder dritten Pflanzreihe befinden sich in der Regel Säulen aus Holz, Beton oder Metall welche das Stahlnetz tragen. Zwischen diesen liegen jeweils zwei Pflanzreihen ohne Säulen. Bei der Anlage der Feldversuche wurden Säulenreihen grundsätzlich ausgeschlossen, weil die Pflanzen dieser abweichend von den Pflanzreihen ohne Säulen reagieren können. Dies zeigten langjährige Erfahrungen am Hopfenforschungsinstitut in Hüll. Der Flächenbedarf für die Durchführung eines Versuchs mit mehreren Varianten und Wiederholungen steigt aus den genannten Gründen schnell an. Aufgrund der Lage der Hallertau im tertiären Hügelland mit stark wechselnden Bodenverhältnissen (vgl. 4.2) sind größere, einheitliche Versuchsflächen häufig ein limitierender Faktor. Somit war die Anzahl an durchführbaren Varianten je Versuch stark begrenzt. Weiterhin stellt die Anlage unterschiedlicher Versuchsvarianten innerhalb einer Pflanzreihe vor allem bei Düngungs- und Bewässerungsversuchen ein erhebliches Risiko für Versuchsfehler dar und sollte bei geringer Länge der Pflanzreihen vermieden werden.

Ziel bei der Anlage der Feldversuche war es, jede Variante 4-fach wiederholt mit 10 Pflanzen (20 Aufleitungen) je Parzelle und 40 Pflanzen (80 Aufleitungen) insgesamt zu ernten. Bei der Versuchsanlage wurden zunächst alle geplanten Varianten zufällig auf dieselbe Anzahl an Pflanzreihen (ohne Säulen) verteilt. Dieser Vorgang wurde ein zweites Mal wiederholt, wodurch insgesamt zwei in der Anordnung der Varianten vollständig randomisierte Blöcke, entsprechend zwei Wiederholungen, gebildet wurden. Anschließend wurde innerhalb jeder einzelnen Versuchsreihe eine zweite Messwiederholung angelegt, sodass insgesamt vier Wiederholungen je Variante geerntet werden konnten (Abb. 4.2). Diese Vorgehensweise wurde in allen durchgeführten Feldversuchen eingehalten, wobei jeweils eine separate Randomisierung stattfand. An den Standorten der Versuche V1\_HS\_18/19 und V3\_PE mit ausreichender Länge der Pflanzreihen wurden die getrennt voneinander randomisierten Blöcke hintereinander angelegt.

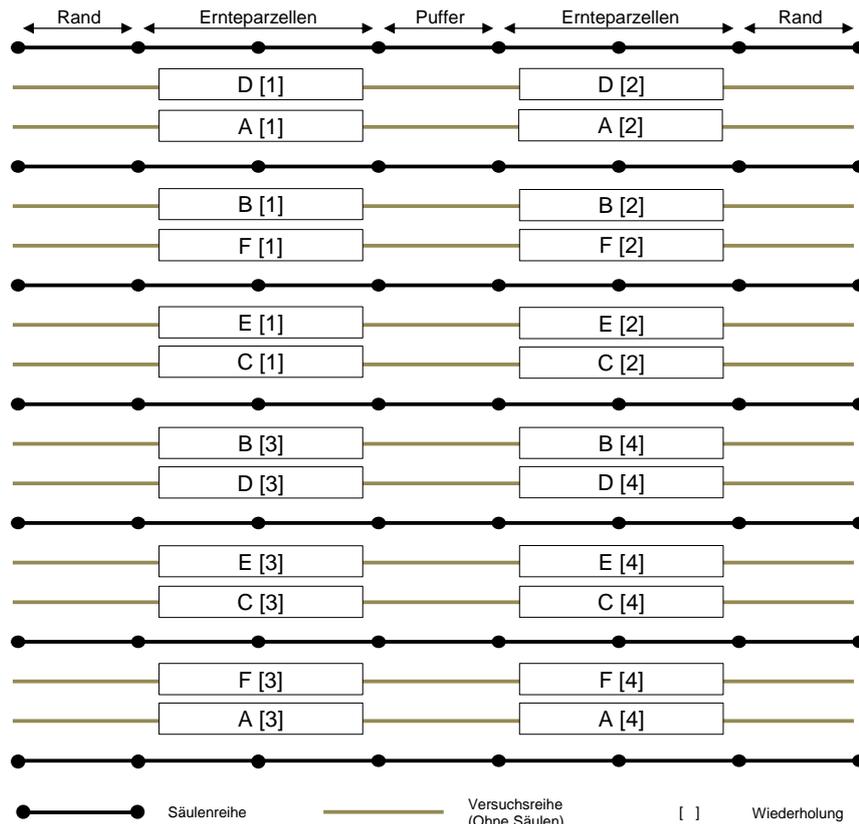


Abb. 4.2: Anlageschema eines Feldversuchs - sechs Varianten (A bis F) und vier Wiederholungen ([1] bis [4]) verteilt auf zwei vollständig randomisierte Blöcke mit jeweils einer Messwiederholung.

## 4.4.4 Bewässerungssysteme

### 4.4.4.1 Aufbau

Für die Durchführung der Feldversuche des Versuchsansatzes 2 und 3 war die Errichtung von Versuchsbewässerungsanlagen erforderlich (Abb. 4.3). Die Konzipierung und der Aufbau dieser Systeme erfolgten mit Beginn des ersten Versuchsjahres (2017). Bereits bei der Standortauswahl wurde die Nähe zu einer Wasserversorgung berücksichtigt. Das Wasser wurde entweder aus dem öffentlichen Trinkwassernetz bezogen oder aus vorhandenen Bewässerungsanlagen der Versuchsbetriebe entnommen.

In den Feldversuchen des Versuchsansatzes 2 wurden an jedem Standort vier verschiedene Varianten mit Fertigation sowie zwei ohne Düngerdosierung (F1, F2) untersucht (vgl. 4.4.2.2). Dabei sollten sich Bewässerungszeitpunkt und Wassermenge innerhalb eines Versuchs nicht unterscheiden, was den Aufbau getrennter Bewässerungskreise erforderte. Die Varianten F1 und F2 (ohne Düngerdosierung) wurden zu einem Kreis zusammengefasst, wohingegen für jede Variante mit Fertigation ein unabhängiger Kreis errichtet wurde. Das Wasser wurde zunächst ausgehend von einer Zuleitung mit

Wasserzähler, Filter, Druckminderer sowie Magnetventil mit batteriebetriebenen Bewässerungscomputer in die verschiedenen Kreise aufgeteilt. Diese Verteilerstationen wurden an zugänglichen Punkten, am Rand der Hopfenfelder, installiert (Abb. 4.3). Im Anschluss wurde in jeden Bewässerungskreis mit Düngerdosierung ein Bypass, bestehend aus T-Stücken sowie Hähnen, integriert. Dieser Bypass ermöglichte eine Umleitung des Bewässerungswassers zu einem Proportionaldosierer über welchen die Düngerdosierung erfolgte. Anschließend wurde das Wasser der einzelnen Kreise über an der Hopfengerüstanlage befestigte Polyethylen-Rohre querverteilt (Abb. 4.3). Vertikal installierte Leitungen, deren Ende im Boden befestigt wurde, leiteten das Wasser zu den entsprechenden Versuchsreihen. Nach dem Formen der Dämme erfolgte das Auslegen der Tropfschläuche, welche mit der Zuleitung verbunden wurden (Abb. 4.3). Die Hydraulik und Wasserausstoßrate der Systeme wurden nach Abschluss des Aufbaus durch Druckmessungen an verschiedenen Punkten geprüft. Des Weiteren erfolgte nach dem Auslegen der Tropfschläuche eine Vermessung der exakten Schlauchlänge, sodass die Düngermengen berechnet werden konnten. Der Aufbau der Bewässerungsanlage des Versuchsansatzes 3 unterschied sich nur durch die Errichtung einer geringeren Anzahl an unterschiedlichen Bewässerungskreisen.



Abb. 4.3: Düngereinspeisevorrichtung und Aufbau der Versuchsbewässerungsanlagen.

#### 4.4.4.2 Fertigation und Bewässerungssteuerung

Die Ausbringung der einzelnen N-Gaben über Fertigation erfolgte einmal wöchentlich je Standort. Die Dosierung des Düngers zum Bewässerungswasser erfolgte über sogenannte Proportionaldosierpumpen. Diese Pumpen können ohne Elektrizität, ausschließlich durch den Wasserfluss betrieben werden. Insgesamt wurden vier dieser

Dosierpumpen, entsprechend der Anzahl an Bewässerungskreisen mit Fertigation, auf einer Holzkonstruktion befestigt (Abb. 4.3). Dies ermöglichte den Transport der Pumpen zwischen den einzelnen Versuchsstandorten. Über zwei Schläuche konnte jede Dosierpumpe mit dem errichteten Bypass eines Kreises verbunden werden (Abb. 4.3). Nach Herstellung der Verbindung zwischen Bewässerungskreis und Dosiereinheit wurde der Wasserfluss umgeleitet, sodass der Dünger zum Wasser dosiert werden konnte.

An jedem Düngetermin wurde die zuvor berechnete Menge an UAN einer Versuchsvariante mittels akkubetriebener Waage im Feld in einem Messbecher abgewogen. Die UAN-Menge wurde mit Wasser verdünnt, sodass jeder Messbecher (5 Liter) vollständig gefüllt war. Um Fehler auszuschließen, wurden zusammengehöriger Bewässerungskreis, Dosierpumpe und Messbecher jeweils gekennzeichnet. Anschließend folgte über einen Zeitraum von 25 bis 35 Minuten die Dosierung der Düngertlösung zum Wasser des jeweiligen Bewässerungskreises. Nach dem vollständigen Entleeren der Messbecher wurden diese mehrmals gespült, sodass die gesamte UAN-Menge in den Kreis dosiert werden konnte.

Hinsichtlich der Steuerung der Anlage war zu beachten, dass das System vor Beginn einer Düngeinspeisung bereits vollständig mit Wasser gefüllt sein musste und der Betriebsdruck erreicht war. Des Weiteren war nach Abschluss eines Einspeisevorgangs eine ausreichende Nachlaufzeit erforderlich. Beide Aspekte wurden im Gewächshaus unter dem Gesichtspunkt einer homogenen Düngerverteilung über die gesamte Tropfschlauchlänge zuvor untersucht. In Abhängigkeit der Länge des Tropfschlauches wurden dabei Nachlaufzeiten von bis zu 120 Minuten ermittelt. Die Gesamtlaufzeit betrug bei jedem Einspeisevorgang insgesamt 180 Minuten. Längere Wasserlaufzeiten während eines Einspeisevorgangs wurden vermieden, um vor allem auf den sandigeren Standorten eine Verlagerung des ausgebrachten Stickstoffs außerhalb der intensiv durchwurzelter Zone des Bifangs zu unterbinden.

Die Steuerung der Wasserlaufzeiten erfolgte über einen batteriebetriebenen und programmierbaren Bewässerungscomputer mit Magnetventil. Dabei wurden die Wassermengen auf Basis der Bilanzierung von Niederschlag und Verdunstung der nächstgelegenen Wetterstation ermittelt. Grundsätzlich erstreckt sich die Bewässerungsperiode bei Hopfen, unter den Bedingungen in der Hallertau, aktuell von Mitte Juni bis Anfang September (vgl. 2.3.3). Die Sensibilität der Hopfenpflanze gegenüber Trockenheit ist dabei je nach Entwicklungsstadium unterschiedlich hoch. Je nach aktueller Witterung erfolgte die Festlegung der auszubringenden Wassermengen bis zu zweimal wöchentlich auf

Basis der Evapotranspirationsraten. Die Ausstoßrate und der Tropfabstand der verwendeten Tropfschläuche lagen bei  $1,0 \text{ l h}^{-1}$  bzw. 50 cm. Die Steuerung der im Rahmen des Versuchsansatzes 3 geprüften ober- und unterirdischen Systeme unterschied sich nicht, d. h. die Wasserlaufzeit und die Intervalle zwischen den Wassergaben variierten nicht.

Zur standort- und sortenspezifischen Optimierung der Wassergaben wurden zusätzlich Bodenfeuchte-Sensoren (Watermark-Sensoren zur Messung des elektrischen Widerstands) genutzt. Durch die Aufzeichnung des Verlaufs der Bodenfeuchte konnten Trends frühzeitig erkannt und mit einer Erhöhung oder Verringerung der Wassergaben reagiert werden. Die Sensoren wurden auch zur Überwachung der Versickerungstiefe des Wassers in Abhängigkeit von Laufzeit, Bodenart und Sorte genutzt. Der Einbau dieser Sensoren erfolgte jährlich Mitte Juni nach dem Auslegen der Tropfschläuche. Die Bodenfeuchte wurde außerdem mehrmals wöchentlich mit einer Spatenprobe überprüft.

Zur Ausbringung des Stickstoffs über Fertigation wurde in den Monaten Juni, Juli und August mindestens einmal wöchentlich bewässert. Weitere Wassergaben zwischen den Düngeterminen erfolgten auf Basis der Bilanzierung von Niederschlag und Verdunstung sowie des Verlaufs der Bodenfeuchte, wobei mehrmals wöchentlich Anpassungen vorgenommen wurden.

#### **4.4.5 Beurteilung der Pflanzenentwicklung**

In jedem Feldversuch erfolgte im Versuchszeitraum von 2017 bis 2019 über die gesamte Vegetation eine regelmäßige Beurteilung der Auswirkungen der unterschiedlichen Behandlungen. Die Effekte wurden sowohl schriftlich, als auch durch Fotos dokumentiert. Wie sich bereits im ersten Versuchsjahr 2017 herausstellte, zeigten nicht mit Stickstoff gedüngte Pflanzen neben einer helleren Grünfärbung vor allem eine eingeschränkte Ausbildung der Seitentriebe. Deshalb erfolgte in den Versuchsjahren 2018 und 2019 eine verstärkte Beobachtung des Seitentriebwachstums sowie der grundsätzlichen Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit der N-Düngung.

Im Hinblick auf die Bewertung des aktuellen Entwicklungszustands einer Hopfenpflanze hat sich die Einteilung der phänologischen Entwicklungsstadien nach Roßbauer et al. (1995) als nicht geeignet erwiesen, da keine ausreichend detaillierte Differenzierung der Pflanzenentwicklung möglich war. Aus diesem Grund ist im Rahmen des Forschungsprojekts eine für Düngezwecke geeignetere Entwicklungsstadien-Einteilung konzeptionell

erarbeitet worden, deren Publikation noch erfolgen soll. Abb. 4.4 zeigt den grundsätzlichen Entwicklungsverlauf einer Hopfenpflanze und die zeitliche Aufeinanderfolge unterschiedlicher Makro- und Mikrostadien. Dabei ist anzuführen, dass nach dem Anleiten der Triebe vor allem das Längenwachstum des Haupttriebs (in Prozent der Gerüsthöhe) und die Ausbildung der Seitentriebe Aufschluss über den aktuellen Zustand der Hopfenpflanze geben. Nach dem Abschluss des Längenwachstums (Erreichen der Gerüsthöhe) können ab Anfang Juli auch die Knospen-, Blüten-, und Doldenausbildung zur Bewertung herangezogen werden. Eine wichtige Erkenntnis war, dass für eine eindeutige Bestimmung des aktuellen Entwicklungszustandes der Pflanze verschiedene Pflanzenparameter gleichzeitig herangezogen werden müssen. Da die neue Entwicklungsstadien-Einteilung erst im Verlauf des dritten Versuchsjahres 2019 vorlag und validiert werden konnte, wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine exakte Zuordnung der Mikrostadien verzichtet, stattdessen erfolgt eine Beschreibung des Entwicklungszustandes der Pflanze.

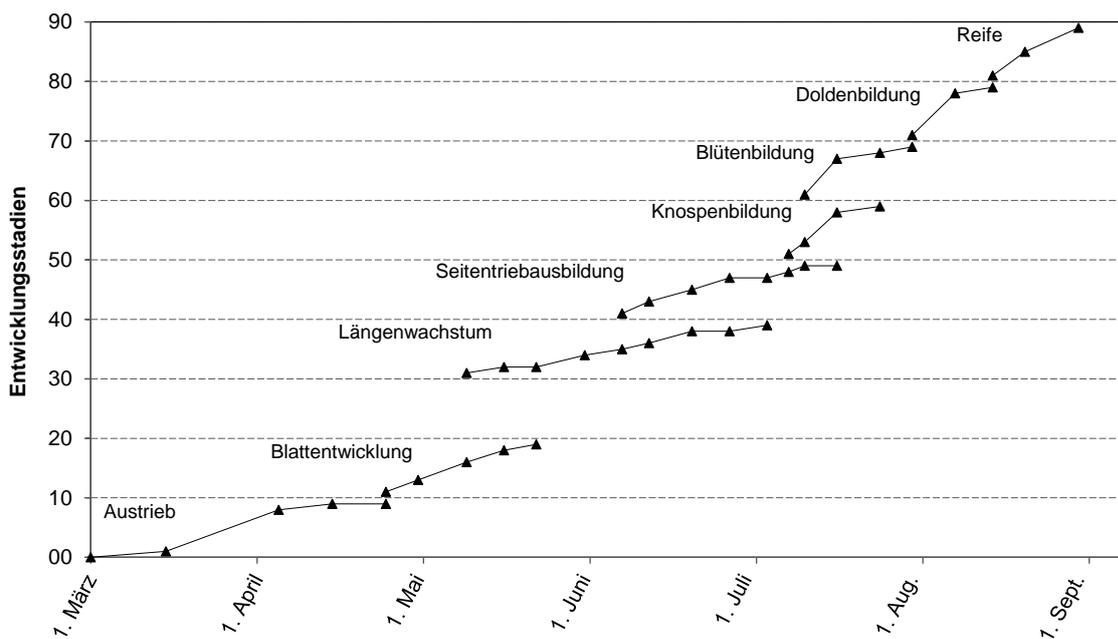


Abb. 4.4: Entwicklungsverlauf einer Hopfenpflanze – Zeitliche Aufeinanderfolge der unterschiedlichen Entwicklungsstadien; Erste Ziffer Makrostadium, zweite Ziffer Mikrostromadium.

#### 4.4.6 Versuchsernte

Vor Erreichen der Erntereife erfolgte gegen Ende August in jedem Versuch die Kennzeichnung der 20 Einzelreben von 10 Hopfenpflanzen einer Ernteparzelle (Abb. 4.5 a). Konnten aufgrund von Fehlstellen oder Unregelmäßigkeiten keine 20 Einzelreben geerntet werden, wurde dies schriftlich festgehalten. Während der Ausweisung der Ernteparzellen wurde zudem sichergestellt, dass sich keine Pflanzen anderer Sorten darin

befinden. Die zu erntenden Pflanzen einer Parzelle wurden durch das Anbringen von Markierungsbändern an den Rändern gekennzeichnet. Zur Identifikation der Parzellen wurde jeweils ein Kunststoffetikett mit einem Code befestigt. Um die Anzahl der Überfahrten bei der Ernte zu reduzieren erfolgte die Anbringung dieser Etiketten nach einem zuvor festgelegten Schema.

Jeder Versuchsstandort wurde jährlich, entsprechend der Reife der jeweiligen Sorte, zum optimalen Zeitpunkt geerntet. Die Pflücke der Reben wurde an der Versuchspflückmaschine am Hopfenforschungsinstitut in Hüll durchgeführt. Zunächst erfolgte im Feld das Herunterreißen der sechs Meter langen Pflanzen mit einem Hopfenabreißgerät auf einen Rebenladewagen. Nach Verladung der 20 Einzelreben einer Parzelle wurden diese mit einem Streifen aus Kunststoffolie von der nachfolgenden Parzelle abgetrennt. Diese Vorgehensweise ermöglichte es vier Parzellen mit insgesamt 80 Einzelreben je Wagen zu laden.

Im Erntegebäude in Hüll wurden zunächst alle Parzellen einer Wagenladung vor der Pflückmaschine abgeladen. Nach Identifikation einer Parzelle durch das angebrachte Etikett erfolgte das Einhängen aller 20 Reben in die Pflückmaschine. Bei der maschinellen Hopfenpflücke werden zunächst alle Dolden und Blätter von den Reben abgestreift. Danach folgt über verschiedene Sortierprozesse die Trennung der Dolden von den Blättern. Die Dolden werden dann über ein Förderband aus der Maschine transportiert und können an der Versuchspflückmaschine über eine spezielle Vorrichtung in Säcke abgefüllt werden. Der gesamte Rest, bestehend aus Blättern, Seitentrieben, dem zerkleinerten Hauptspross sowie dem Draht, wird auf einem zweiten Förderband aus der Pflückmaschine transportiert. Dieses Material wird auch als Hopfenrebenhäcksel bezeichnet.

Zur Bestimmung der Gesamt-Biomasse sowie des N-Entzugs wurden sowohl die Dolden- als auch Rebenhäckselmenge einer Parzelle erfasst und beprobt. Über die Wiegung der Säcke wurde für jede Parzelle die Doldenfrischmasse ermittelt. Zusätzlich wurde ein Kartoffelsack zur Entnahme einer Probe genutzt (Abb. 4.5 b). Die Erfassung der Frischmasse der Rebenhäcksel-Fraktion erfolgte halbautomatisch durch eine Bandwaage. Dabei stellte sich die Entnahme einer repräsentativen Probe aus dem sehr heterogenen Material als schwierig heraus, weshalb im ersten Versuchsjahr eine geeignete Vorgehensweise dafür entwickelt wurde. Um Bröckelverluste zu vermeiden wurde das Rebenhäckselmaterial in perforierte Kunststoffbeutel abgefüllt (Abb. 4.5 c). Nach Erfassung der Frischmasse der Dolden- und Rebenhäcksel-Probe wurden diese zur Konservierung bei

60 °C getrocknet. Dabei musste bei den Doldenproben auf den Trocknungsgrad geachtet werden, da eine zu starke Trocknung zum Ablösen der Doldenblätter von den Spindeln führt. Um den Wassergehalt zwischen Doldenblättern und Spindel zu homogenisieren, wurden die Proben im Anschluss an die Trocknung unter Luftzufuhr konditioniert.

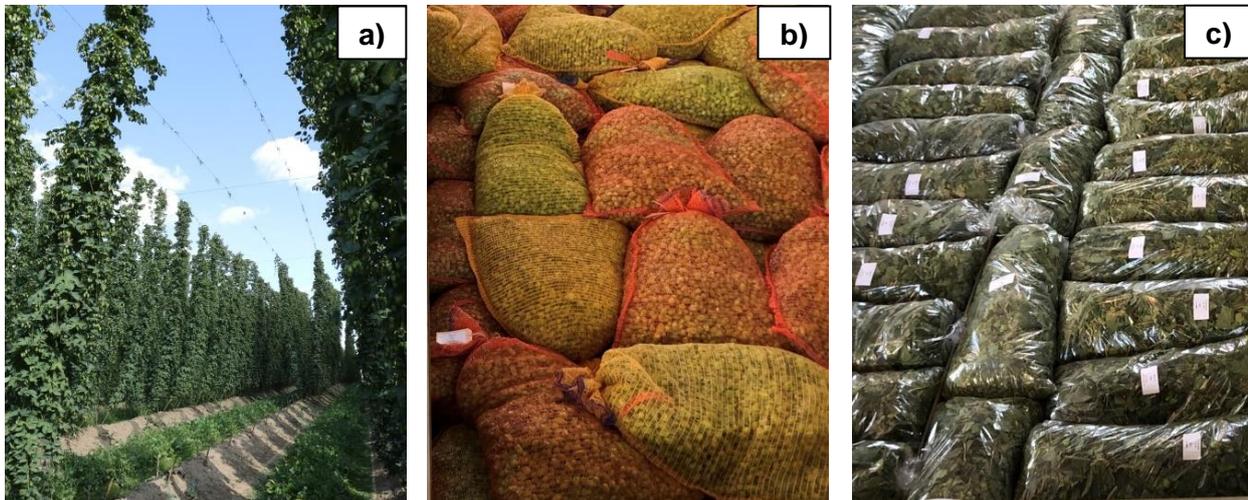


Abb. 4.5: Geerntete Versuchsparzelle (10 Pflanzen bzw. 20 Einzelreben) im Feld (a) sowie Doldenproben in Kartoffelsäcken (b) und Rebenhäcksel-Proben in perforierten Kunststoffbeuteln (c).

## 4.5 Untersuchungsmethoden

### 4.5.1 Bodenprobenahme und -untersuchung

An allen Versuchsstandorten wurden Standard-Boden- und Nmin-Untersuchungen durchgeführt. Die Probennahme für die Standard-Bodenuntersuchung erfolgte einmalig vor der Neuanlage eines Versuchs. Dabei wurde die gesamte Versuchsfläche mit 20 bis 30 Einstichen repräsentativ bis auf Krumentiefe beprobt. Da bei Hopfen ein Großteil der Nährstoffe im Bereich der Pflanzreihen auf Band gedüngt wird, wurden 50 % der Einstiche in der Pflanzreihe und 50 % in der Fahrspurenmitte vorgenommen. Die Analyse der Standard-Boden-Proben erfolgte an der LWG in Veitshöchheim nach den Vorgaben des VDLUFA-Methodenbuchs (VDLUFA, 2012).

Die Bodenprobenahme zur Untersuchung des Nmin-Gehalts erfolgte im Frühjahr und Herbst eines jeden Versuchsjahres. Bei der Neuanlage der Feldversuche wurde zunächst die gesamte Fläche repräsentativ beprobt. Nach Abschluss der Ernte im ersten Versuchsjahr erfolgte ab Herbst 2017 eine separate Beprobung von Varianten. Aufgrund der hohen Anzahl an Feldversuchen konnten nur ausgewählte Varianten beprobt und analysiert werden. Zur Entnahme der Bohrkern wurde ein halbautomatischer Probenehmer

mit hydraulischem Schlaghammerwerk eingesetzt. Die Einstichtiefe lag bei 90 cm, wobei eine Aufteilung des Bohrkerns in Abschnitte von 30 cm Länge erfolgte. In Abhängigkeit der Länge der Versuchsreihen wurden 12 bis 16 Einstiche je Wiederholung vorgenommen, wobei jeweils die Hälfte der Bohrkerns aus der Pflanzreihe und Fahrspurenmitte entnommen wurde. Nach der Entnahme wurde die Aufrechterhaltung der Kühlkette bis zur Verarbeitung im Labor sichergestellt. Die Analyse des Nitrat- und Ammonium-Gehalts erfolgte im Labor der Abteilung Qualitätssicherung und Analytik der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft nach dem VDLUFA-Methodenbuch (Nmin-Methode) (VDLUFA, 2012).

## **4.5.2 Ernteproben**

### **4.5.2.1 Doldenertrag und Alphasäuregehalt**

Der Doldenertrag und Alphasäuregehalt sind wichtige agronomische Parameter zur Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Behandlungen. Nachfolgend wird die Methodik zur Bestimmung dieser Parameter exemplarisch am Beispiel einer Parzelle erläutert. Zunächst wurde das Nettogewicht der bei der Ernte getrockneten Doldenprobe bestimmt (Abb. 4.5 b). Dabei ist zu beachten, dass Hopfendolden nur bis zu einem Wassergehalt von etwa 10 % und nicht bis zur Gewichtskonstanz getrocknet werden können, da deren Struktur ansonsten zerstört werden würde. Anschließend folgte eine Homogenisierung und Entnahme von zwei Teilproben. Diese wurden umgehend vakuumverpackt und bei 4 °C in einer Kühlzelle gelagert. Eine dieser Proben wurde zur Analyse des Restwasser- und Alphasäuregehalts im Labor am Hopfenforschungsinstitut in Hüll genutzt. Die Wassergehaltsbestimmung wurde auf Basis der Methode EBC 7.2 (EBC, 2020) durchgeführt. Dabei wird auf Grundlage des Gewichtsverlusts durch Trocknung bei 103 °C bis 104 °C der Wassergehalt berechnet. Der Gehalt an Alphasäuren wurde durch konduktometrische Titration, entsprechend der Methode EBC 7.4 (EBC, 2020), analysiert.

Die Angabe des Doldenertrags erfolgt grundsätzlich je Hektar bei einem standardisierten Wassergehalt von 10 %. Zur Ertragsermittlung wurde auf Basis des Nettogewichtsverlusts der getrockneten Probe (Abb. 4.5 b) zunächst ein Umrechnungsfaktor ermittelt. Dieser wurde genutzt, um die während der Ernte bestimmte gesamte Doldenfrischmasse einer Parzelle um den Wasserverlust der Trocknung zu korrigieren. Im Anschluss folgte, auf Grundlage der Restwassergehaltsbestimmung der Probe, die Berechnung der Masse an getrockneten Dolden bei einem Wassergehalt von 10 %. Abschließend wurde unter

Berücksichtigung der geernteten Pflanzenanzahl und des standortspezifischen Standraums der Doldenertrag je Hektar ermittelt. Da die Wassergehalte der Doldenproben unterschiedlicher Erntetermine variierten und um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die analysierten Alphasäuregehalte korrigiert. Als Bezugsbasis diente dabei ein standardisierter Wassergehalt in Höhe von 10 %.

Eine weitere agronomische Kennzahl stellt der Alphaertrag je Hektar dar. Dieser wird auf Basis des Doldenertrags und Alphasäuregehalts bei einem standardisierten Wassergehalt von 10 % berechnet. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte der Berechnung des Doldenertrags, Alphasäuregehalts sowie Alphaertrags angegeben.

$$\text{Ertrag Parzelle}_{\text{trocken}} = (\text{Probe}_{\text{trocken}} \div \text{Probe}_{\text{frisch}}) * \text{Ertrag Parzelle}_{\text{frisch}}$$

$$\text{Ertrag Parzelle}_{10\%H_2O} = \text{Ertrag Parzelle}_{\text{trocken}} * [(100 - H_2O\text{-Gehalt Probe}_{\text{trocken}}) \div 90]$$

$$\text{Reben ha}^{-1} = 10.000 \text{ m}^2 \div (\text{Reihenabstand} * \text{Pflanzabstand})$$

$$\text{Ertrag ha}^{-1} 10\% = (\text{Parzellenertrag}_{10\%} \div \text{Rebenanzahl Parzelle}) * \text{Reben ha}^{-1}$$

$$\text{Alphasäuregehalt}_{10\%} = (\text{Alphasäuregehalt} * 90) \div (100 - H_2O\text{-Gehalt Probe}_{\text{trocken}})$$

$$\text{Alphaertrag ha}^{-1} 10\% = \text{Alphasäuregehalt}_{10\%} * \text{Ertrag ha}^{-1} 10\%$$

#### 4.5.2.2 Restpflanzenmasse

Zur Bestimmung der Effizienz unterschiedlicher N-Düngesysteme ist neben dem Doldenertrag auch die Restpflanzenmasse von Bedeutung. Deren Bestimmung erfolgte über die während der Ernte ermittelte Rebenhäckselfrischmasse. Die entnommenen Proben (Abb. 4.5 c) wurden nach der Trocknung (nicht bis zur Gewichtskonstanz), zur Homogenisierung des Wassergehalts der unterschiedlichen Bestandteile, zunächst zwischengelagert. Die daraufhin folgenden Schritte der Weiterverarbeitung werden nachfolgend am Beispiel einer Probe exemplarisch erläutert. Zunächst erfolgten die Auswaage der getrockneten Proben sowie die Bestimmung der Tara (Abb. 4.6 a). Zur Entfernung und Bestimmung des darin enthaltenen Metalldrahtanteils wurde das lose und trockene Rebenhäckselmaterial (Abb. 4.6 b) anschließend in eine magnetische Vorrichtung dosiert. In einem weiteren Schritt wurde das gesamte metallfreie Pflanzenmaterial (Abb. 4.6 c) einer Probe in einer Hammermühle zerkleinert und homogenisiert. Abschließend erfolgte die Bestimmung des Restwassergehalts durch Entnahme einer Teilprobe und Trocknung bei 105

°C bis zur Gewichtskonstanz (Abb. 4.6 f). Die einzelnen Schritte werden nachfolgend aufgelistet.

1. Einwaage der Rebenhäckselprobe
2. Trocknung bei 60 °C
3. Auswaage der Rebenhäckselprobe (Abb. 4.6 a)
4. Entfernung und Bestimmung des Metalldrahtanteils (Abb. 4.6 b, c, d)
5. Zerkleinerung und Homogenisierung des Pflanzenmaterials (Abb. 4.6 e)
6. Bestimmung des Restwassergehalts bei 105 °C (Abb. 4.6 f)



Abb. 4.6: Getrocknete Rebenhäckselproben - Verarbeitungsschritte.

Die Ermittlung der Restpflanzenmasse je Hektar erfolgte auf Basis der während der Ernte bestimmten Rebenhäckselfrischmasse. Zunächst wurde das erfasste Gewicht um den

darin enthaltenen Draht korrigiert. Der Anteil variierte in Abhängigkeit der Sorte und des Standortes. Weiterhin diente der Nettomasseverlust der drahtfreien, getrockneten Probe zur Berechnung des Wasserverlusts. Die Bestimmung der Restpflanzentrockenmasse je Parzelle erfolgte auf Grundlage des nach der Probenhomogenisierung ermittelten Wassergehalts bei 105 °C. Abschließend wurde in Abhängigkeit der geernteten Pflanzenzahl sowie des Standraums die Restpflanzenmasse je Hektar berechnet.

#### **4.5.2.3 Stickstoffgehalt und Stickstoffentzug**

Die Berechnung der Stickstoff-Entzüge erforderte zunächst eine Analyse des N-Gehalts der Dolden- und Restpflanzen-Fraktion.

Zur Ermittlung des N-Gehalts des Restpflanzenmaterials wurden die bereits vorzerkleinerten und homogenisierten Proben verwendet (Abb. 4.6 e). Aufgrund der Heterogenität des Ausgangsmaterials und der geringen Einwaage bei der N-Gehaltsbestimmung war ein weiterer Vermahlungsschritt notwendig. Dafür wurde eine repräsentative Teilprobe entnommen, bei 60 °C nachgetrocknet und in einer Zentrifugalmühle mit einem Sieb der Größe 0,5 mm vermahlen. Vor der Entnahme einer Teilprobe für die N-Gehaltsbestimmung nach Dumas nach dem VDLUFA-Methodenbuch (VDLUFA, 2000) wurde das Pflanzenpulver erneut bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach der Einwaage für die Analyse des N-Gehalts wurde eine weitere Teilprobe zur Bestimmung des Restwassergehalts bei 105 °C entnommen. Im Anschluss folgte die Korrektur des analysierten N-Gehalts (60 °C) auf Grundlage des ermittelten Restwassergehalts. Abschließend erfolgte die Berechnung des N-Entzugs je Hektar auf Basis der Restpflanzenmasse (105 °C) und des N-Gehalts (105 °C).

Zur Ermittlung des N-Gehalts der Dolden-Fraktion wurde die dafür entnommene Teilprobe verwendet (Abb. 4.7). Im ersten Versuchsjahr 2017 wurden verschiedene Werkzeuge zur Zerkleinerung und Homogenisierung der Hopfendolden getestet. Dabei eigneten sich, aufgrund des hohen Öl- und Harzgehalts der Dolden, Mühlen mit Siebeinsätzen nicht. Als effektivste Technik erwies sich eine mit Schlagmessern besetzte Kaffeemühle (Abb. 4.7). Diese Mühle erreichte einen ausreichenden Zerkleinerungsgrad um die Reproduzierbarkeit der Messwerte bei der N-Gehaltsbestimmung nach Dumas zu garantieren. Die weiteren Verfahrensschritte beinhalteten die Vortrocknung des zerkleinerten Doldenmaterials bei 60 °C, die N-Gehaltsbestimmung nach Dumas sowie eine Ermittlung

des Wassergehalts bei 105 °C. Abschließend erfolgte auf Grundlage des Doldenertrags (105 °C) und N-Gehalts (105 °C) die Berechnung des N-Entzugs je Hektar.



Abb. 4.7: Zerkleinerung und Homogenisierung getrockneter Doldenproben für die Analyse des Gesamt-N-Gehalts.

Auf Basis des berechneten N-Entzugs über Dolden und Restpflanze sowie der N-Düngung und des Ertrags wurden außerdem folgende Kennzahlen ermittelt.

Apparente N-Ausnutzung [%] =  $(\text{N-Entzug}_{\text{gedüngt}} - \text{N-Entzug}_{\text{ungedüngt}}) / \text{N-Düngung}$

Agronomische N-Effizienz [ $\text{kg kg}^{-1}$ ] =  $(\text{Ertrag}_{\text{gedüngt}} - \text{Ertrag}_{\text{ungedüngt}}) / \text{N-Düngung}$

N-Saldo [kg] = N-Düngung – N-Entzug

### 4.5.3 Biomasse und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf

Die Parameter Biomasseentwicklung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf wurde im Rahmen des Versuchsansatzes 1 bei einem zeitlich und mengenmäßig variierenden N-Angebot untersucht. Hierfür stand keine validierte Methodik zur Verfügung. Ein limitierender Faktor bei der Entwicklung einer geeigneten Vorgehensweise war die begrenzte Anzahl an Pflanzen, die während der Vegetation zum Schneiden zur Verfügung stand. Dabei war vor allem zu beachten, dass nur eine der zwei Einzelreben einer Pflanze abgeschnitten werden konnte, da ansonsten eine Schädigung der Pflanzen erfolgt wäre.

Im ersten Versuchsjahr 2017 wurden aus den einzelnen Varianten zu bestimmten Terminen (Tab. 4.13) jeweils mehrere Einzelreben geschnitten. Dies erfolgte außerhalb der Ernteparzellen. Unmittelbar nach dem Abschneiden wurde die Rebe im Feld in 50 cm lange Abschnitte zerteilt und der Metalldraht entfernt. Anschließend folgte das Abpacken

der Rebenabschnitte in mehrere perforierte Kunststoffbeutel sowie die Einwaage mittels akkubetriebener Feldwaage. Nach Abschluss des Schneidens aller Reben folgte die Trocknung des Pflanzenmaterials bei 60 °C. Vor der Auswaage der Proben wurden diese, zur Homogenisierung des Wassergehalts der unterschiedlichen Bestandteile, zwischengelagert. Das gesamte getrocknete Pflanzenmaterial einer Rebe wurde im Anschluss in einer Hammermühle zerkleinert und homogenisiert. Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte durch Entnahme einer Teilprobe und Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz. Zur Ermittlung des N-Gehalts wurde mit den vorzerkleinerten und homogenisierten Proben wie mit den Restpflanzenproben (vgl. 4.5.2.3) weiterverfahren. Abschließend erfolgte die Berechnung der Biomasse und N-Aufnahme je Hektar.

Tab. 4.13: Schnitttermine im Versuchsjahr 2017.

	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>
<b>V1_PE_17</b>	08.06	22.06	11.07	02.08	03.09
<b>V1_HS_17</b>	09.06	23.06	11.07	01.08	16.09

Im zweiten Versuchsjahr 2018 (Tab. 4.14) wurde die Methodik aufgrund der hohen Einzelpflanzenvariabilität bei Hopfen optimiert. Die Erfassung der tatsächlichen Biomasse erfolgte dabei auf Basis einer höheren Pflanzenanzahl. Hierfür wurden am Rand der Ernteparzellen Bereiche zur regelmäßigen Wiegung derselben Reben festgelegt, ohne diese Pflanzen dabei zu schneiden. Je Variante wurden insgesamt 12 Pflanzen (24 Aufleitungen) verteilt auf vier Wiederholungen genutzt. Um eine regelmäßige Erfassung der Masse dieser zu ermöglichen, wurde der am Gerüst befestigte Aufleitdraht gelöst und ein Haken angebracht. Das Gewicht der Reben konnte anschließend über den gesamten Vegetationsverlauf (Tab. 4.14) mit einer Hängewaage erfasst werden (Abb. 4.8).

Parallel zur Wiegung erfolgte an vergleichbaren und benachbarten Pflanzen des jeweiligen Wiegebereichs die Bestimmung des Trockensubstanzgehalts, des N-Gehalts und Drahtanteils. Hierfür wurden je Termin und Versuchsvariante vier Reben, entsprechend der vier Wiederholungen, geschnitten (Abb. 4.8). Während dieses Vorgangs erfolgte die Erfassung des Gewichts mit derselben Hängewaage vor und nach dem Abschneiden am unteren Ende. Dabei stellte sich heraus, dass aufgrund der abstützenden Eigenschaften des Sprosses eine Differenz besteht, wodurch die tatsächliche Masse einer nicht abgeschnittenen Rebe um 3 bis 5 % unterbewertet wird. Auf Grundlage der ermittelten Differenz wurde ein Faktor zur Korrektur des Gewichts nicht abgeschnittener Reben berechnet.



Abb. 4.8: Bestimmung der Biomassebildung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf.

Nach dem Schneiden der Reben unterschieden sich die weiteren Verfahrensschritte, bestehend aus Zerteilung, Trocknung, Zerkleinerung und Homogenisierung bis zur Bestimmung des Wasser- und N-Gehalts, nicht von denen des Vorjahres (2017). Die Berechnung der Biomasse und N-Aufnahme je Hektar erfolgte abschließend durch Übertragung des Wasser- und N-Gehalts (105 °C) auf die Pflanzen der Wiegebereiche. Dabei wurden der ermittelte Korrekturfaktor sowie der standortspezifische Standardraum berücksichtigt.

Tab. 4.14: Schnitttermine im Versuchsjahr 2018.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
V1_HT_18	08.05	28.05	19.06	09.07	31.07	22.08	
V1_HS_18		28.05	20.06	10.07	30.07	20.08	06.09

## 4.5.4 Stickstoffversorgungszustand

### 4.5.4.1 Chlorophyllwert und Blatt-N-Gehalt

Während der Vegetation wurde in ausgewählten Feldversuchen ein SPAD-Meter (Konica Minolta) zur Erfassung des Chlorophyllwertes auf Basis des Lichttransmissionsverhaltens der Blätter eingesetzt. Da diese Messtechnik bei Hopfen bisher keine Anwendung fand, wurde im ersten Versuchsjahr 2017 zunächst eine geeignete Vorgehensweise zur Bestimmung eines repräsentativen Messwertes entwickelt und validiert. Dabei zeigte sich, dass das Messergebnis durch die Exposition eines Blattes im Sonnen- oder

Schattenbereich der Pflanze beeinflusst wird. Des Weiteren erwies sich eine Messung am jüngsten voll entwickelten Blatt aufgrund der Wuchshöhe der Pflanzen (7m) als nicht praktikabel.

Ab dem zweiten Versuchsjahr 2018 wurde die nachfolgend beschriebene Methodik angewendet. In jeder Wiederholung einer Variante wurde, basierend auf 20 Einzelmessungen an den 20 Aufleitungen der Ernteparzelle, ein mittlerer Chlorophyllwert erfasst. Die Messhöhe lag je nach Entwicklungsstadium bei 0,8 bis 2,0 Metern. Als Messpunkt wurde der mittlere Lappen einer 5-lappigen Blattspreite links oder rechts der Mittelrippe definiert, wobei nekrotische Stellen ausgeschlossen wurden (Abb. 4.9). Verwendung fanden dabei ausschließlich vollentwickelte Blattspreiten des Haupttriebs. Bei der Auswahl dieser Blätter wurde auf ein ähnliches physiologisches Alter geachtet. Aufgrund der V-förmigen Aufleitung der einzelnen Reben einer Pflanze wurden je Seite jeweils 10 Messungen durchgeführt. Der Mittelwert einer Versuchsvariante setzte sich insgesamt aus 80 einzelnen Messungen zusammen. Im Versuchsjahr 2017 wurde in ausgewählten Varianten der Versuchsserie 2, zusätzlich zur Messung an Blättern des Haupttriebs der unteren Pflanzenabschnitte, im mittleren sowie oberen Abschnitt der Pflanzen gemessen. Aufgrund des unterschiedlichen physiologischen Alters der Blätter variierten die Messwerte jedoch stark, weshalb kein repräsentativer Mittelwert bestimmt werden konnte.

Zur Untersuchung des Blatt-N-Gehalts wurde die Blattspreite (ohne Blattstiel) unmittelbar nach der Erfassung des Chlorophyllwertes von der Pflanze abgetrennt. Die Blattspreiten der 20 Einzelmessungen einer Parzelle wurden gesammelt und nach Abschluss der Messung in einen perforierten Kunststoffbeutel verpackt. Anschließend folgte die Trocknung der Blätter bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz sowie die Zerkleinerung und Homogenisierung des gesamten Blattmaterials in einer Zentrifugalmühle. Vor der Entnahme einer Teilprobe für die N-Gehaltsbestimmung nach Dumas wurde das Pflanzenpulver erneut bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach der Einwaage für die Analyse des N-Gehalts wurde eine weitere Teilprobe zur Bestimmung des Restwassergehalts bei 105 °C entnommen. Die Angabe des analysierten N-Gehalts bezieht sich auf die bei 105 °C bestimmte Trockenmasse.



Abb. 4.9: Messpunkt am fünfblappigen Blatt zur Erfassung des Chlorophyllwertes.

#### 4.5.4.2 Reflexionsoptische Messungen

Des Weiteren wurden im Versuchsjahr 2018 im Rahmen des Versuchsansatzes 1 an der Sorte Herkules reflexionsoptische Messungen durchgeführt. Zur Messung der Lichtreflexion wurde ein passives Spektrometer-Messsystem der Firma tec5 eingesetzt. Dieses System besteht aus mehreren Komponenten. Während ein nach oben gerichteter Referenzkanal die Globalstrahlung erfasst, wird mit einem zweiten Kanal die Lichtreflexion gemessen. Die Kombination zweier Messkanäle ermöglicht ein Ausschalten von Schwankungen der Lichtintensität, sodass der Messwert ausschließlich durch die Reflexionseigenschaften der gemessenen Pflanzen beeinflusst wird. Bei einer spektralen Auflösung von einem Nanometer (nm) reichte das gemessene Wellenlängenspektrum von 325 bis 940 nm. Das Auslesen und die Übertragung der Daten vom Messsystem in Excel erfolgten in Form von Text-Dateien. Auf Basis des reflektierten Wellenlängenspektrums wurden in einer Bachelorarbeit, welche im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführt wurde, 15 unterschiedliche Vegetationsindices berechnet. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden für die vorliegende Arbeit die drei Indices REIP, IR G und NDVI (vgl. 2.4) ausgewählt und über lineare Regressionsmodelle untersucht, ob diese gemessene Pflanzenparameter wie den N-Gehalt, die Biomasse oder die N-Aufnahme abbilden können.

Die Messtermine orientierten sich an den Terminen der Biomasse- und N-Aufnahmemittlung der Sorte Herkules (Tab. 4.14). Aufgrund der speziellen Eigenschaften einer Hopfenpflanze erfolgten die Messungen nicht wie bei ackerbaulichen Kulturen üblich, mit einem senkrecht nach unten gerichteten Messkanal, stattdessen wurde dieser um 45°

gedreht. Des Weiteren wurden, bedingt durch die Länge einer Hopfenpflanze, folgende drei Messhöhen unterschieden: Unten = 1,5 m, Mitte = 3,5 m, Oben = 5,5 m. Die Messungen fanden grundsätzlich an den Pflanzen der Ernteparzellen sowie des Wiegebereichs statt, wodurch je Wiederholung 13 Pflanzen mit 26 Aufleitungen zur Verfügung standen. Zudem wurde auf jeder Messhöhe die V-förmige Aufleitungsform des Hopfens berücksichtigt und jeweils von beiden Seiten gemessen. Das Auslösen der einzelnen Messungen fand in einem Abstand von 30 cm bei einem Winkel von 45° statt, wobei der Referenzkanal senkrecht nach oben gerichtet war. Um die Messungen auf einer Höhe von 3,5 und 5,5 m zu ermöglichen, wurde eine am Schlepper angebaute Hopfenkanzel eingesetzt. Aufgrund der geringen Pflanzenhöhe Anfang Juni konnte am ersten Messtermin im Bereich der obersten Höhe keine Messung stattfinden. Infolge der zunehmenden Beschattung innerhalb des Pflanzenbestands wurde am vierten und fünften Termin auf die unterste Messhöhe verzichtet.

#### **4.5.5 Stickstoffeinlagerung und Wiederaustrieb**

Um die Auswirkungen der N-Düngung auf die N-Einlagerung in den Wurzelstock und den Wiederaustrieb der Pflanzen im Folgejahr zu untersuchen, wurde der N-Gehalt von Speicherwurzeln und Trieben des Wiederaustriebs analysiert. Eine Quantifizierung der in den Speicherwurzeln enthaltenen N-Menge war jedoch nicht möglich, da die Biomasse des tief reichenden Wurzelsystems der Hopfenpflanze nicht bestimmt werden kann.

Die Erfassung der N-Einlagerung in den Wurzelstock erfolgte durch eine Untersuchung der mehrjährigen Speicherwurzeln. Dafür wurden noch vor Vegetationsbeginn Teile des Wurzelsystems einer Pflanze freigelegt und aus verschiedenen Bereichen Wurzelabschnitte entnommen. Dies erfolgte je Wiederholung an zwei Pflanzen. Die entnommenen Wurzelabschnitte wurden anschließend bei 60 °C getrocknet. Aufgrund der starken Verholzung des Materials erfolgte die Zerkleinerung und Homogenisierung zweistufig über eine Schneid- und Zentrifugalmühle. Vor der Entnahme einer Teilprobe für die N-Gehaltsbestimmung nach Dumas wurde das Pflanzenpulver erneut bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Zur Untersuchung der Auswirkungen auf den Wiederaustrieb wurde die Biomasse des Austriebs Ende April, noch vor der Ausbringung der ersten N-Gabe beprobt. Dabei wurden je Wiederholung 20 Triebe mit einer Länge von 30 cm geschnitten. Anschließend folgte die Trocknung in perforierten Kunststoffbeuteln bei 60 °C und die Zerkleinerung

und Homogenisierung des gesamten Materials in einer Hammermühle. Zur Ermittlung des N-Gehalts wurde mit dem vorzerkleinerten und homogenisierten Pflanzenmaterial wie mit den Blattproben (vgl. 4.5.4.1) weiterverfahren.

#### 4.5.6 Ertragsaufbau

Aufgrund der Ertragsunterschiede in den Versuchsjahren 2017 und 2018 sowie der Beeinflussung des Habitus durch die N-Düngung wurden im dritten Versuchsjahr 2019 der Ertragsaufbau und der Habitus der Pflanzen in Abhängigkeit von der N-Düngung untersucht. Die Durchführung erfolgte im Rahmen des Versuchsansatzes 2 an der Sorte Perle (V2\_S\_PE\_19) sowie der Sorte Herkules (V2\_L\_HS\_19). Ziel war es die Parameter Gewicht der Dolden, Anzahl an Dolden, Doldengröße sowie Länge und Anzahl der Seitentriebe zu bestimmen.

Nach dem Erreichen der Erntereife, kurz vor der geplanten Ernte, wurden zunächst aus jeder Variante mehrere Reben geschnitten. Ausgehend von der Bruchstelle des Metalldrahtes am oberen Ende der Pflanzen wurde jede Rebe in vier Abschnitte zerteilt. Aufgrund der unterschiedlichen Gerüsthöhe der Standorte betrug deren Länge bei Perle 1,25 m und bei Herkules 1,5 m. Der über die maximale Länge des Aufleitdrahtes hinausgewachsene Anteil der Haupttriebe wurde einer fünften Fraktion zugeordnet. In Abhängigkeit der Länge konnten somit folgende Fraktionen unterschieden werden: Kopf, Oben, Mitte, Unten, Basis. Durch die Abtrennung von Seitentrieben die eine Länge von 10 cm überschritten (Abb. 4.10 a), wurden die vier Rebenabschnitte Basis, Unten, Mitte und Oben jeweils in Zentralrebe (Z-Rebe) (Abb. 4.10 b) und Seitentriebe (S-Triebe) (Abb. 4.10 c) fraktioniert. Während dieses Vorgangs erfolgte zudem eine Bestimmung der Anzahl und Länge der Seitentriebe.

Im Anschluss wurden von jeder der insgesamt 9 Fraktionen alle Dolden per Hand gepflückt und in getrennten Behältern gesammelt. Zur Ermittlung der Doldenanzahl erfolgte die Entnahme von drei repräsentativen Teilproben je Fraktion. Alle Dolden einer Teilprobe wurden jeweils auf einem mit weißer PVC-Folie bespannten Sperrholztablett platziert, sodass diese sich nicht berührten, und unter standardisierten Bedingungen fotografiert (Abb. 4.10 e). In einem weiteren Schritt wurde das Gewicht der fotografierten Teilproben sowie der Restmenge einer Fraktion getrennt erfasst (Abb. 4.10 d). Überstieg die Gesamtmenge einer Fraktion die maximale Kapazität von drei Tablett nicht, wurden alle Dolden fotografiert. Im Anschluss erfolgte, unter Aufrechterhaltung der 9 Fraktionen, die

Trocknung aller Dolden einer Rebe in perforierten Kunststoffbeuteln. Abschließend wurde das Nettogewicht der getrockneten Dolden je Fraktion erfasst und nach Ermittlung des Wassergehalts korrigiert (10 % H<sub>2</sub>O). Die Auswertung der Bilddateien erfolgte mit der Software Image J. Dabei wurden zunächst alle Dolden eines Fotos, auf Basis des Farbumterschieds zwischen Dolden und Hintergrund, selektiert. Anschließend folgte die automatisierte Erfassung der Anzahl je Teilprobe. Über die Anzahl und das Gewicht der fotografierten Dolden wurde eine mittlere Masse je Dolde ermittelt. Abschließend erfolgte die Bestimmung der Gesamtanzahl an Dolden je Fraktion über das mittlere Doldengewicht und die gewogene Restmenge. Diese Methodik wurde vor der Anwendung geprüft und validiert. Des Weiteren wurde die durchschnittliche Größe der Dolden mit der Einheit Quadratzentimeter (cm<sup>2</sup>) ermittelt. Hierfür wurde die Anzahl der Pixel je Zentimeter (cm), auf Grundlage eines unter denselben Kameraeinstellungen fotografierten Gegenstands mit bekannter Kantenlänge, festgelegt.

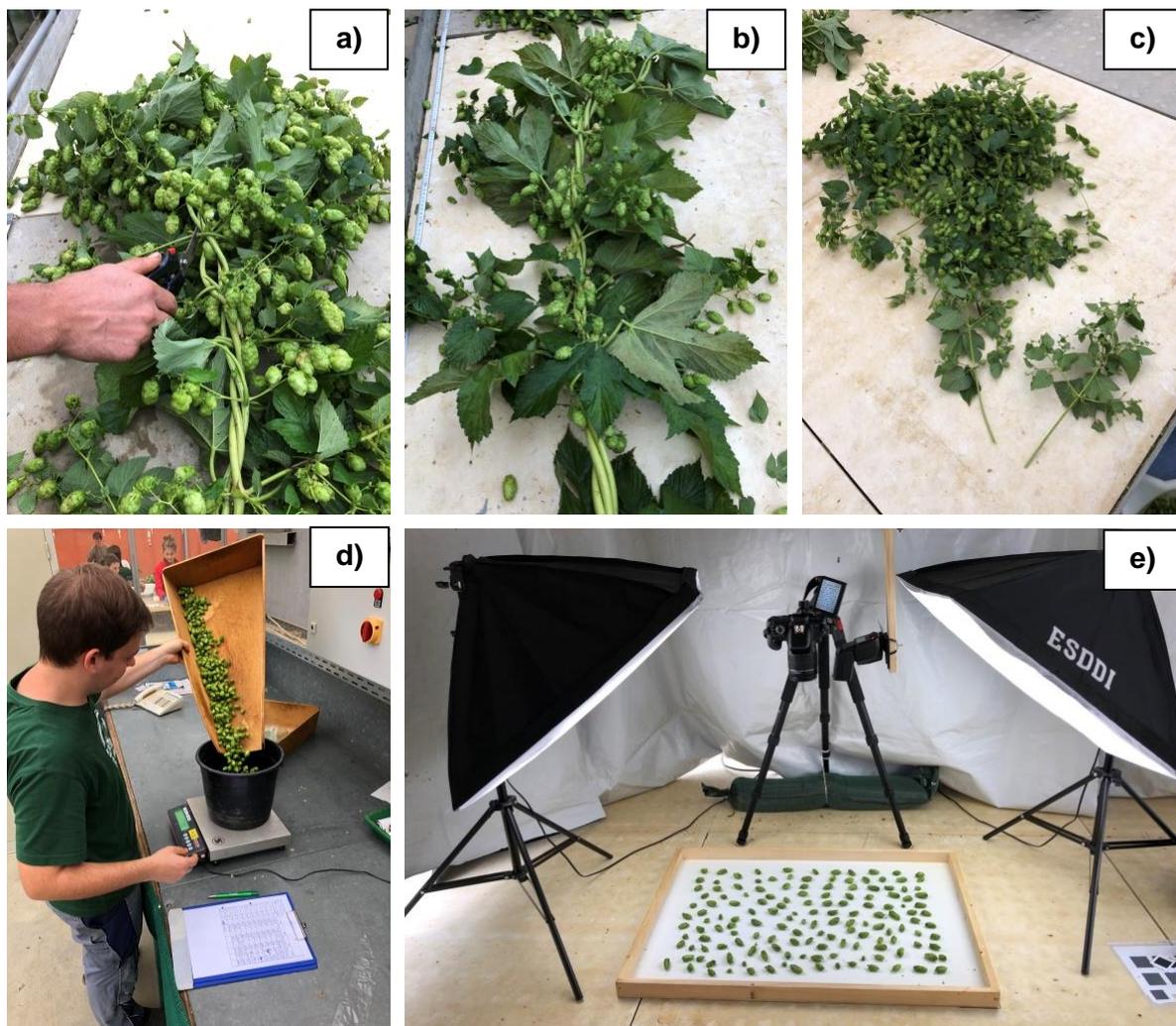


Abb. 4.10: Vorgehensweise zur Bestimmung des Ertragsaufbaus: Zerteilung der Rebenabschnitte in Seitentriebe und Zentralrebe (a, b, c) sowie Bestimmung der Frischmasse (d), Doldenanzahl und Doldengröße (e).

#### 4.5.7 Feinwurzelverteilung und Lagerungsdichte im Boden

Im Rahmen des Versuchsansatzes 3 wurden unterschiedliche Wasser- und Düngerapplikationsformen untersucht und die ober- und unterirdische Tropfschlauchpositionierung verglichen. Zur Analyse von Ursachen der unterschiedlichen Effektivität dieser Bewässerungssysteme wurden im dritten Versuchsjahr 2019 die Feinwurzelverteilung und die Lagerungsdichte im Boden erfasst.

Die methodische Vorgehensweise bei der Untersuchung der Feinwurzeln erfolgte auf Grundlage der Profilwandmethode nach Böhm (1979). Dafür wurden mithilfe eines Mini-baggers zunächst Profilgruben mit einer Breite von 2,0 Metern und einer Tiefe von 1,0 Meter quer zum Verlauf der Pflanzreihen angelegt. Die Anlage erfolgte jeweils zwischen zwei Pflanzen, mit einem Abstand von 30 cm von der zu untersuchenden Pflanze. Die Profilwände wurden anschließend mit einem Spaten gerade abgestochen, geglättet und von überstehenden Wurzeln befreit. Dabei wurde darauf geachtet den aufgeschütteten und aufgrund der sehr locker lagernden Struktur instabilen Damm nicht zu zerstören. Im Anschluss folgte das Freilegen der Feinwurzeln durch Abtragen einer 1,5 bis 2,0 cm starken Bodenschicht. Hierfür wurde Wasser aus einer Feldspritze bei einem Druck von 6 Bar mit einer an einem Schlauch befestigten Düse von oben nach unten auf die Profilwand gesprüht. Mit einem konstruierten Gitterrahmen (2 m x 2 m) bestehend aus 5 cm x 5 cm großen Zählfeldern wurde anschließend die Feinwurzelverteilung durch Zählen der Anzahl an freigelegten Wurzelspitzen je Zählfeld erfasst. Die Erfassung der Feinwurzeln fand im gesamten aufgeschütteten Damm statt, beschränkte sich unterhalb der Bodenoberfläche jedoch auf eine Tiefe von 70 cm. Dabei betrug die Distanz, ausgehend von der Reihenmitte, nach links und rechts jeweils 90 cm. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den im Dammbereich ermittelten Wurzeln nicht ausschließlich um sprossbürtige Sommerwurzeln handelte, da eine Differenzierung dieser nicht möglich war. Neben den Wurzeldaten wurden auch die Lage des Tropfschlauches sowie der Verlauf der Bodenoberfläche festgehalten. Je Versuchsvariante wurden zwei Pflanzen untersucht. Die Auswertung der erfassten Wurzeldaten erfolgte in Microsoft Excel.

Des Weiteren wurden Stechzylinderproben zur Bestimmung der Lagerungsdichte entnommen. Deren Entnahme erfolgte zum einen im aufgeschütteten Damm unterhalb des oberirdisch verlegten Tropfschlauches und zum anderen unterhalb des unterirdischen Schlauches in einer Tiefe von 30 cm ab Bodenoberfläche.

### 4.5.8 <sup>15</sup>N-Tracer-Methode

Um die Verteilung und Recovery (Wiederfindung) von UAN-N zu analysieren erfolgte der Einsatz der <sup>15</sup>N-Tracer-Methode. Dabei orientierte sich die methodische Vorgehensweise an Cabrera und Kissel (1989) sowie Heuwinkel (1999).

Durchgeführt wurden die Untersuchungen im Anbaujahr 2019 im Rahmen des Versuchsansatzes 2 an den Sorten Perle und Herkules des lehmigeren Standortes. Ziel war es den Einfluss des Zeitpunkts der N-Ausbringung auf die Verteilung und Recovery des Stickstoffs zu analysieren. Hierfür wurden bei beiden Sorten die Varianten F6b und F6 mit Applikation von 2/3 der Gesamt-N-Menge über Fertigation ab KW23 bzw. KW25 genutzt (Tab. 4.15). Zu beachten ist dabei, dass bei der Sorte Perle insgesamt 100 kg N ha<sup>-1</sup> und bei der Sorte Herkules 120 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngt wurden (Tab. 4.7). Bei Herkules wurde weiterhin die Variante F6x untersucht, bei welcher die N-Menge auf 180 kg N ha<sup>-1</sup> erhöht wurde. Im Rahmen der Durchführung wurde der <sup>15</sup>N-Gehalt der in KW25 (F6b) bzw. KW27 (F6 und F6x) über Fertigation applizierten N-Gabe auf 2,55 atom% <sup>15</sup>N (at%<sup>15</sup>N) erhöht (Tab. 4.15).

Tab. 4.15: Stickstoffverteilung der Varianten F6b, F6 und F6x der Sorten Perle und Herkules am lehmigen Standort des Versuchsansatzes 2 im Versuchsjahr 2019; Ausbringung des je Kalenderwoche (KW) geplanten Anteils an der Gesamt-N-Menge als Einmalgabe.

KW <sup>1)</sup>	April	Mai		Juni				Juli				August				
	17	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
	[% der auszubringenden Gesamt-N-Menge]															
F6b	33		5,6	11,1	16,7 <sup>a)</sup>	16,7	11,1	5,6								
F6	33				5,6	11,1	16,7 <sup>a)</sup>	16,7	11,1	5,6						
F6x*	33				5,6	11,1	16,7 <sup>a)</sup>	16,7	11,1	5,6						

1) Kalenderwoche; a) Erhöhung des <sup>15</sup>N-Gehalts des gedüngten Stickstoffs auf 2,55 at%; \* Variante F6x nur bei Herkules am lehmigeren Standort mit Erhöhung der Gesamt-N-Menge um 1/3.

Jede Versuchsvariante bestand aus zwei Reihen mit jeweils zwei Parzellen (Abb. 4.2). Unter Berücksichtigung des standortspezifischen Reihenabstands betrug die Gesamtfläche bei beiden Sorten etwa 400 m<sup>2</sup>. Aus Kostengründen erfolgte die <sup>15</sup>N-Ausbringung jedoch nur im Bereich der Ernteparzellen, wodurch die Fläche an beiden Standorten auf etwa 265 m<sup>2</sup> je Variante reduziert werden konnte. Da die Ausbringung des <sup>15</sup>N-angereicherten UAN-N über Fertigation erfolgte, die Reihen einer Variante jedoch nur als Ganzes bewässert und gedüngt werden konnten, war ein Umbau des Tropfbewässerungssystems erforderlich. Dabei wurden vor der Applikation der <sup>15</sup>N-angereicherten N-Gabe

außerhalb der Ernteparzellen Blindschlauchabschnitte eingesetzt, sodass das angereicherte UAN ausschließlich im Bereich der Parzellen appliziert werden konnte. Dieser Flächenanteil wurde als Grundlage für anschließende Berechnungen exakt vermessen. Nach der  $^{15}\text{N}$ -Applikation wurden in den Bereichen der Ernteparzellen Blindschläuche eingesetzt und die verbleibenden Abschnitte der Versuchsreihen wurden mit regulärem UAN gedüngt. Unmittelbar nach Ausbringung dieser N-Gabe wurde der ursprüngliche Zustand des Bewässerungssystems wiederhergestellt.

$^{15}\text{N}$ -Düngeversuche erfordern grundsätzlich einen hohen Rechenaufwand. Auf eine detaillierte Darstellung der einzelnen Rechenschritte wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Die Berechnungen erfolgten in Anlehnung an Cabrera und Kissel (1989) sowie Heuwinkel (1999). Auf Basis der vermessenen Fläche wurden zunächst die tatsächlich benötigten N-Mengen in Gramm je Versuchsvariante berechnet. Die weiteren, darauf aufbauenden Berechnungsschritte, erfolgten unter Berücksichtigung der spezifischen molaren Masse von  $^{14}\text{N}$  und  $^{15}\text{N}$  auf Basis der Stoffmengen. Ausgehend von einer Zielerreichung in Höhe von 2,55 at%  $^{15}\text{N}$  folgte die Ermittlung der benötigten Gesamt-Stoffmenge an  $^{15}\text{N}$ . Da die Ausbringung des Stickstoffs über Fertigation in Form von UAN erfolgte, war es notwendig, den  $^{15}\text{N}$ -Gehalt jeder darin enthaltenen Stickstoffform zu erhöhen. Somit wurde der Gesamtbedarf an  $^{15}\text{N}$  zu 50 % aus Harnstoff, zu 25 % aus Ammonium und zu 25 % aus Nitrat gedeckt. Hierfür wurden die hoch mit  $^{15}\text{N}$  angereicherten Verbindungen  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  und  $\text{KNO}_3$  verwendet. In einem weiteren Schritt wurde auf Basis der berechneten Salz-Mengen mit einer definierten Menge an destilliertem Wasser eine  $^{15}\text{N}$ -Stammlösung hergestellt. Über den aus der Stammlösung entnommenen Anteil wurde ein Teil der insgesamt auszubringenden N-Menge appliziert. Die verbleibende N-Menge wurde durch Herstellung einer zusätzlichen UAN-Lösung aus den Verbindungen Harnstoff und Ammoniumnitrat abgedeckt.

Um die Verteilung des  $^{15}\text{N}$ -angereicherten ausgebrachten Stickstoffs in der oberirdischen Biomasse zu analysieren, wurden regelmäßige Analysen des  $^{15}\text{N}$ -Gehalts in Blatt- und Blüten- bzw. Doldenproben vorgenommen (Tab. 4.16). Für die Entnahme der Proben wurden die drei Höhenabschnitte Unten (1,5 m), Mitte (3,5 m) und Oben (5,5 m) definiert, wobei jeweils eine Differenzierung in Haupt- und Seitentriebe erfolgte. Während die Beprobung von Blättern an Haupt- und Seitentrieben erfolgte, fand die Entnahme von Blüten- bzw. Doldenproben ausschließlich an den Seitentrieben des mittleren und oberen Abschnitts statt. Hinsichtlich der Probennahme ist weiterhin zu beachten, dass die oberen

Seitentriebblätter bei keiner Sorte beprobt werden konnten und die oberen Haupttriebblätter nur beprobt wurden, soweit dadurch keine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums stattfand. Entsprechend der Ernteparzellen wurden je Versuchsvariante vier Wiederholungen durchgeführt. Nach der Beprobung wurde das Blatt-, Blüten- bzw. Doldenmaterial in perforierten Kunststoffbeuteln bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Im Anschluss erfolgte die Zerkleinerung und Homogenisierung des getrockneten Pflanzenmaterials in einer Zentrifugalmühle. In einem Massenspektrometer folgte anschließend die Bestimmung des N<sub>t</sub>- [% in der Trockenmasse] und <sup>15</sup>N-Gehalts [at% der N-Menge]. Auf Basis der analysierten <sup>15</sup>N-Gehalte [%] wurden Delta (δ) <sup>15</sup>N-Werte mit der Einheit Promille berechnet, wodurch beschrieben wird in welchem Umfang die am Standort vorherrschende natürliche <sup>15</sup>N-Anreicherung (N.A. (Natural Abundance) = 0,3679 at%<sup>15</sup>N) überschritten wird.

$$\delta \text{ }^{15}\text{N}[\text{‰}] = [(\text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{Probe}} - \text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{N.A.}}) \div \text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{N.A.}}] * 1000$$

Tab. 4.16: Termine für die Entnahme der Blatt- und Blüten- bzw. Doldenproben.

Variante	26. Juni	6. Juli	9. Juli	23. Juli	9. August	21. August
	[Tage nach der Ausbringung (ndA)]					
F6b	4	-	17	31	48	60
F6	-	1	4	18	35	47
F6x (HS)	-	-	4	18	35	47

<sup>15</sup>N-Ausbringung: F6b am 22. Juni; F6, F6x am 5. Juli

Neben der Untersuchung der Verteilung des ausgebrachten Stickstoffs während der Vegetation wurde an den Ernteterminen am 7. September bei der Sorte Perle bzw. 19. September bei der Sorte Herkules der <sup>15</sup>N-Gehalt im Restpflanzen- und Doldenmaterial bestimmt. Zusätzlich zum regulären Erntetermin erfolgte bei jeder Sorte eine vorzeitige Ernte einzelner Pflanzen, mit dem Ziel die N-Einlagerung in die Speicherwurzeln im Zeitraum kurz vor der Ernte zu untersuchen. Hierfür wurden zwei Pflanzen je Ernteparzelle, bei Perle bereits am 30. August und bei Herkules am 3. September geerntet. Die Entnahme und Aufbereitung der Rebenhäcksel- und Doldenproben für die N-Gehaltsbestimmung erfolgten analog zu der im Kapitel 4.5.2 erläuterten Vorgehensweise. In einem Massenspektrometer erfolgte anschließend die Bestimmung des N<sub>t</sub>- und <sup>15</sup>N-Gehalts. Auf Basis der Analysewerte und der Biomasseergebnisse konnte mit dem Parameter N-Recovery (Auf Basis der Stoffmenge n [mol]) die prozentuale Wiederfindungsrate des im

markierten UAN-N enthaltenen  $^{15}\text{N}$ -Anteils in der oberirdisch gebildeten Biomasse berechnet werden.

$$\text{N-Recovery}[\%] = (n_{\text{Ernte}} * (\text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{Ernte}} - \text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{N.A.}})) \div (n_{\text{UAN}} * (\text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{UAN}} - \text{at}\%^{15}\text{N}_{\text{N.A.}})) * 100$$

Des Weiteren wurden, im Zuge der Untersuchungen zur Verteilung des  $^{15}\text{N}$ -markierten UAN-Stickstoffs, aufgrund der Bedeutung der unterirdischen Überdauerungsorgane für den Wiederaustrieb einer Hopfenpflanze (vgl. 2.1), auch die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der Speicherwurzeln analysiert. Die Probennahme hierfür erfolgte im darauffolgenden Anbaujahr 2020 vor Vegetationsbeginn. Die Vorgehensweise zur Beprobung von Speicherwurzeln wurde unter 4.5.5 erläutert. Die entnommenen Speicherwurzelabschnitte wurden von anhaftender Erde befreit, bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend über ein zweistufiges Verfahren, bestehend aus Schneid- und Zentrifugalmühle, zerkleinert. Anschließend folgte in einem Massenspektrometer die Bestimmung des  $\text{N}_i$ - und  $^{15}\text{N}$ -Gehalts der homogenisierten Proben. Auf Basis der analysierten  $^{15}\text{N}$ -Gehalte [%] wurden  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte berechnet.

## 4.6 Statistische Auswertung

Die Aufbereitung und Auswertung der Versuchsdaten erfolgten über die Computersoftwares „Microsoft Excel 2010“ und „R“, wobei Excel vor allem als Eingabemedium und Tool zur Datenaufbereitung diente. Mit der freien Statistiksoftware „R“ wurde sowohl deskriptive als auch explorative Statistik erarbeitet. Die Signifikanzniveaus zur Verwerfung der Nullhypothesen wurden wie folgt festgelegt (R Core Team, 2020):

- > 0,05            Nicht signifikant (n.s.)
- 0,05 – 0,01      Signifikant (\*)
- 0,01 – 0,001    Hoch signifikant (\*\*)
- < 0,001          Sehr hoch signifikant (\*\*\*)

Zunächst erfolgte unter Berücksichtigung, dass die Voraussetzungen Normalverteilung und Varianzhomogenität für die Durchführung einer Varianzanalyse (ANOVA) gegeben sind, eine varianzanalytische Auswertung der Daten (Janczyk und Pfister, 2019). Dabei wurde geprüft, ob signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten einzelner Versuchsvarianten bestanden. Aufgrund der unter 4.4.3 erläuterten Besonderheiten bei der Anlage von Feldversuchen in Hopfenfeldern und dem daraus resultierenden

Anlageschema der Feldversuche (Abb. 4.2) war es nicht möglich, eine varianzanalytische Auswertung mit vier vollständig randomisierten Blöcken vorzunehmen. Bei dem genutzten Anlageschema handelt es sich um zwei getrennt voneinander randomisierte Blöcke, in welchen jeweils eine Messwiederholung durchgeführt wurde. Aus statistischer Sicht wurden diese Gegebenheiten durch die Anwendung einer „Repeated Measures Analysis of Variance“ berücksichtigt. Eine Auswertung mit vier echten Wiederholungen wäre nur durch starke Unterschiede zwischen den Wiederholungen, z. B. aufgrund von Bodenheterogenität zu rechtfertigen gewesen (Thomas, 2006). Im nachfolgenden Ergebnisteil wird die reale Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert) der Varianzanalyse ausgewiesen. Wurde im Rahmen der Varianzanalyse ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten ermittelt, folgte anschließend ein Tukey-Post-Hoc-Test um zu untersuchen, welche Mittelwerte sich signifikant voneinander unterscheiden. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass sich Werte mit gleichen Buchstaben nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Des Weiteren wurden, um Einflüsse auf eine abhängige Variable aufzudecken, lineare Regressionsmodelle eingesetzt. Dabei gibt die Steigung der Regressionsgeraden eines linearen Modells an, ob der Einfluss auf die abhängige Variable positiv oder negativ ist. Über das sogenannte Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) wird beschrieben, welcher Anteil der Varianz der abhängigen Variable durch die erklärende Variable beschrieben werden kann (Janczyk und Pfister, 2019). Ziel ist es, einen möglichst hohen Anteil der Varianz durch das Modell erklären zu können.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Versuchsansatz 1 – Zeitpunkt & Höhe der N-Düngung

Die Feldversuche des Versuchsansatzes 1 dienten der Untersuchung der Auswirkungen eines zeitlich und mengenmäßig variierten N-Angebots (vgl. 4.4.2.1). Dabei wurden auch der Verlauf der Biomassebildung sowie die N-Aufnahme analysiert.

#### 5.1.1 Entwicklungsverlauf und Habitus

Im Anbaujahr 2017 entwickelte sich der Pflanzenbestand der Sorte Perle (V1\_PE\_17) bis Ende Juni zunächst sortentypisch. Im Anschluss führte eine bis Ende Juli stärker werdende Trockenperiode im weiteren Verlauf zu einer deutlichen Einschränkung des Pflanzenwachstums, wobei keine Unterschiede innerhalb der Versuchsfläche zu erkennen waren. Eine optische Differenzierung des Habitus in Abhängigkeit von der N-Düngung konnte zu keinem Zeitpunkt festgestellt werden. Am Standort der Sorte Herkules (V1\_HS\_17) wurden zwar optische Unterschiede in Abhängigkeit der N-Düngung beobachtet, jedoch wies der Pflanzenbestand eine hohe Heterogenität auf. Nach Neuanlage der Feldversuche zu Beginn des zweiten Versuchsjahres (2018) zeigte der Pflanzenbestand der Sorte Tradition im Jahr 2018 eine deutlich verfrühte Entwicklung. Des Weiteren führte die ab Ende Juli stark ausgeprägte Trockenheit in Kombination mit hohen Temperaturen zu einer Einschränkung des sortentypischen Wachstumsverlaufs, vor allem der Doldenausbildung. Der Entwicklungsverlauf der Sorte Herkules (V1\_HS\_18) hingegen verlief im Jahr 2018 sortentypisch und wurde nicht durch die hohen Frühjahrstemperaturen beeinflusst. Außerdem wirkte sich die im August aufgetretene Trockenheit, aufgrund der oberirdischen Zusatzbewässerung, bei Herkules optisch nicht auf das Pflanzenwachstum aus. Im dritten Versuchsjahr 2019 führten, bei ansonsten sortentypischem Entwicklungsverlauf, niedrige Temperaturen im Mai sowohl bei Tradition (V1\_HT\_19), als auch bei Herkules (V1\_HS\_19) zu einer Verzögerung der Pflanzenentwicklung im Frühjahr. Des Weiteren wurde bei beiden Sorten, während der Phase des Austriebs, eine verringerte Vitalität und Wuchskraft der im Vorjahr 2018 im Vergleich zu N6 reduziert gedüngten Pflanzen (N1 bis N5) beobachtet. Diese Pflanzen zeigten dann im weiteren Wachstumsverlauf im Vergleich zum Vorjahr 2018 auch ein geringeres N-Versorgungsniveau. Unabhängig von der Sorte konnte in jedem Jahr vor allem bei nicht mit Stickstoff

gedüngten Pflanzen (N1) aber auch bei mit zwei Drittel der gesamten N-Menge gedüngten (N5) eine beschleunigte Reife beobachtet werden, sodass an den Dolden bis zum regulären Erntetermin bereits eine Braunverfärbung der Doldenblätter eintrat (Abb. 5.1). Dieser Effekt verringerte sich mit zunehmender Höhe der N-Düngung. Speziell bei der Sorte Herkules (V1\_HS\_18/19) ist darauf hinzuweisen, dass auch die mit  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten Pflanzen (N5) ein beschleunigtes Reifeverhalten zeigten. Dabei wurde auch eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Spätmehltaubefall (*Podosphaera macularis*) beobachtet. Des Weiteren führte die Reduktion der N-Düngung ab Ende Juli bis zum Erreichen der Erntereife zu einer sichtbaren und zunehmenden Aufhellung des Pflanzenbestands.

Sowohl im Anbaujahr 2018, als auch 2019 wurde an beiden untersuchten Sorten eine Beeinflussung des Habitus der Pflanzen durch die Variation der N-Düngung festgestellt. Der Habitus einer Hopfenpflanze wird vor allem durch die Anzahl und Länge der Seitentriebe bestimmt (vgl. 2.3.1). Wurde kein Stickstoff gedüngt (N1), reduzierte sich das Längenwachstum der in den Blattachseln angelegten Seitentriebe über die gesamte Pflanzenlänge deutlich, wobei die Ausbildung vor allem im untersten Rebenabschnitt zum Teil vollständig eingestellt wurde (Abb. 5.2). Im Gegensatz dazu führte eine zunehmende Steigerung der N-Düngung zu stärkerem Wachstum der Triebe. Die Ausbringung einzelner N-Gaben zu den Zeitpunkten Ende April (N2), Ende Mai (N3) bzw. Anfang Juli (N4) führte zu einer zunehmenden Verlagerung der Seitentriebausbildung in den Kopfbereich der Pflanzen je später die Applikation erfolgte. Dabei wurde an den bereits Ende April gedüngten Pflanzen zwar eine Ausbildung der Seitentriebe des untersten Rebenabschnitts beobachtet, nicht jedoch im Kopfbereich. Erfolgte eine Steigerung der N-Düngung auf zwei Drittel der berechneten Gesamt-N-Menge (N5) zeigte sich im Vergleich zur Applikation von drei Drittel kein veränderter Habitus (Abb. 5.2).



Abb. 5.1: Braunverfärbung der Doldenblätter bei Reduktion der N-Menge am Beispiel der Sorte Herkules im Versuchsjahr 2018 – Vergleich von  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  (N5) und  $180 \text{ kg N ha}^{-1}$  (N6).

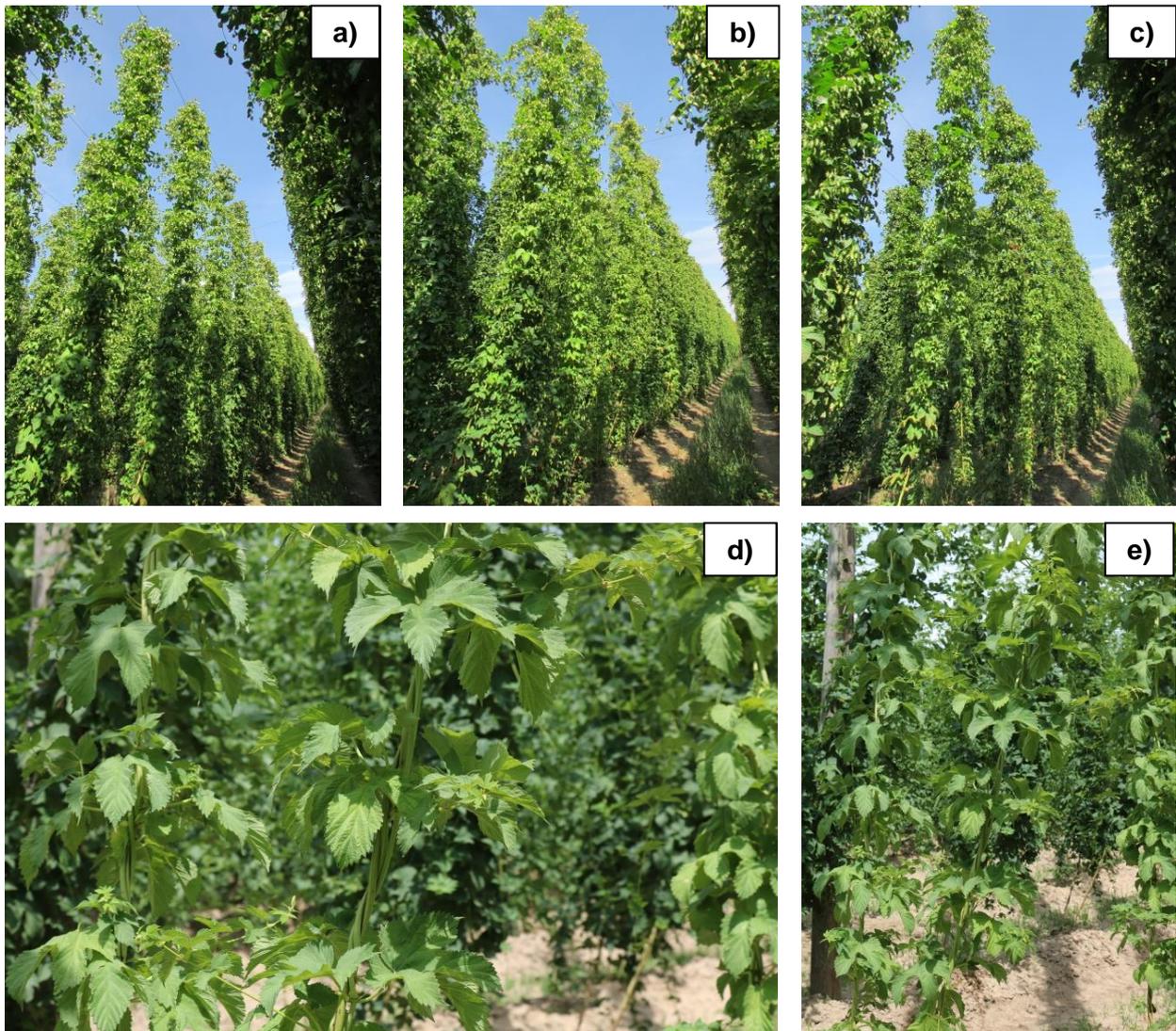


Abb. 5.2: Reduktion des Längenwachstums der Seitentriebe (d, e) und Beeinflussung des Habitus in Abhängigkeit des Zeitpunkts der N-Applikation: a) N2 – Nur I. N-Gabe, b) N3 – Nur II. N-Gabe, c) N4 – Nur III. N-Gabe.

### 5.1.2 Doldenertrag und Alphasäuregehalt

Die Sorte Herkules reagierte am Standort des Versuchsjahres 2017 auf eine Düngung mit Stickstoff (N2 bis N6) im Vergleich zur Kontrolle (N1) tendenziell mit einem höheren Doldenertrag (Tab. 5.1). Dabei ist zu beachten, dass keine statistische Absicherung der Unterschiede möglich war. Erfolgte Ende April (N2) bzw. Ende Mai (N3) eine Düngung mit 63 kg N ha<sup>-1</sup> in Form von KAS führte dies im Vergleich zu nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (N1) zu einer Ertragssteigerung, wohingegen durch die Applikation derselben N-Menge Ende Mai in Form von AHL (N3a) kaum ein Mehrertrag erzielt wurde. Eine Verdoppelung der N-Düngung auf 126 kg N ha<sup>-1</sup> durch Ausbringung einer ersten und zweiten N-Gabe (N5) bewirkte keinen weiteren Ertragszuwachs, wohingegen der Doldenertrag bei einer Erhöhung um ein weiteres Drittel auf 190 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) geringfügig anstieg. Die Steigerung der N-Düngung von 63 (N2) auf 126 (N5) und 190 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) führte jedoch gleichzeitig zu einer signifikanten Verringerung des Alphasäuregehalts (Tab. 5.1).

Am Versuchsstandort mit der Sorte Perle wurde im Jahr 2017 durch die Ausbringung von 57 bis 170 kg N ha<sup>-1</sup> weder der Doldenertrag noch der Alphasäuregehalt beeinflusst (Tab. 5.1).

Tab. 5.1: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung.

Variante	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	HS	p=0,188 n.s.	PE	p=0,86 n.s.	HS	p<0,001 ***	PE	p=0,481 n.s.
N1	3.650		2.225		18,4	ab	7,8	
N2	3.883		2.241		19,1	a	7,8	
N3	3.920		2.329		18,0	bc	7,5	
N3a	3.738		2.228		18,0	bc	7,6	
N5	3.965		2.170		17,8	bc	7,9	
N6	4.276		2.305		17,2	c	8,0	

Zu Beginn des Jahres 2018 erfolgte eine Neuanlage der Feldversuche des Versuchsansatzes 1. Eine Düngung mit Stickstoff (N2 bis N6) führte in den Jahren 2018 und 2019 im Vergleich zu nicht gedüngten Pflanzen (N1) sowohl bei der Sorte Herkules, als auch Tradition zu einer Steigerung des Doldenertrags (Tab. 5.2). Dabei ist zu beachten, dass sich

das Ertragsniveau der zweijährig nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (N1) im Jahr 2019 im Vergleich zu 2018 bei Herkules um 35,7 % und bei Tradition um 40,1 % reduzierte.

Die Applikation von 60 kg N ha<sup>-1</sup> zum Zeitpunkt Ende April (N2) bzw. Ende Mai (N3) führte bei der Sorte Herkules zu einem Ertragsanstieg in Höhe von 35,5 bzw. 41 % im Jahr 2018 und 73,2 bzw. 82,9 % im Jahr 2019 (Tab. 5.2). Erfolgte die Ausbringung derselben N-Menge hingegen erst Anfang Juli (N4), fiel der Ertragszuwachs mit 26 bzw. 37,5 % in beiden Versuchsjahren geringer aus. Die Differenzierung der unterschiedlichen Düngetermine verstärkte sich im Versuchsjahr 2019. Eine Steigerung der N-Düngung auf 120 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) durch Ausbringung von zwei N-Gaben zu je 60 kg N ha<sup>-1</sup> (Ende April und Ende Mai) führte im Vergleich zu N2 zu einem Anstieg des Doldenertrags um 15,4 % im Jahr 2018 und 30,9 % im Jahr 2019. Erfolgte eine zusätzliche Erhöhung auf 180 kg N ha<sup>-1</sup> durch Ausbringung einer dritten Gabe Anfang Juli (N6) konnte hingegen in keinem Versuchsjahr ein weiterer Ertragsanstieg verzeichnet werden. Stattdessen führte die Erhöhung der N-Düngung im Jahr 2018 tendenziell zu verringerten Alphasäuregehalten, wobei eine statistische Absicherung der Unterschiede nicht möglich war (Tab. 5.2). Diese Tendenz wurde durch die Ergebnisse des Versuchsjahres 2019 bestätigt. Durch eine Steigerung der N-Düngung von 120 kg ha<sup>-1</sup> (N5) auf 180 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) reduzierte sich der Alphasäuregehalt signifikant. Weiterhin führte auch die ausschließliche Applikation von 60 kg N ha<sup>-1</sup> Anfang Juli (N4) zu einer Verringerung des Alphasäuregehalts.

Die Sorte Tradition reagierte im Versuchsjahr 2018 auf die Ausbringung von 50 kg N ha<sup>-1</sup> zu unterschiedlichen Zeitpunkten (N2 bis N4) im Mittel mit einem um 20 % höheren Doldenertrag, wobei der Ausbringzeitpunkt keinen Einfluss hatte (Tab. 5.2). Im Versuchsjahr 2019 hingegen führte eine Düngung in Höhe von 50 kg N ha<sup>-1</sup>, ausgebracht Ende April (N2), zu einem Mehrertrag von 46,9 % im Vergleich zur Kontrolle N1. Durch eine spätere Applikation derselben N-Menge (N3, N4) verringerte sich der Ertragsanstieg jeweils. Eine Steigerung der N-Düngung auf 100 kg ha<sup>-1</sup> (N5) durch Ausbringung einer zweiten Gabe Ende Mai bewirkte weder im Jahr 2018 noch 2019 im Vergleich zu N2 einen weiteren Ertragszuwachs. Wurde hingegen zusätzlich eine dritte N-Gabe in Höhe von 50 kg N ha<sup>-1</sup> zum Zeitpunkt Anfang Juli gedüngt und die N-Düngung dadurch auf insgesamt 150 kg N ha<sup>-1</sup> gesteigert (N6), erhöhte sich der Doldenertrag in beiden Versuchsjahren.

Tab. 5.2: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.

2018	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	HS	p<0,001 ***	HT	p=0,062 n.s.	HS	p=0,251 n.s.	HT	p=0,115 n.s.
N1	2.501	d	1.873		15,5		5,0	
N2	3.384	c	2.293		16,2		5,1	
N3	3.529	bc	2.234		16,5		5,0	
N4	3.145	c	2.245		16,1		4,6	
N5	3.904	ab	2.237		15,9		5,1	
N6	4.006	a	2.561		15,7		4,8	

2019	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***	HS	p<0,001 ***	HT	p=0,727 n.s.
N1	1.844	d	1.337	c	17,2	c	5,3	
N2	3.193	b	1.964	ab	18,2	abc	5,3	
N3	3.372	b	1.618	bc	18,8	ab	5,3	
N4	2.535	c	1.699	bc	17,7	bc	5,0	
N5	4.180	a	1.927	ab	18,9	a	5,3	
N6	4.158	a	2.219	a	17,4	c	5,3	

### 5.1.3 Restpflanzen- und Gesamtbiomasse

Die Sorte Herkules reagierte am Standort des Versuchsjahres 2017 auf eine Düngung mit Stickstoff (N2 bis N6) im Vergleich zur Kontrolle (N1) nicht nur mit einem höheren Doldenertrag, sondern auch mit einer höheren Restpflanzenbiomasse (Tab. 5.3). Eine statistische Absicherung der Unterschiede zwischen den Varianten war nicht möglich, jedoch sind die Effekte mit denen des Doldenertrags vergleichbar (vgl. 5.1.2). Bei der Sorte Perle beeinflusste die N-Düngung im Jahr 2017 weder die Restpflanzen- noch die Gesamt-Biomasse (Tab. 5.3).

Tab. 5.3: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlere Restpflanzen- und Gesamt-Biomasse als Trockenmasse (TM) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung.

Variante	Restpflanze TM [t ha <sup>-1</sup> ]				Gesamt-TM [t ha <sup>-1</sup> ]			
	HS	p=0,099 n.s.	PE	p=0,93 n.s.	HS	p=0,132 n.s.	PE	p=0,962 n.s.
N1	4,1		4,0		7,4		6,0	
N2	4,3		3,9		7,8		5,9	
N3	4,6		3,9		8,1		6,0	
N3a	4,1		3,9		7,5		5,9	
N5	4,5		4,0		8,0		6,0	
N6	4,9		4,0		8,7		6,1	

In den Jahren 2018 und 2019 führte eine Düngung mit Stickstoff (N2 bis N6) im Vergleich zu nicht gedüngten Pflanzen (N1) sowohl bei der Sorte Herkules, als auch Tradition zu einer signifikanten Steigerung der Restpflanzen- und Gesamt-biomasse (Tab. 5.4). Dabei zeigte sich, wie bereits beim Doldenertrag, dass sich die Biomassebildung zweijährig nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (N1) im Jahr 2019 im Vergleich zu 2018 unabhängig von der Sorte reduzierte.

Bei der Sorte Herkules sind die Auswirkungen der N-Düngung und die Unterschiede zwischen den N-Düngevarianten hinsichtlich der Restpflanzenbiomasse in beiden Jahren mit denen des Doldenertrags vergleichbar (vgl. 5.1.2). Auffällig im Jahr 2018 ist, dass die Variante N4 mit Ausbringung von 60 kg N ha<sup>-1</sup> Anfang Juli im Vergleich zu N1 eine um 15,7 % höhere Restpflanzenbiomasse erreichte, die Gesamt-Biomasse jedoch um 21,6 % zunahm (Tab. 5.4).

Bei der Sorte Tradition zeigte sich sowohl im Jahr 2018 als auch 2019, dass die Verschiebung des Ausbringzeitpunkts einer einzelnen N-Gabe in Höhe von 50 kg N ha<sup>-1</sup> von Ende April (N2) auf Ende Mai (N3) bzw. Anfang Juli (N4) jeweils zu einer Verringerung der Restpflanzenbiomasse führte (Tab. 5.4). Wie bereits die Ergebnisse des Doldenertrags aufzeigten (vgl. 5.1.2), erhöhte sich die Biomassebildung durch Steigerung der N-Düngung von 50 (N2) auf 100 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) nicht, wohingegen eine Erhöhung auf 150 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) eine Zunahme zur Folge hatte.

Tab. 5.4: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlere Restpflanzen- und Gesamt-Biomasse als Trockenmasse (TM) der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.

2018	Restpflanze TM [t ha <sup>-1</sup> ]				Gesamt-TM [t ha <sup>-1</sup> ]			
	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***
N1	3,1	d	3,4	c	5,3	e	5,1	b
N2	4,2	bc	4,8	ab	7,2	cd	6,8	a
N3	4,4	ab	4,3	b	7,6	bc	6,3	ab
N4	3,6	cd	4,1	bc	6,4	d	6,2	ab
N5	4,9	a	4,7	ab	8,4	b	6,7	a
N6	4,9	a	5,2	a	8,5	ab	7,5	a

2019	Restpflanze TM [t ha <sup>-1</sup> ]				Gesamt-TM [t ha <sup>-1</sup> ]			
	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***
N1	2,2	d	2,4	c	3,9	d	3,6	b
N2	3,8	b	3,6	b	6,7	b	5,4	b
N3	4,2	b	3,0	bc	7,2	b	4,5	c
N4	3,0	c	2,6	c	5,3	c	4,2	cd
N5	5,5	a	3,7	b	9,2	a	5,4	b
N6	5,4	a	4,6	a	9,2	a	6,5	a

#### 5.1.4 Stickstoffgehalt

Im Versuchsjahr 2017 führte eine Düngung mit Stickstoff (N2 bis N6) am Standort der Sorte Herkules, im Vergleich zur Kontrolle (N1), tendenziell zu einem höheren N-Gehalt in der Restpflanze und den Dolden (Tab. 5.5). Dabei erreichten die mit 190 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) gedüngten Pflanzen die höchsten N-Gehalte. Hingegen zeigten die unterschiedlichen N-Düngevarianten bei der Sorte Perle grundsätzlich keine Differenzierung, nur bei nicht mit Stickstoff gedüngten Kontrollpflanzen (N1) lagen die N-Gehalte tendenziell auf einem niedrigeren Niveau.

Ein Vergleich der Sorten zeigt auf, dass das Niveau der N-Gehalte bei der Sorte Perle unabhängig von der Höhe und dem Zeitpunkt der N-Düngung sowohl im Restpflanzenmaterial, als auch in den Dolden über dem der Sorte Herkules lag.

Tab. 5.5: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung.

Variante	Restpflanze [% N i. d. TM]				Dolden [% N i. d. TM]			
	HS	p=0,008 **	PE	p=0,081 n.s.	HS	p<0,001 ***	PE	p=0,081 n.s.
N1	1,40	b	2,02		2,48	c	3,19	
N2	1,48	b	2,30		2,53	bc	3,24	
N3	1,69	ab	2,29		2,63	bc	3,40	
N3a	1,55	ab	2,31		2,68	bc	3,29	
N5	1,60	ab	2,36		2,79	ab	3,32	
N6	1,78	a	2,40		3,00	a	3,40	

In den Versuchsjahren 2018 und 2019 führte eine Düngung mit Stickstoff (N2 bis N6) nicht grundsätzlich zu höheren N-Gehalten im Pflanzenmaterial (Restpflanze und Dolden), stattdessen bestand eine Abhängigkeit vom Zeitpunkt und der Höhe der N-Düngung (Tab. 5.6).

Die Sorte Herkules reagierte im Jahr 2019 auf die Verschiebung des Ausbringzeitpunkts einer einzelnen N-Gabe in Höhe von 60 kg N ha<sup>-1</sup> von Ende April (N2) auf Ende Mai (N4) bzw. Anfang Juli (N4) jeweils mit steigenden N-Gehalten im Pflanzenmaterial (Tab. 5.6). Während die N-Gehalte (Restpflanze und Dolden) der Variante N4 im Jahr 2019 signifikant über denen von N2 und N3 lagen, zeigte sich im Jahr 2018 lediglich eine Tendenz in den Dolden (Tab. 5.6). Durch eine Steigerung der N-Düngung von 60 (N2) auf 120 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) wurde zwar in beiden Versuchsjahren ein Anstieg der N-Gehalte im Pflanzenmaterial erfasst, erfolgte jedoch eine weitere Erhöhung auf 180 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) fiel der Anstieg deutlich stärker aus.

Bei der Sorte Tradition erreichten die mit 150 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Pflanzen (N6) in beiden Jahren sowohl in der Restpflanze, als auch den Dolden die höchsten N-Gehalte (Tab. 5.6). Eine Reduktion der N-Düngung auf 120 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) führte in beiden Fraktionen zu einer Verringerung des N-Gehalts. Im Gegensatz zur Sorte Herkules ergaben sich durch die Verschiebung des Ausbringzeitpunkts bei Tradition keine eindeutigen N-Gehaltsunterschiede.

Tab. 5.6: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.

2018	Restpflanze [% N i. d. TM]				Dolden [% N i. d. TM]			
	HS	p<0,001 ***	HT	p=0,013 *	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***
N1	1,28	b	1,72	b	2,30	c	2,20	d
N2	1,25	b	1,85	ab	2,36	c	2,39	bcd
N3	1,36	b	1,69	b	2,37	c	2,31	cd
N4	1,39	b	1,79	ab	2,45	bc	2,50	bc
N5	1,47	b	1,79	ab	2,68	ab	2,57	b
N6	1,81	a	1,99	a	2,95	a	2,86	a

2019	Restpflanze [% N i. d. TM]				Dolden [% N i. d. TM]			
	HS	p<0,001 ***	HT	p=0,017 *	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***
N1	1,17	c	1,63	b	2,12	d	1,94	c
N2	1,18	c	1,68	b	2,18	d	2,11	bc
N3	1,31	c	1,68	b	2,37	cd	2,22	b
N4	1,57	b	1,78	ab	2,73	b	2,24	b
N5	1,31	c	1,84	ab	2,44	c	2,29	b
N6	1,76	ab	1,96	a	3,05	a	2,52	a

### 5.1.5 Stickstoffentzug

Die Ergebnisse des Versuchsjahres 2017 zeigen, dass bei der Sorte Herkules mit durchschnittlich 58 % mehr als die Hälfte des gesamten N-Entzugs in den Dolden enthalten war, wohingegen dieser Anteil bei Perle nur 43 % betrug (Tab. 5.7).

Erfolgte bei der Sorte Herkules am Standort des Jahres 2017 eine Steigerung der N-Düngung von 0 (N1) auf 63 (N2), 126 (N5) und 190 kg N ha<sup>-1</sup> (N6), stieg die über die gesamte Pflanze entzogene N-Menge jeweils an (Tab. 5.7). Jedoch entzogen gedüngte Pflanzen im Vergleich zu nicht gedüngten (N1) maximal um 63 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) mehr Stickstoff. Eine Betrachtung des Einflusses des Zeitpunkts der N-Applikation zeigt, dass der Düngetermin Ende Mai (N3) tendenziell zu einem höheren N-Entzug als die Ausbringung Ende April (N2) führte.

Auch bei der Sorte Perle führte eine Düngung mit Stickstoff (N2 bis N6) im Jahr 2017 tendenziell zu einem Anstieg des N-Entzugs. Die maximale Steigerung betrug 24 kg N ha<sup>-1</sup> und wurde bei Ausbringung von 170 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) erreicht (Tab. 5.7).

Tab. 5.7: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze und Anteil der Dolden am Gesamt-N-Entzug der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung.

Variante	N-Entzug [kg ha <sup>-1</sup> ]				Anteil Dolden [%]	
	HS	p<0,001 ***	PE	P=0,397 n.s.	HS	PE
N1	139	b	144		58	44
N2	152	b	155		58	42
N3	169	ab	161		55	44
N3a	154	b	155		58	43
N5	171	ab	160		58	41
N6	202	a	168		57	42

In den Jahren 2018 und 2019 bestätigte sich die Beobachtung des ersten Versuchsjahres 2017, dass bei der Sorte Herkules mehr als 50 % der insgesamt entzogenen N-Menge in den Dolden enthalten ist (Tab. 5.8). Hingegen lag der Anteil der Dolden bei der Sorte Tradition wie auch bei Perle mit 36 bis 42 % unter 50 %. Eine Beeinflussung dieses Verhältnisses in Abhängigkeit vom Zeitpunkt und der Höhe der N-Düngung wurde nicht festgestellt. Eine Düngung mit Stickstoff (N2 bis N6) führte sowohl bei der Sorte Herkules als auch Tradition in beiden Versuchsjahren (2018, 2019) zu einer signifikanten Steigerung des N-Entzugs im Vergleich zur Kontrolle N1 (Tab. 5.8). Dabei reduzierte sich der N-Entzug der zweijährig nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (N1) im Versuchsjahr 2019 bei beiden Sorten. Im Gegensatz zur Sorte Herkules fand die Reduktion des N-Entzugs bei Tradition auch bei Ausbringung von 50, 100 oder 150 kg N ha<sup>-1</sup>, unabhängig vom Zeitpunkt und der Höhe der N-Düngung statt.

Bei der Sorte Herkules führte eine Erhöhung der N-Düngung von 0 (N1) auf 60 (N2), 120 (N5) und 180 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) in beiden Versuchsjahren jeweils zu einer signifikanten Steigerung des N-Entzugs (Tab. 5.8). Dabei entzogen die Pflanzen der Variante N6 im Vergleich zu N5 um 29 (2018) bzw. 46 kg N ha<sup>-1</sup> (2019) mehr Stickstoff. Wurden nur 60 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngt, zeigte sich ebenfalls in beiden Versuchsjahren, dass bei Ausbringung des Stickstoffs Ende Mai (N3) tendenziell der höchste N-Entzug erreicht wurde, wohingegen sich die Düngetermine Ende April (N2) und Anfang Juli (N4) kaum unterschieden.

Eine Steigerung der N-Düngung von 0 auf 50 kg N ha<sup>-1</sup> (N2) und von 100 (N5) auf 150 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) führte bei der Sorte Tradition in beiden Jahren zu einer Erhöhung des N-Entzugs (Tab. 5.8). Wurde die N-Düngemenge hingegen von 50 (N2) auf 100 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) erhöht, konnte im Jahr 2018 kein und in 2019 nur ein geringer Anstieg des N-Entzugs gemessen werden. Ein Vergleich der mit 50 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Varianten (N2 bis N4) zeigt in beiden Jahren, dass durch die Ausbringung des Stickstoffs zum Zeitpunkt Ende April (N2) tendenziell höhere N-Entzüge als bei den Terminen Ende Mai (N3) und Anfang Juli (N4) erreicht wurden.

Tab. 5.8: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze und Anteil der Dolden am Gesamt-N-Entzug der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.

2018	N-Entzug [kg ha <sup>-1</sup> ]				Anteil Dolden [%]	
	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***	HS	HT
N1	92	d	96	c	57	39
N2	124	c	137	ab	58	36
N3	136	c	119	bc	55	39
N4	119	c	125	bc	58	40
N5	166	b	136	ab	57	38
N6	195	a	169	a	54	39
2019	N-Entzug [kg ha <sup>-1</sup> ]				Anteil Dolden [%]	
	HS	p<0,001 ***	HT	p<0,001 ***	HS	HT
N1	62	d	62	d	57	37
N2	108	c	98	bc	58	38
N3	127	c	83	c	57	39
N4	110	c	81	cd	57	42
N5	164	b	108	b	56	37
N6	210	a	140	a	54	36

### 5.1.6 Apparente Stickstoffausnutzung und Stickstoffeffizienz

Am Versuchsstandort der Sorte Herkules des Jahres 2017 führte eine Steigerung der N-Düngung von 63 (N2) auf 126 (N5) und 190 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) tendenziell zu einer Erhöhung der prozentualen Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs (Tab. 5.9). Bei der Sorte Perle hingegen lag die apparente N-Ausnutzung höher gedüngter Pflanzen auf einem niedrigeren Niveau. Weiterhin wurde durch den eingesetzten Stickstoff, unabhängig von der Höhe der N-Düngemenge, kein Mehrertrag (N-Effizienz) erzielt. Ein Vergleich der Düngetermine zeigt auf, dass die Ausbringung Ende Mai (N3) im Vergleich zu Ende April (N1) bei beiden Sorten tendenziell zu einer verbesserten Ausnutzung sowie erhöhten Effizienz des eingesetzten Stickstoffs führte.

Tab. 5.9: Versuchsserie 1 – Jahr 2017: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit der N-Düngung.

Variante	Apparente N-Ausnutzung [%]				N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	HS	p=0,141 n.s.	PE	p=0,708 n.s.	HS	p=0,825 n.s.	PE	p=0,644 n.s.
N1								
N2	19		20		3,7		0,3	
N3	48		30		4,3		1,8	
N3a	24		20		1,4		0,1	
N5	25		14		2,5		-0,5	
N6	33		14		3,3		0,5	

Ein Vergleich der Ergebnisse der Versuchsjahre 2018 und 2019 zeigt auf, dass bei der Sorte Herkules sowohl die apparente N-Ausnutzung, als auch die N-Effizienz in 2019 nach zweijähriger Versuchsdurchführung unabhängig vom Zeitpunkt und der Höhe der N-Düngung ein höheres Niveau erreichten (Tab. 5.10). Bei der Sorte Tradition hingegen konnte diese Beobachtung nicht gemacht werden. Weiterhin lag die Ertragsbildung der Sorte Herkules je ausgebrachtem Kilogramm Stickstoff in beiden Jahren über der von Tradition.

Eine Steigerung der N-Düngung von 60 auf 120 bzw. 180 kg N ha<sup>-1</sup> führte bei der Sorte Herkules in beiden Jahren tendenziell zu einer Verbesserung der apparenten N-Ausnutzung, wohingegen sich der gebildete Mehrertrag je Kilogramm Stickstoff zunehmend verringerte (Tab. 5.10). Eine Betrachtung der unterschiedlichen Ausbringetermine von 60 kg

N ha<sup>-1</sup> (N2 bis N4) zeigt auf, dass die Applikation des Stickstoffs Ende Mai (N3) in beiden Versuchsjahren tendenziell zur höchsten apparenten N-Ausnutzung sowie Ertragsbildung je Kilogramm Stickstoff (N-Effizienz) führte. Durch die ausschließliche Applikation von Stickstoff Anfang Juli (N4) verringerte sich vor allem der gebildete Mehrertrag.

Bei der Sorte Tradition reduzierten sich die apparente N-Ausnutzung und N-Effizienz bei Erhöhung der N-Düngung von 50 (N2) auf 100 kg N ha<sup>-1</sup> (N5), wohingegen sich die Steigerung von 100 (N5) auf 150 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) in beiden Jahren tendenziell positiv auswirkte (Tab. 5.10). Weiterhin konnte in beiden Versuchsjahren beobachtet werden, dass bei Ausbringung von 50 kg N ha<sup>-1</sup> (N2 bis N4) durch die Applikation Ende April (N2) die höchste Ausnutzung und Effizienz des eingesetzten Stickstoffs erreicht werden.

Tab. 5.10: Versuchsserie 1 – Jahre 2018 und 2019: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.

2018	Apparente N-Ausnutzung [%]				N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	HS	p=0,274 n.s.	HT	p=0,184 n.s.	HS	p=0,038 *	HT	p=0,503 n.s.
N1								
N2	54		84		14,7	ab	8,4	
N3	75		46		17,1	a	7,2	
N4	46		59		10,7	ab	7,4	
N5	62		40		11,7	ab	3,6	
N6	58		49		8,4	b	4,6	
2019	Apparente N-Ausnutzung [%]				N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	HS	p=0,099 n.s.	HT	p=0,009 **	HS	p=<0,001 ***	HT	p=0,046 *
N1								
N2	77		70	a	22,5	a	12,5	a
N3	109		41	b	25,5	a	5,6	b
N4	80		37	b	11,5	c	7,2	b
N5	85		45	b	19,5	ab	5,9	b
N6	82		51	ab	12,9	bc	5,9	b

### 5.1.7 Nmin-Gehalte

An beiden Versuchsstandorten des Jahres 2017 weisen die im Frühjahr erfassten mittleren Nmin-Gehalte auf einen Vorrat an mineralisiertem Stickstoff im Boden hin (Tab. 5.11). Weiterhin gibt das hohe Niveau der Nmin-Gehalte der Variante N6 im Herbst nach der Ernte im Vergleich zu nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (N1) an, dass der ausgebrachte Stickstoff nicht vollständig von den Pflanzen genutzt wurde. An den Versuchsstandorten der Jahre 2018 und 2019 lagen die Nmin-Gehalte im Frühjahr jeweils auf einem niedrigen Niveau. Im Feldversuch V1\_HS\_18/19 führte eine N-Düngung mit 180 kg N ha<sup>-1</sup> im Vergleich zu nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (N1) im Herbst nach der Ernte in beiden Anbaujahren zu erhöhten Nmin-Gehalten im Boden. Am Standort der Sorte Tradition, wo in Variante N6 150 kg N ha<sup>-1</sup> ausgebracht wurden, zeigte sich dies nur im Versuchsjahr 2019.

Tab. 5.11: Nmin-Gehalte im Boden (0 bis 90 cm) an den Standorten des Versuchsansatzes 1 zu Beginn & Ende Vegetationsperiode (Frühjahr und Herbst).

		[kg N ha <sup>-1</sup> ]							
		V1_PE_17		V1_HS_17		V1_HT_18/19		V1_HS_18/19	
	Zeitpunkt	N1	N6	N1	N6	N1	N6	N1	N6
<b>2017</b>	Frühjahr	79	79	73	73	-	-	-	-
	Herbst	34	90	47	115	-	-	-	-
<b>2018</b>	Frühjahr	-	-	-	-	35	35	50	50
	Herbst	-	-	-	-	27	32	37	60
<b>2019</b>	Frühjahr	-	-	-	-	36	40	40	41
	Herbst	-	-	-	-	41	62	42	60

### 5.1.8 Stickstoffgehalt in Speicherwurzeln und Austrieb

Am Standort der Sorte Herkules erfolgte zu Beginn des Versuchsjahres 2019 eine Untersuchung des Stickstoffgehalts von Speicherwurzeln und Trieben des Wiederaustriebs, mit dem Ziel den Einfluss der N-Düngung des Vorjahres (2018) auf die N-Einlagerung zu analysieren. Hierfür wurden einerseits vor Vegetationsbeginn mehrjährige Speicherwurzeln beprobt und andererseits während der Phase des Austriebs den Pflanzen Triebe entnommen.

Wie die Ergebnisse zeigen (Tab. 5.12), verringerte sich der N-Gehalt der Speicherwurzeln ohne eine N-Düngung im Vorjahr (N1) relativ um 32 % im Vergleich zur Applikation von 180 kg N ha<sup>-1</sup> (N6). Eine Reduktion der Düngermenge auf 120 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) führte zu einem um 24 % niedrigeren Gehalt, welcher auf dem Niveau der nicht mit Stickstoff gedüngten Kontrolle (N1) lag. Des Weiteren erreichten die Triebe der im Vorjahr nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (N1) im Vergleich zu N6 um 6,4 % geringere N-Gehalte. Bei den niedriger gedüngten Varianten N2 bis N5 lagen die Gehalte unter N6, auf dem Niveau der Kontrolle (N1). Zudem zeigte sich der Einfluss einer reduzierten N-Düngung im Vorjahr in Form einer geringeren Vitalität der Pflanzen mit verzögertem Austrieb und aufgehellten Triebblättern.

Auch Anfang des Jahres 2020 erfolgte vor Vegetationsbeginn eine Untersuchung des N-Gehalts der Speicherwurzeln (Tab. 5.12). Dabei konnte bestätigt werden, dass im Vorjahr nicht mit Stickstoff gedüngte Pflanzen (N1) verringerte N-Gehalte in den Speicherwurzeln aufwiesen. Des Weiteren führte bereits eine Reduktion von 180 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) auf 120 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) zu einer signifikanten Verringerung des N-Gehalts. Wurden die Pflanzen im Vorjahr hingegen nur mit 60 kg N ha<sup>-1</sup> (N2 bis N4) gedüngt, zeigte sich kein Einfluss des Zeitpunkts der Ausbringung auf den in den Speicherwurzeln enthaltenen Stickstoffanteil.

Tab. 5.12: Versuchsserie 1 – Sorte Herkules – Jahre 2019/2020: Mittlerer N-Gehalt in Speicherwurzeln (vor Vegetationsbeginn) bzw. Trieben des Wiederaustriebs (Frühjahr) in Abhängigkeit der N-Düngung.

Variante	N-Gehalt [% i. d. TM]					
	2019			2020		
	Wurzel-N	p=0,002 **	Austrieb-N	p=0,003 **	Wurzel-N	p<0,001 ***
N1	1,11	b	4,67	b	1,22	b
N2	-	-	4,74	b	1,14	b
N3	-	-	4,73	b	1,15	b
N4	-	-	4,80	ab	1,22	b
N5	1,24	b	4,78	b	1,31	b
N6	1,63	a	4,99	a	1,69	a

### 5.1.9 Biomassebildung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf

Die Untersuchung des grundsätzlichen Verlaufs der Biomassebildung und N-Aufnahme einer Hopfenpflanze wurde in den Jahren 2017 und 2018 an den Standorten der Versuchsserie 1 durchgeführt. Dabei erfolgt die Abbildung beider Parameter auf Basis der in Variante N6 erhobenen Daten, da das N-Angebot dieser Pflanzen als optimal anzusehen war.

Der Verlauf der Biomassebildung der Aromasorten Perle und Tradition unterschied sich in den beiden Untersuchungsjahren dahingehend, dass 2018 eine fortgeschrittene Pflanzenentwicklung zu beobachten war (Abb. 5.3, Tab. 5.13). Bis zum zweiten Messtermin am 28. Mai bildete Tradition (2018) 8 % der gesamten Biomasse, während Perle in 2017 ein vergleichbares Niveau erst am 8. Juni erreichte. Im weiteren Wachstumsverlauf wurden 2018 bis zum 19. Juni insgesamt 34 % der Gesamtmasse gebildet, wohingegen im Vorjahr 2017 das Niveau am 22. Juni bei 21 % lag. In beiden Jahren erreichten die Pflanzen bis Ende Juli bzw. Anfang August 80 % der Gesamtbiomasse. Im 6-wöchigen Zeitraum zwischen dem 20. Juni und Anfang August wurden in 2017 insgesamt 61 % der gesamten Biomasse gebildet, während der Wert in 2018 im selben Zeitraum bei 46 % lag. Die fortgeschrittene Pflanzenentwicklung in 2018 wirkte sich auch auf die N-Aufnahme aus. Bis zum 19. Juni wurden 49 % des gesamten Stickstoffs aufgenommen, während die Aufnahme 2017 am 22. Juni 27 % erreichte. Im weiteren Wachstumsverlauf lag die N-Aufnahme Ende Juli bzw. Anfang August im Jahr 2017 bei 91 % und 2018 bei 85 % der endgültigen N-Menge. Im 6-wöchigen Zeitraum zwischen dem 20. Juni und Anfang August wurden in 2017 insgesamt 65 % des gesamten Stickstoffs aufgenommen, während der Wert in 2018 im selben Zeitraum bei 36 % lag. Auffällig ist, dass in 2018 im 3-wöchigen Zeitraum zwischen dem 28. Mai und 19. Juni 36 % der Gesamt-N-Menge aufgenommen wurden. Die tägliche N-Aufnahmerate erreichte 2017 im Zeitraum vom 22. Juni bis zum 2. August einen Wert von  $2,65 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Im Jahr 2018 wurde ein ähnlich hoher Wert ( $2,75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) bereits im Zeitraum vom 28. Mai bis zum 19. Juni erzielt, anschließend verringerte sich die Aufnahmerate bis Ende Juli auf  $1,46 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ .

Bei der Sorte Herkules konnte im Anbaujahr 2018 keine fortgeschrittene Pflanzenentwicklung beobachtet werden und der Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme unterschied sich in beiden Untersuchungsjahren kaum. Aufgrund der höheren Anzahl an Messterminen werden beide Parameter am Beispiel von 2018 beschrieben. Während Herkules im Mittel der zwei Jahre im Vergleich zu Perle und Tradition um 28 % mehr

Biomasse bildete, lag die N-Aufnahme um 19 % über der der Aromasorten. Bis zum zweiten Messtermin am 20. Juni lag die Biomassebildung bei 24 % der Gesamtmasse. Im weiteren Wachstumsverlauf wurden in einem 6-wöchigen Zeitraum 49 % der gesamten Biomasse gebildet, wodurch bis Ende Juli insgesamt 73 % der gesamten Biomasse gebildet wurden. Die N-Aufnahme zeigte im Zeitraum zwischen Ende Mai und Ende Juli mit einer durchschnittlichen täglichen Aufnahmerate in Höhe von  $2,18 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  einen annähernd linearen Verlauf. Während bis zum 20. Juni 35 % der gesamten N-Menge aufgenommen wurden, lag der Wert Ende Juli bei 79 % und am 20. August bei 97 %.

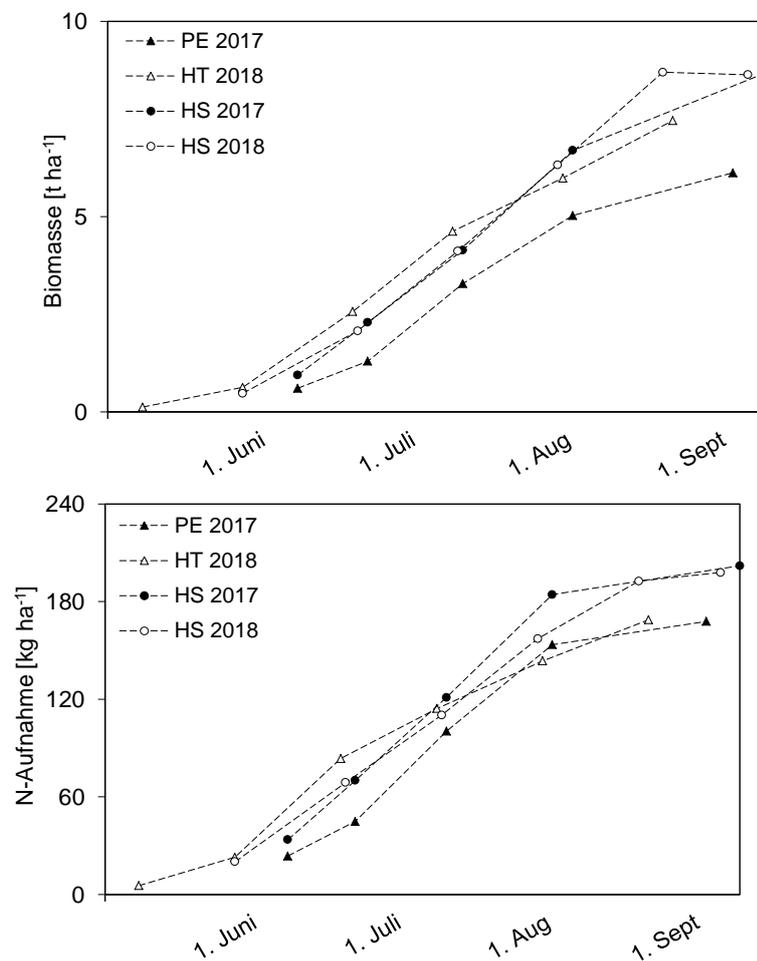


Abb. 5.3: Versuchsserie 1 – Jahre 2017/2018: Mittlerer Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme der Sorten Perle, Tradition und Herkules unter nicht limitiertem N-Angebot (N6).

Tab. 5.13: Versuchsserie 1 – Jahre 2017/2018: Relativer Verlauf der mittleren Biomassebildung und N-Aufnahme der Sorten Perle, Tradition und Herkules unter nicht limitiertem N-Angebot (N6).

Versuchsjahr 2017		8. Juni	22. Juni	11. Juli	2. Aug.	3. Sept.	10. Sept.	
TM [%]	PE 2017	10	21	54	82	100	-	
	HS 2017	11	26	48	77	-	100	
N [%]	PE 2017	14	27	60	91	100	-	
	HS 2017	17	35	60	91	-	100	
Versuchsjahr 2018		8. Mai	28. Mai	19. Juni	9. Juli	31. Juli	22. Aug.	10. Sept.
TM [%]	HT 2018	2	8	34	62	80	100	-
	HS 2018	-	5	24	48	73	100	100
N [%]	HT 2018	3	14	49	68	85	100	-
	HS 2018	-	10	35	56	79	97	100

Im zweiten Versuchsjahr 2018 wurde zusätzlich der Einfluss der N-Düngung auf den Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme analysiert. Bei der Sorte Herkules (Abb. 5.4) wurde die Biomasse bis zum ersten Messtermin am 28. Mai nicht durch die N-Düngung beeinflusst, jedoch wiesen die Pflanzen der nicht mit Stickstoff gedüngten Varianten N1 und N4 geringfügig reduzierte N-Gehalte auf. Bis zum zweiten Termin am 20. Juni bildeten die Varianten N5 und N6 mit  $1,98 \text{ t ha}^{-1}$  23 % der endgültigen Pflanzenmasse, während die N-Aufnahme bei 35 % der Gesamtmenge lag. Die bis zu diesem Zeitpunkt nicht mit Stickstoff gedüngten Varianten N1 und N4 erreichten mit  $1,74 \text{ t ha}^{-1}$  eine um 12 % geringere Biomasse. Des Weiteren nahmen diese im Vergleich zu den mit  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten Pflanzen (N5, N6) zwischen T1 und T2 um  $25 \text{ kg N ha}^{-1}$  weniger Stickstoff auf, dies entspricht einer Reduktion der täglichen N-Aufnahmerate von  $2,04$  auf  $0,98 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Auch die mit  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten Varianten N2 und N3 erzielten im selben Zeitraum eine höhere N-Aufnahme, wobei die Aufnahmerate bei N2 mit  $1,55 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  etwas geringer ausfiel. Zwischen dem zweiten und dritten Messtermin erhöhte sich die Biomassebildungsrate der gedüngten Pflanzen deutlich. Dabei führte eine N-Düngung mit  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  Ende Mai (N3) zu einem höheren Biomassezuwachs als bei Ausbringung derselben Menge Ende April. Bei N4 wurden am T3 im Vergleich zur Kontrolle (N1) zwar bereits höhere N-Gehalte gemessen, jedoch wirkte sich dies noch nicht auf die Biomassebildung aus. Die N-Aufnahmerate blieb bei den höher gedüngten Varianten N5 und N6 zwischen T2 und T3 mit  $2,11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  konstant, wohingegen sich diese bei N2 und N3 auf  $1,16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  reduzierte. Obwohl sich die Aufnahmerate bei N5 (120N) im Vergleich

zu N6 (180N) ab T3 geringfügig und ab T4 deutlich verringerte, beeinflusste dies die oberirdische Biomassebildung bis zum Erreichen der Erntereife nicht. Hingegen reagierten die Pflanzen von N2 bis N4 infolge der verringerten N-Aufnahme auch mit geringeren Biomassezuwächsen. Die Ausbringung von 60 kg N ha<sup>-1</sup> bei N4 Anfang Juli führte zwischen dem 10. und 30. Juli im Vergleich zur Kontrolle zu einer Erhöhung der N-Aufnahmerate und im weiteren Verlauf auch zu einer höheren Biomassebildung.

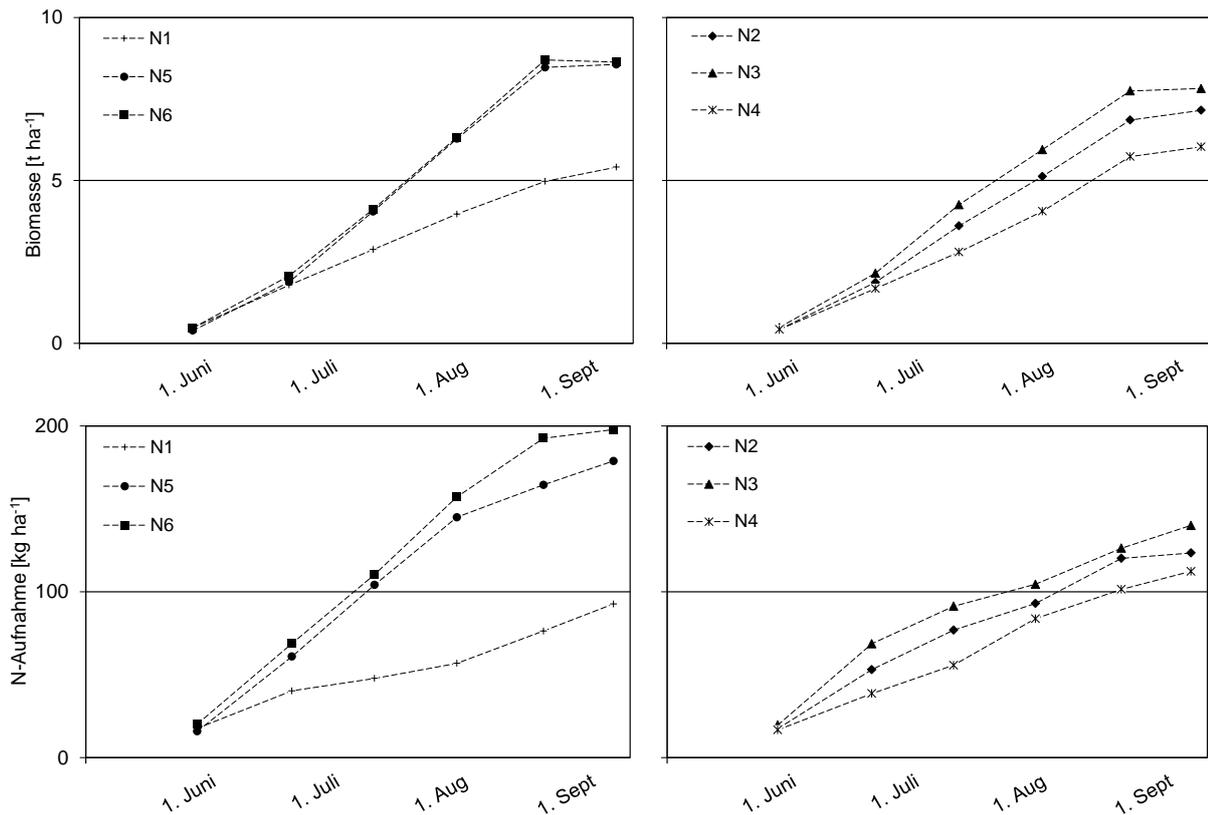


Abb. 5.4: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme der Sorte Herkules in Abhängigkeit der N-Düngung.

Bei der Sorte Tradition (Abb. 5.5) fand die erste Messung bereits am 8. Mai statt, wobei Biomasseunterschiede in Abhängigkeit von der N-Düngung erst ab dem dritten Termin am 19. Juni gemessen wurden. Am 28. Mai (T2) wurde an den Pflanzen der Varianten N1, N3 und N4, welche zum Zeitpunkt der ersten Gabe nicht mit Stickstoff gedüngt wurden, aufgrund reduzierter N-Gehalte bereits eine geringere N-Aufnahme erfasst. Zwischen T2 und T3 nahmen die mit 100 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Varianten N5 und N6 bei einer mittleren Aufnahmerate von 3,0 kg N ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> insgesamt 66 kg N ha<sup>-1</sup> auf. Die bis zu diesem Zeitpunkt mit 50 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Varianten N2 und N3 nahmen im selben Zeitraum 59 bzw. 55 kg N ha<sup>-1</sup> auf. In der weiteren Entwicklung verlief die

Biomassebildung der Varianten N2 und N5 auf einem ähnlichen Niveau, obwohl bei N2 nur die Hälfte des Stickstoffs gedüngt wurde. Auffällig ist, dass N3 und N4, die jeweils mit derselben N-Menge wie N2 gedüngt wurden, im Vergleich dazu eine geringere N-Aufnahme und Biomassebildung zeigten. Des Weiteren reduzierte sich die N-Aufnahmerate ab dem 9. Juli (T4), wenn zum Zeitpunkt der dritten N-Gabe Anfang Juli kein Stickstoff mehr ausgebracht wurde (N1, N2, N3 und N5) im Gegensatz zu N4 und N6, welche jeweils mit  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngt wurden.

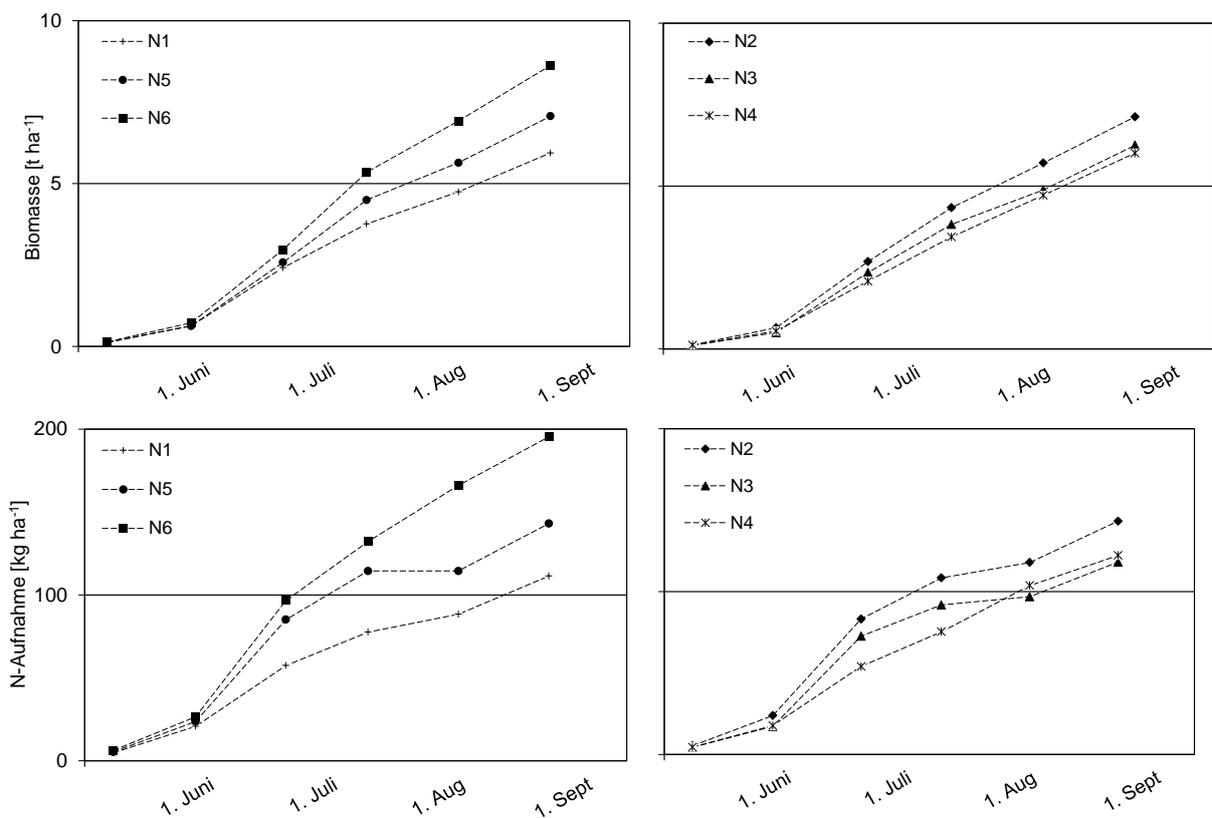


Abb. 5.5: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme der Sorte Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.

## 5.1.10 Chlorophyllwerte

### 5.1.10.1 Messwerte im Vegetationsverlauf

Die Erfassung der Chlorophyllwerte erfolgte nach der Neuanlage der Feldversuche des Versuchsansatzes 1 ab dem Jahr 2018 an den Sorten Herkules und Tradition über den gesamten Vegetationsverlauf.

Im Jahr 2018 wurden bei der Sorte Herkules (Abb. 5.6) bereits am ersten Messtermin an den Ende April mit  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten Pflanzen (N6) im Vergleich zu N1 höhere Chlorophyllwerte erfasst. Am zweiten Termin Anfang Juni zeigten auch die Ende April ebenfalls nicht gedüngten Varianten N3 und N4 geringere Messwerte. Bis zum dritten Termin erhöhte sich der Chlorophyllwert in den Ende Mai mit  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten Varianten N3, N5 und N6. Dabei erreichten N5 und N6, bis zu diesem Zeitpunkt mit  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  versorgt, ein höheres Niveau. Dieser Trend setzte sich im weiteren Wachstumsverlauf fort. Die am 3. Juli in den Varianten N4 und N6 ausgebrachte dritte N-Gabe ( $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ) konnte am 10. Juli noch nicht erfasst werden. Diese bewirkte jedoch bis zum nächsten Messtermin am 24. Juli, dass sich der Wert von N4 nicht weiter verringerte. Des Weiteren verblieb die insgesamt mit  $180 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngte Variante N6 im Vergleich zu N5 ( $120 \text{ kg ha}^{-1}$ ) im weiteren Wachstumsverlauf bis Mitte August auf einem höheren Niveau.

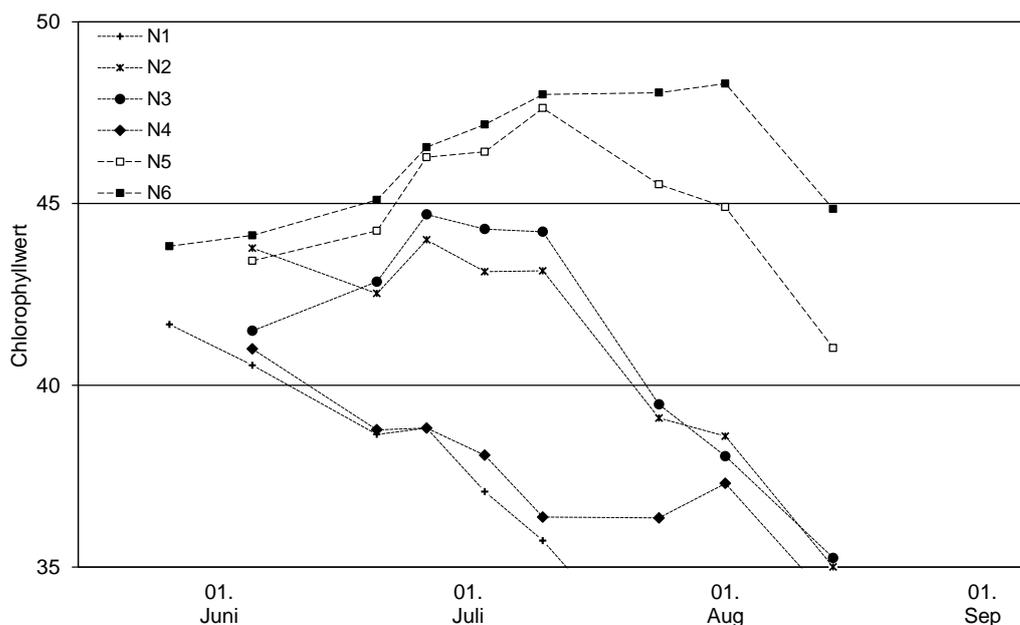


Abb. 5.6: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Herkules in Abhängigkeit der N-Düngung; Minimumwerte zum Zeitpunkt der Reife bei 30 bis 34.

Auch bei der Sorte Tradition (Abb. 5.7) wurde bereits Ende Mai 2018 ein verringerter Chlorophyllwert gemessen, wenn Ende April kein Stickstoff ausgebracht wurde (N1). Am zweiten Termin Anfang Juni zeigten Pflanzen, der im April mit  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten Varianten N2, N5 und N6, höhere Messwerte. Eine N-Düngung in Höhe von  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ , ausgebracht Ende Mai, führte bis zum 18. Juni zu einem Anstieg des Messwertes von N3. Dabei wurde jedoch das Niveau der bereits im April mit derselben N-Menge gedüngten Variante N2 nicht erreicht. Obwohl bei N5 und N6 bis Anfang Juli insgesamt  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngt wurden, lag der Kurvenverlauf, erfasst an den unteren Blättern des Haupttriebs, nicht über dem von N2. Bereits ab Ende Juni waren die Messwerte in allen Varianten rückläufig, wobei N6 ( $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) den geringsten Rückgang verzeichnete. Im Vergleich zur Sorte Herkules war die Differenzierung der Messkurven in Abhängigkeit von der N-Düngung bei Tradition geringer.

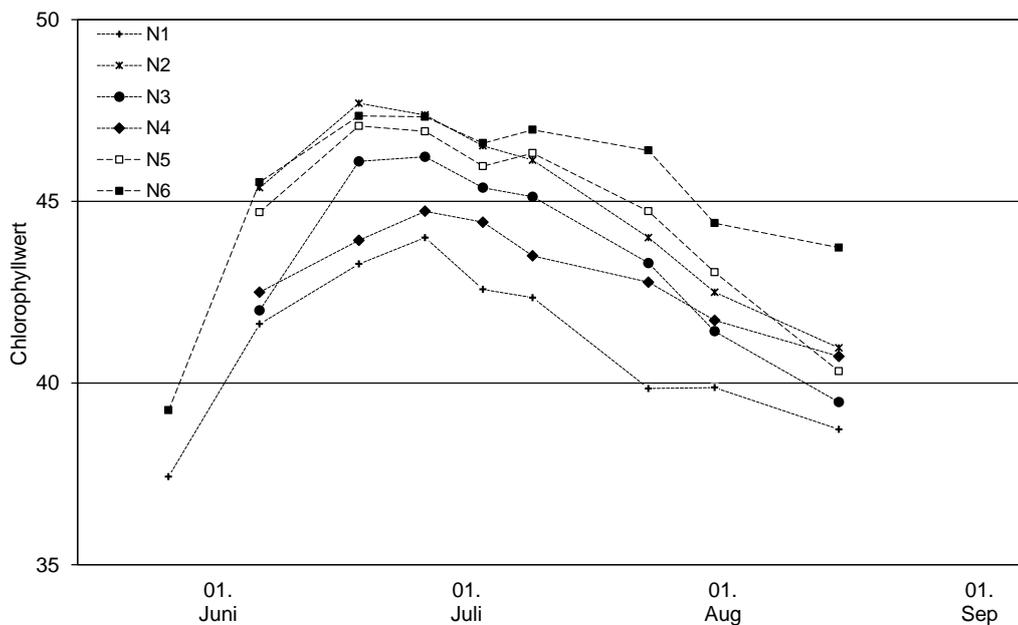


Abb. 5.7: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.

Im Jahr 2019 lagen die gemessenen Chlorophyllwerte der Sorte Herkules (Abb. 5.8) Ende Mai im Vergleich zum Vorjahr auf einem geringeren Niveau. Bis zum zweiten Messtermin Anfang Juni stiegen die Werte bei Ende April mit 60 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Varianten (N2, N5, N6) deutlich stärker an. Wurde dieselbe N-Menge Ende Mai appliziert, führte dies bei N3 ab Mitte Juni zu einem Anstieg der Messwerte bis auf das Niveau von N2. Hingegen erreichten die bis Ende Juni mit 120 kg N ha<sup>-1</sup> versorgten Pflanzen der Varianten N5 und N6 ein höheres Niveau. Die Düngung mit 60 kg N ha<sup>-1</sup> Anfang Juli führte bei N4 ab dem 10. Juli zu einem Anstieg der Chlorophyllwerte. Auffällig ist, dass der Kurvenverlauf der bis dahin nicht gedüngten Variante N4 über dem der Kontrolle N1 lag. Des Weiteren führte die Erhöhung der Gesamt-N-Menge auf 180 kg N ha<sup>-1</sup> bei N6 im Vergleich zu N5 zu einem höheren Kurvenverlauf. Im Vergleich zum Vorjahr fiel die Rückläufigkeit der Chlorophyllwerte in 2019 in allen Varianten geringer aus, obwohl jeweils dieselbe N-Menge ausgebracht wurde.

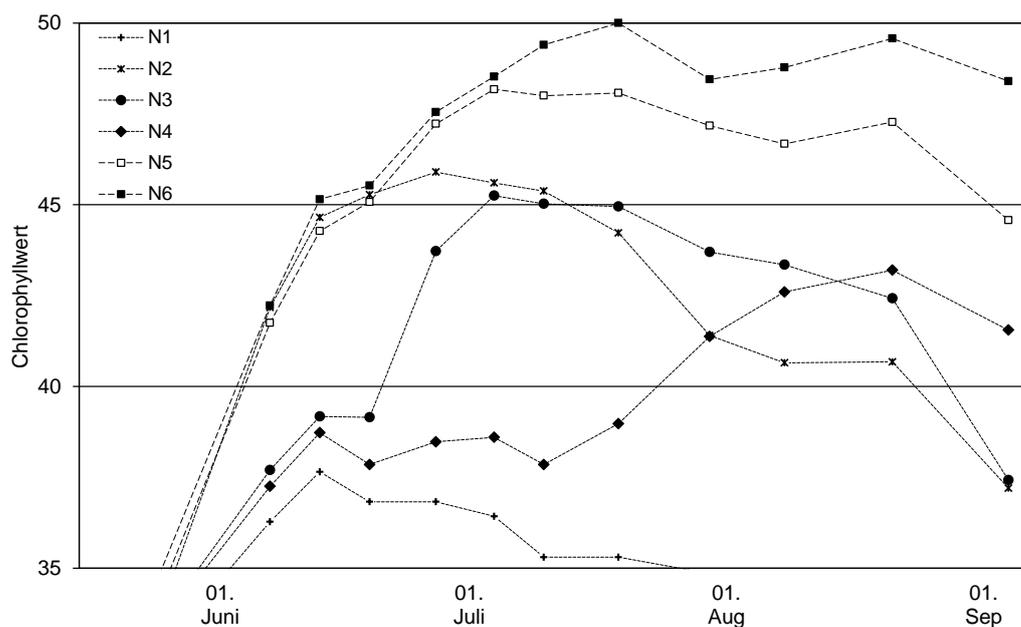


Abb. 5.8: Versuchsserie 1 – Jahr 2019: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Herkules in Abhängigkeit der N-Düngung; Minimumwerte zum Zeitpunkt der Reife bei 31.

Bei der Sorte Tradition lagen die Messwerte im Jahr 2019 (Abb. 5.9) über den gesamten Vegetationsverlauf im Vergleich zum Vorjahr auf einem geringeren Niveau. Die Ausbringung von 50 kg N ha<sup>-1</sup> Ende April bei N2, N5 und N6 führte bereits Ende Mai zu höheren Chlorophyllwerten im Vergleich zu den restlichen Varianten. Wurde dieselbe N-Menge Ende Mai appliziert (N3), reagierten die Pflanzen ab Mitte Juni mit höheren Messwerten, wobei das Niveau der im April gedüngten Variante N2 nicht mehr erreicht wurde. Auf eine N-Düngung mit 50 kg ha<sup>-1</sup> Anfang Juli reagierten die bis zu diesem Zeitpunkt nicht gedüngten Pflanzen von N4 ab Ende Juli mit steigenden Messwerten. Auffällig ist, dass N5 trotz der Ausbringung einer zweiten N-Gabe Ende Mai im Vergleich zu N2 keine höheren Chlorophyllwerte erzielte.

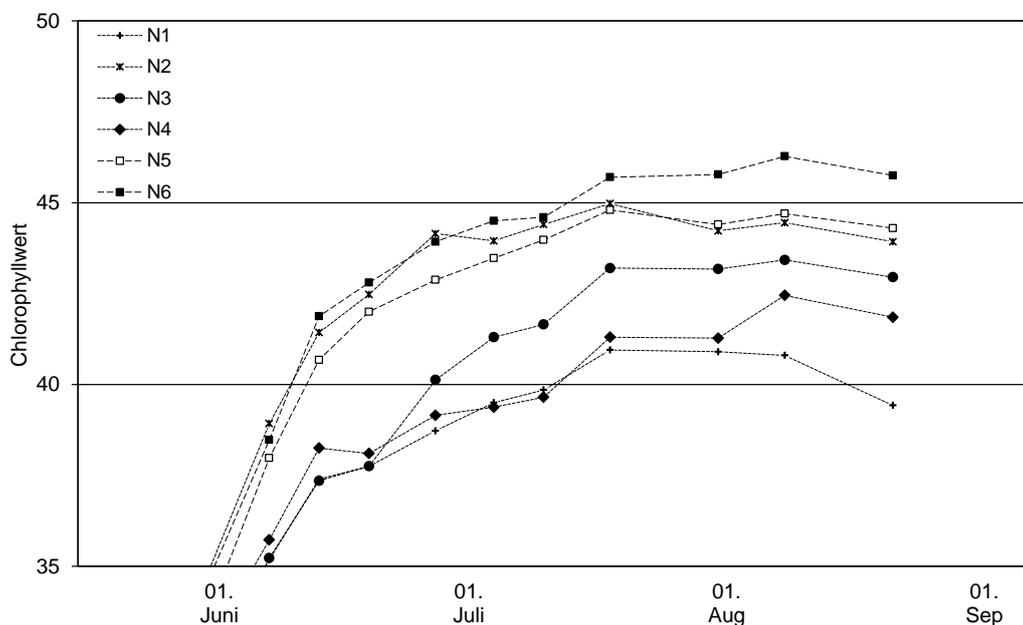


Abb. 5.9: Versuchsserie 1 – Jahr 2019: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Tradition in Abhängigkeit der N-Düngung.

### 5.1.10.2 Abbildung des N-Gehalts

Um zu untersuchen, ob der Chlorophyllwert auch bei Hopfen den N-Gehalt der Blätter abbildet, wurde im Versuchsjahr 2018 an ausgewählten Terminen der Gesamt-N-Gehalt der mit dem SPAD-Meter gemessenen Blätter analysiert. Weiterhin wurde auch geprüft, ob ein Zusammenhang zwischen Chlorophyllwert und dem im Rahmen der Untersuchung der Biomasseentwicklung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf bestimmten N-Gehalt der Gesamtpflanze besteht. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression zwischen dem Chlorophyllwert und Blatt-N-Gehalt lag zwischen 0,85 und 0,95 (Abb. 5.10 a). Des

Weiteren konnte mit dem Chlorophyllwert auch der N-Gehalt in der Gesamtpflanze abgebildet werden (Abb. 5.10 b).

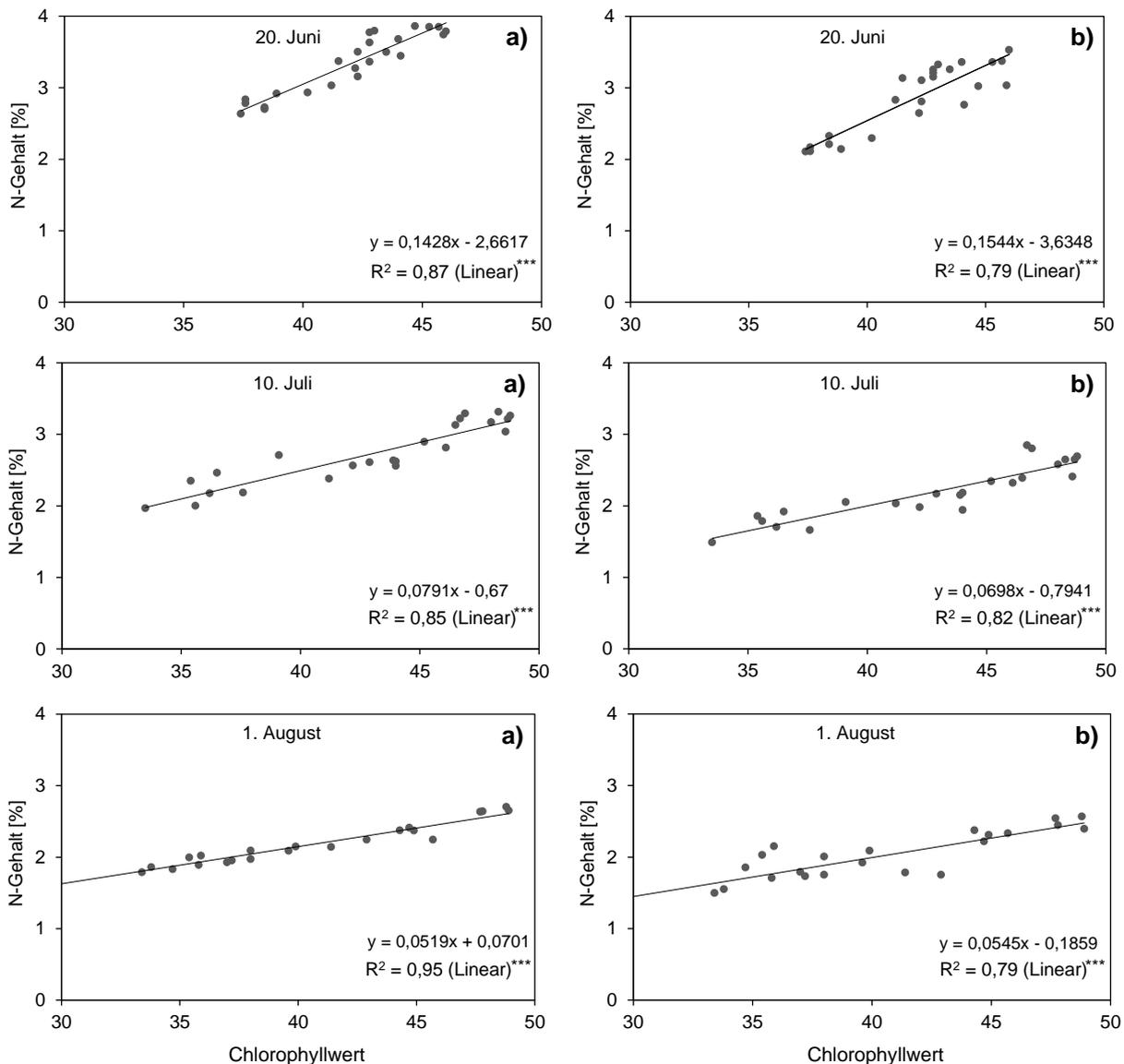


Abb. 5.10: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Lineare Regression zwischen dem Chlorophyllwert und dem **a)** Blatt-N-Gehalt bzw. dem **b)** N-Gehalt der Gesamtpflanze der Sorte Herkules zu unterschiedlichen Messterminen.

### 5.1.11 Lichtreflexion und Vegetationsindices

Am Standort der Sorte Herkules wurden im Jahr 2018 im Zeitraum von Anfang Juni bis Ende August an fünf Terminen reflexionsoptische Messungen in drei bzw. zwei Messhöhen durchgeführt. Aufgrund hoher Beschattung wurde ab Ende Juli auf die Messung des untersten Rebenabschnitts verzichtet. Die Daten der Lichtreflexion wurden genutzt um die Vegetationsindices REIP, IR G und NDVI zu berechnen (vgl. 2.4). In einem weiteren

Schritt wurde durch lineare Regressionsanalysen geprüft, ob diese die gemessenen Pflanzenparameter N-Gehalt, Biomasse und N-Aufnahme abbilden können.

#### 5.1.11.1 Abbildung des N-Gehalts

Zunächst wurde untersucht, ob der im Rahmen der Bestimmung der N-Aufnahme ermittelte N-Gehalt in der Gesamtpflanze in Abhängigkeit von der Messhöhe abgebildet werden kann. Zur Bewertung des Zusammenhangs werden die Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) der linearen Regression an drei Messterminen herangezogen (Tab. 5.14). Im Vergleich zum NDVI erreichten die Indices REIP und IR G auf jeder Messhöhe über alle Termine höhere  $R^2$ -Werte. Dabei bildeten die im oberen Abschnitt der Pflanzen gemessenen Reflexionswerte den N-Gehalt der Gesamtpflanze exakter ab. Die Messpräzision des IR G wurde im Vergleich zum REIP tendenziell stärker durch die Höhe beeinflusst. Während der N-Gehalt am ersten Messtermin mit dem REIP genauer bestimmt werden konnte, erwies sich am 1. August der IR G als geeigneterer Index.

Tab. 5.14: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Bestimmtheitsmaße der linearen Regression zwischen dem N-Gehalt der Gesamtpflanze und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices der Sorte Herkules in Abhängigkeit des Messtermins und der Messhöhe.

Termin	Messhöhe	REIP	IR G	NDVI
20. Juni	Oben	<b>0,77</b>	<b>0,62</b>	0,54
	Mitte	0,75	0,56	0,10
	Unten	0,76	0,56	0,24
10. Juli	Oben	<b>0,81</b>	<b>0,82</b>	0,63
	Mitte	0,73	0,66	0,45
	Unten	0,46	0,43	0,02
01. Aug.	Oben	<b>0,77</b>	<b>0,82</b>	0,56
	Mitte	0,78	0,60	0,23
22. Aug.	Oben	<b>0,71</b>	<b>0,70</b>	0,35
	Mitte	0,75	0,68	0,38

Die Abbildung der Regressionsgleichungen für die Indices REIP und IR G erfolgt ausschließlich auf Basis der im **oberen Pflanzenabschnitt** gemessenen Reflexionswerte (Abb. 5.11). Für beide Indices änderten sich im Verlauf der Vegetation sowohl die Steigung als auch der Y-Achsenabschnitt der Regression, weshalb von einer Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Pflanzen ausgegangen werden kann. Im Gegensatz zum IR G bestand beim REIP eine stärkere Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium. Ein eintretender Sättigungseffekt ist für beide Indices auf Basis der gegebenen Daten nicht zu erkennen.

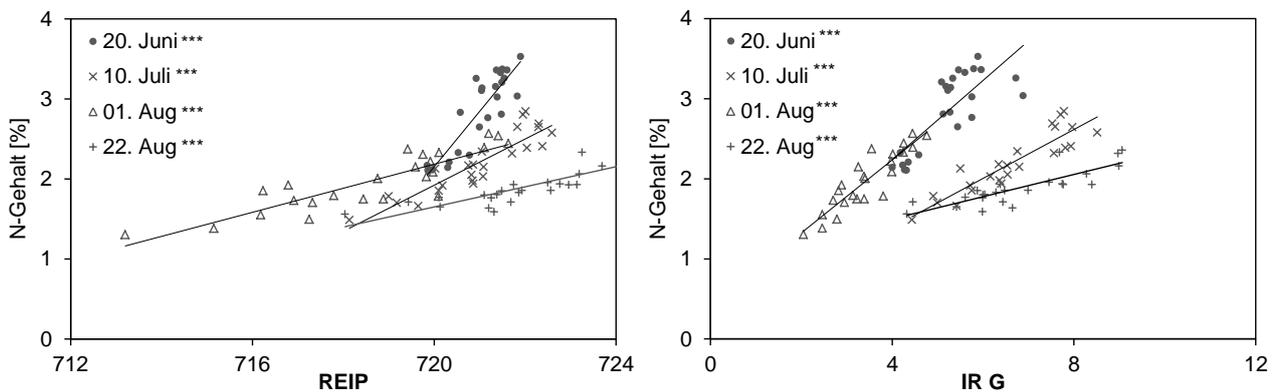


Abb. 5.11: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Lineare Regression zwischen dem auf der **oberen Messhöhe** erfassten REIP bzw. IR G und dem N-Gehalt der Gesamtpflanze der Sorte **Herkules** zu unterschiedlichen Messterminen; Bestimmtheitsmaße vgl. Tab. 5.14.

### 5.1.11.2 Abbildung der Biomasse und N-Aufnahme

Hinsichtlich der Eignung der Indices zur Abbildung der Biomasse und N-Aufnahme konnte festgestellt werden, dass beide Parameter mit den Indices REIP und IR G exakter als mit dem NDVI abgebildet werden können (Tab. 5.15). Für die Bestimmung der Biomasse mit REIP und IR G erwies sich die Messung der Reflexion auf einer mittleren Pflanzenhöhe als geeigneter. Nur am 10. Juli lagen die  $R^2$ -Werte im unteren Bereich der Pflanzen höher. Die N-Aufnahme hingegen wurde über alle Termine hinweg durch die Messung in der Pflanzenmitte am besten wiedergegeben. Mit Ausnahme des 20. Juni erzielte der IR G für beide Parameter höhere Bestimmtheitsmaße. Weiterhin verbesserte sich die Güte der Korrelation im Verlauf der Vegetation für den IR G zunehmend.

Tab. 5.15: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Bestimmtheitsmaße der linearen Regression zwischen der Gesamtbiomasse bzw. der N-Aufnahme der Gesamtpflanze und den Messwerten verschiedener Vegetationsindices der Sorte Herkules in Abhängigkeit des Messtermins und der Messhöhe.

Termin	Messhöhe	Biomasse			N-Aufnahme		
		REIP	IR G	NDVI	REIP	IR G	NDVI
20. Juni	Oben	0,18	0,34	0,30	0,54	0,63	0,55
	Mitte	<b>0,43</b>	<b>0,43</b>	0,11	<b>0,75</b>	<b>0,63</b>	0,12
	Unten	0,28	0,30	0,19	0,62	0,55	0,28
10. Juli	Oben	0,46	0,49	0,52	0,76	0,79	0,67
	Mitte	<b>0,57</b>	<b>0,60</b>	0,52	<b>0,81</b>	<b>0,82</b>	0,62
	Unten	0,60	0,68	0,29	0,71	0,73	0,19
01. Aug.	Oben	0,37	0,50	0,61	0,63	0,81	0,72
	Mitte	<b>0,56</b>	<b>0,69</b>	0,37	<b>0,78</b>	<b>0,86</b>	0,37
22. Aug.	Oben	0,56	0,69	0,44	0,66	0,79	0,47
	Mitte	<b>0,59</b>	<b>0,80</b>	0,67	<b>0,76</b>	<b>0,87</b>	0,66

Die Abbildung der Regressionsgleichungen für die Indices REIP und IR G erfolgt für jeden Termin auf Basis der im **mittleren Pflanzenabschnitt** gemessenen Werte. Wie die Ergebnisse zeigen (Abb. 5.12), veränderten sich im Verlauf der Vegetation für beide Indices die Steigung und der Y-Achsenabschnitt der linearen Gleichung. Dieser Zusammenhang gilt für die Bestimmung der Biomasse und N-Aufnahme gleichermaßen. Anzeichen über einen eintretenden Sättigungseffekt sind für beide Indices auf der gegebenen Datenbasis nicht zu erkennen.

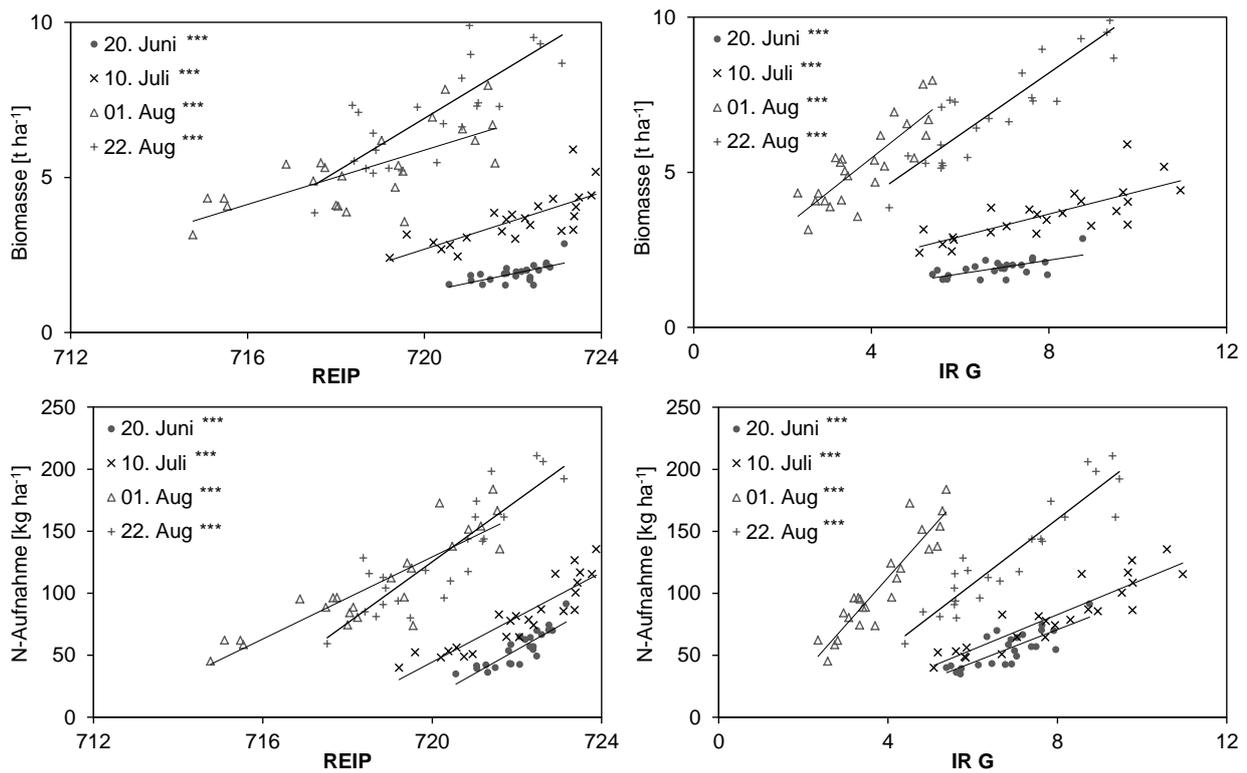


Abb. 5.12: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Lineare Regression zwischen dem auf der **mittleren Messhöhe** erfassten REIP bzw. IR G und der Gesamtbiomasse bzw. der N-Aufnahme der Gesamtpflanze der Sorte Herkules zu unterschiedlichen Messterminen; Bestimmtheitsmaße vgl. Tab. 5.15.

### 5.1.11.3 Messwerte im Vegetationsverlauf

In diesem Abschnitt wird der Verlauf der Vegetationsindices REIP und IR G während der Vegetation dargestellt (Abb. 5.13) sowie die Eignung der Indices geprüft, verschiedene N-Stufen voneinander zu unterscheiden. Da nur im **mittleren Pflanzenabschnitt** an allen fünf Terminen gemessen wurde, beschränkt sich die Darstellung auf diesen Abschnitt. Eine Auffälligkeit beim Verlauf der Messwerte beider Indices ist die Verringerung des Niveaus am 1. August und der daraufhin folgende erneute Anstieg. Sowohl der REIP als auch der IRG waren in der Lage, über die gesamte Vegetation hinweg eine Differenzierung der N-Düngevarianten zu erfassen. Dabei war die Unterscheidbarkeit an den ersten zwei Messterminen im Juni durch den REIP stärker gegeben.

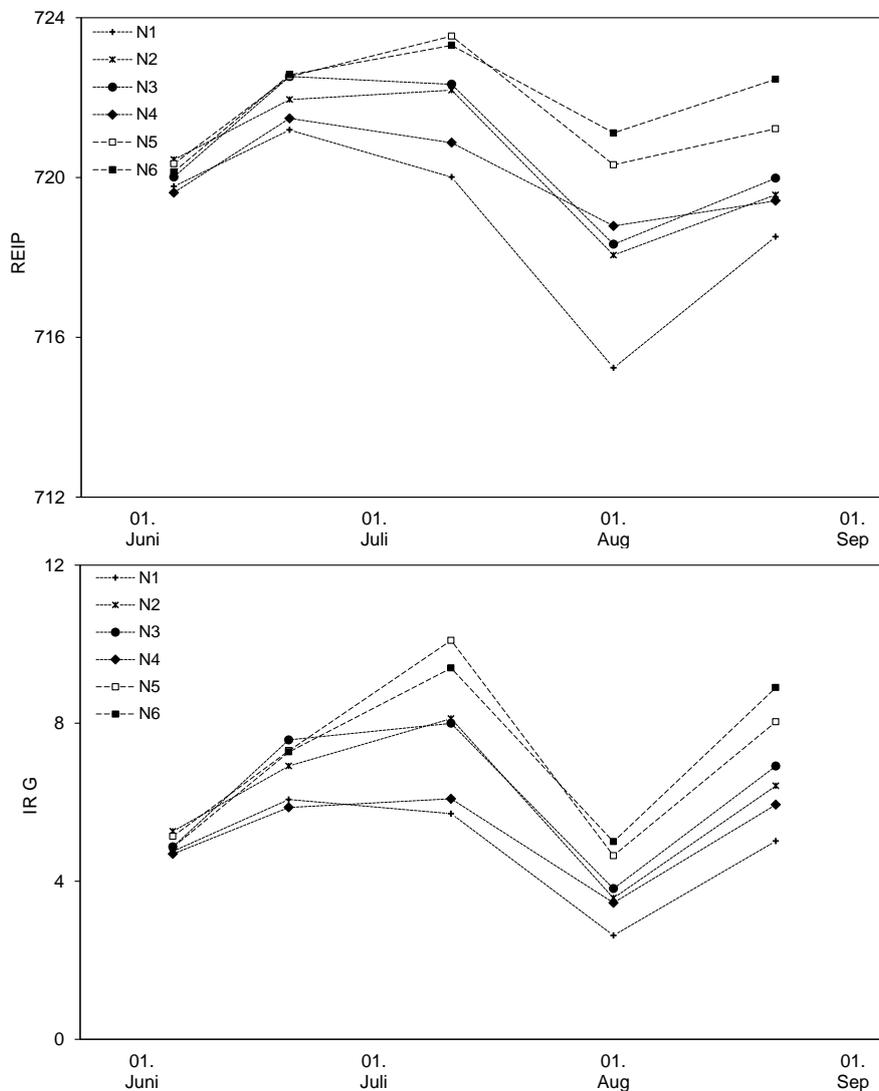


Abb. 5.13: Versuchsserie 1 – Jahr 2018: Messwerte der Vegetationsindices REIP und IR G auf der **mittleren Messhöhe** der Sorte Herkules zu unterschiedlichen Messterminen in Abhängigkeit der N-Düngung.

## 5.2 Versuchsansatz 2 – Düngesysteme mit Fertigation

Im Rahmen des Versuchsansatzes 2 wurden unterschiedliche N-Düngesysteme mit Fertigation an zwei Sorten und zwei Standorten untersucht. Die Höhe der N-Düngung unterschied sich dabei, mit Ausnahme der Variante F6a, innerhalb eines Versuchsstandortes und -jahres nicht (vgl. 4.4.2.2). Weiterhin wurde die Höhe der N-Düngung versuchsspezifisch auf Grundlage vorhergehender Ergebnisse im Folgejahr angepasst. Die zeitliche Verteilung des Stickstoffs variierte hingegen in Abhängigkeit von der Versuchsvariante. Zusätzlich erfolgte bei Varianten mit Fertigation jährlich eine Anpassung der N-Verteilung auf Basis von Vorjahresergebnissen. Bei der Referenzvariante F2, mit ausschließlich granulierter N-Düngung, wurde die zeitliche Verteilung des Stickstoffs über den gesamten Zeitraum nicht verändert. Nachfolgend werden alle im Rahmen des Versuchsansatzes 2 geprüften Varianten aufgeführt (Tab. 5.16).

Tab. 5.16: Versuchsserie 2 – Überblick zu den geprüften Varianten: Anteil und Verteilung des granuliert bzw. über Fertigation ausgebrachten Stickstoffs.

Variante	N-Anteil Granuliert	N-Anteil Fertigation	N-Verteilung (vgl. 4.4.2.2)	Beginn Fertigation
F1	0	0	-	-
F2	3/3	0	3 Einzelgaben (April, Mai, Juli)	-
F3	2/3	1/3	PE 10, HS 11 Einzelgaben	Ab KW25
F4	2/3	1/3	6 Einzelgaben	Ab KW25
F5	1/3	2/3	PE 10, HS 11 Einzelgaben	Ab KW25
F6	1/3	2/3	6 Einzelgaben	Ab KW25
F6a	1/3	2/3	Nach Chlorophyll-Wert	Ab KW23
F6b	1/3	2/3	6 Einzelgaben	Ab KW23
F6c	1/3	2/3	6 Einzelgaben	Ab KW24
F6d	1/3	2/3	6 Einzelgaben	Ab KW26

### 5.2.1 Entwicklungsverlauf und Habitus

An den Standorten der Versuchsserie 2 konnte durch die oberirdisch erfolgte Tropfbewässerung eine Beeinflussung des Pflanzenwachstums durch unzureichende Wasserversorgung in Trockenperioden für den gesamten Zeitraum (2017 bis 2019) ausgeschlossen werden. Am sandigeren Standort wurde im Vergleich zum lehmigeren Boden sowohl an der Sorte Perle als auch an Herkules in jedem Versuchsjahr eine fortgeschrittene Pflanzenentwicklung beobachtet. Des Weiteren wies der Pflanzenbestand bei ausschließlich granulierter N-Düngung (F2), unabhängig vom Standort oder der Sorte, im Vergleich zu Versuchsvarianten mit Fertigation eine sichtbar höhere Einzelpflanzenvariabilität auf. Diese Beobachtung wurde in jedem der drei Versuchsjahre gemacht.

Im ersten Versuchsjahr 2017 zeigte sich am lehmigen Versuchsstandort weder an der Sorte Perle noch an Herkules eine Beeinflussung des Wachstumsverlaufs der Pflanzen in Abhängigkeit von der N-Düngung. An den nicht gedüngten Pflanzen (F1) beider Sorten war erst ab Mitte August, während der Reifephase der Dolden, eine Reduktion der Grünfärbung zu erkennen. Auf dem sandigeren Boden hingegen führte eine mangelnde N-Versorgung nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (F1) sowohl bei Perle, als auch Herkules bereits Ende Juni zu einer helleren Grünfärbung. Während der Wachstumsphase im Juli wurden an diesen Pflanzen zudem eine geringere Intensität des Seitentriebwachstums sowie reduzierte Biomassebildung beobachtet. Die Auswirkungen einer mangelnden N-Versorgung auf die Ausbildung der Seitentriebe wurden bereits im Kapitel 5.1.1 beschrieben und dargestellt. Des Weiteren zeigte sich im Vergleich zu gedüngten Pflanzen nach Ausbildung der Dolden ein beschleunigtes Reifeverhalten mit einer deutlich erkennbaren Überreife zu sortentypischen Ernteterminen.

Im zweiten Versuchsjahr 2018 war an beiden Sorten des leichteren Standortes, bedingt durch hohe Temperaturen im Frühjahr, zunächst eine Verfrühung der Pflanzenentwicklung zu beobachten. In den Versuchen des lehmigeren Bodens war dieser Effekt schwächer ausgeprägt. Die Sorte Herkules zeigte am sandigen Standort eine hohe Wüchsigkeit. Des Weiteren zeigte sich an den nicht gedüngten Pflanzen (F1) beider Sorten und Standorte bereits ab Mitte Mai eine reduzierte Grünfärbung und ab Anfang Juni eine Einschränkung des Wachstums der unteren Seitentriebe. Im Vergleich zum Vorjahr (2017) führte eine fehlende N-Düngung (F1) in allen Feldversuchen zu einer sichtbar stärkeren Reduktion der Biomassebildung sowie Überreife der Dolden. In den Versuchen am lehmigeren Standort zeigten die Pflanzen im Vergleich zum sandigeren Boden ein

geringeres N-Versorgungsniveau. Weiterhin war vor allem in den Feldversuchen des lehmigeren Standortes an beiden Sorten eine deutliche Beeinflussung des Seitentriebwachstums in Abhängigkeit von der N-Düngung zu beobachten. Dies zeigte sich an der Sorte Herkules bereits Anfang Juni (Abb. 5.14). Die Auswirkungen des Zeitpunkts der N-Düngung werden exemplarisch am Beispiel der Sorte Perle (V2\_L\_PE\_18) beschrieben (Abb. 5.15 a, b). Eine frühe Applikation des über Fertigation auszubringenden N-Anteils ab KW23 (F6b) führte im Vergleich zur Ausbringung ab KW25 (F6) zu einem verstärkten Wachstum der Seitentriebe des unteren und mittleren Pflanzenabschnitts, bei gleichzeitig schwacher Ausbildung im oberen Abschnitt. Erfolgte die Ausbringung derselben N-Menge ab KW25 (F6), fand im oberen Abschnitt und Kopfbereich der Pflanzen ein sichtbar stärkeres Seitentriebwachstum statt. Hingegen reduzierte sich das Wachstum der Seitentriebe im untersten Rebenabschnitt. In den Feldversuchen am leichteren Standort waren die Effekte durch den Zeitpunkt der N-Ausbringung schwächer ausgeprägt.

Im dritten Versuchsjahr 2019 verzögerten niedrige Frühjahrstemperaturen die Pflanzenentwicklung bis Ende Mai. An beiden Sorten des lehmigeren Standortes wurde während der Phase des Austriebs im April 2019 in den abgegrenzten Versuchsflächen im Vergleich zum praxisüblich bewirtschafteten Teil der Hopfenfelder eine Beeinträchtigung des Pflanzenaustriebs beobachtet (Abb. 5.16). Dabei zeigten die nicht bzw. stark reduziert gedüngten Pflanzen ein verzögertes Wachstum, eine geringere Vitalität, eine reduzierte Triebanzahl, hellere Triebblätter sowie verkürzte Internodien (Abb. 5.16). An den zweijährig (2017, 2018) nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (F1) war eine stärkere Ausprägung dieser Effekte zu beobachten. Im weiteren Entwicklungsverlauf zeigten gedüngte Pflanzen ab Anfang Juni ein verbessertes Wachstum, sodass eine sortentypische Entwicklung möglich war. An nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (F1) wurde hingegen über den gesamten Vegetationsverlauf eine deutlich reduzierte Biomassebildung sowie Einschränkung des Seitentriebwachstums beobachtet. In den Feldversuchen am sandigeren Standort zeigten vor allem die zweijährig (2017, 2018) nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (F1) eine Beeinträchtigung des Pflanzenaustriebs und Einschränkung des Wachstums. An den Pflanzen der Sorte Perle des sandigeren Standortes, die im Vorjahr (2018) mit  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngt wurden (F6a), war über den gesamten Vegetationsverlauf im Vergleich zu den mit  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten Pflanzen eine geringere Vitalität zu beobachten. Sowohl in den Feldversuchen des sandigeren, als auch lehmigeren Standortes zeigte sich bei einem grundsätzlich limitierten N-Angebot eine Beeinflussung des Habitus in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der N-Düngung. Die deutlichsten Effekte

wurden an der Sorte Herkules am lehmigen Standort (V2\_L\_HS\_19) beobachtet (Abb. 5.15 c, d). Dabei konnten die Beobachtungen des Vorjahres (2018) bestätigt werden. Eine frühe Applikation des über Fertigation auszubringenden N-Anteils ab KW23 (F6b) führte im Vergleich zur Ausbringung ab KW26 (F6d) zu einem verstärkten Wachstum der Seitentriebe des unteren und mittleren Pflanzenabschnitts, bei gleichzeitig schwacher Ausbildung im oberen Abschnitt. Erfolgte die Ausbringung derselben N-Menge ab KW26 (F6d), fand im oberen Abschnitt und Kopfbereich der Pflanzen ein sichtbar stärkeres Seitentriebwachstum statt. Hingegen reduzierte sich das Wachstum der Seitentriebe im untersten Rebenabschnitt. Zusammenfassend zeigte sich, je später der über Fertigation auszubringende N-Anteil appliziert wurde, desto stärker verlagert sich die Ausbildung der Seitentriebe in höhere Pflanzenabschnitte.

Im Frühjahr 2020 zeigten die Pflanzen beider Sorten sowohl am lehmigen, als auch am sandigen Versuchsstandort während der Phase des Wiederaustriebs im April ein verzögertes Wachstum, eine geringere Vitalität, eine reduzierte Triebanzahl, hellere Triebblätter sowie verkürzte Internodien.

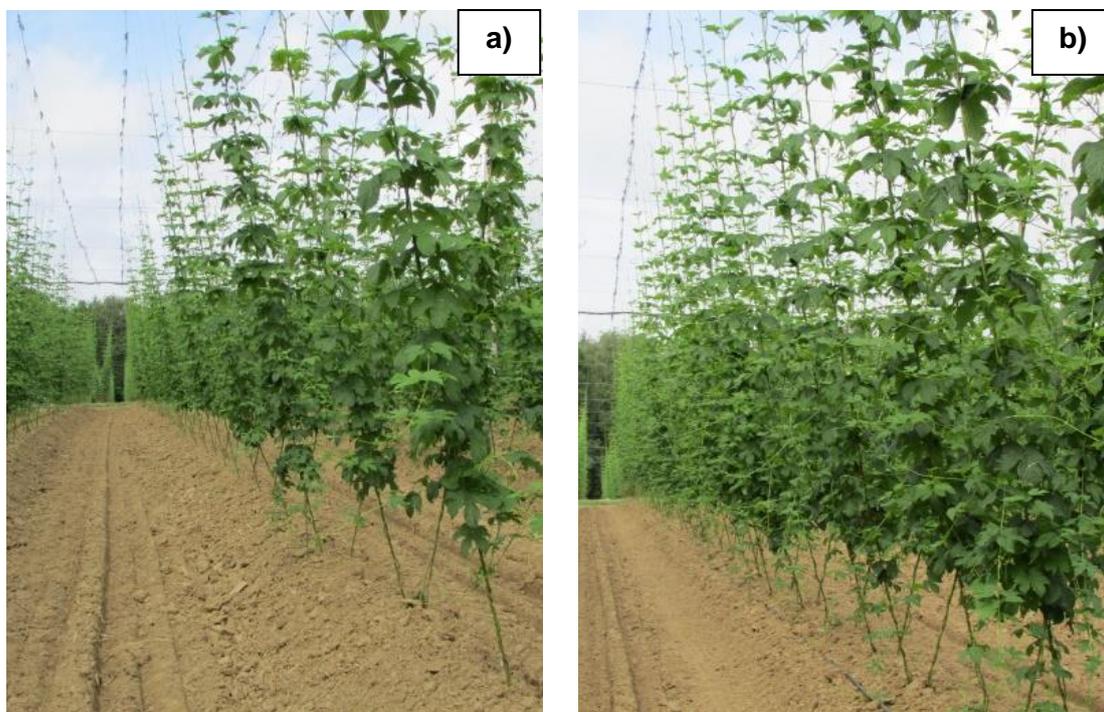


Abb. 5.14: Einfluss der N-Düngung auf das Seitentriebwachstum: V-Serie 2 - lehmiger Standort - Sorte Herkules - 02.06.2018; **a)** Kein Stickstoff (F1); **b)** 3/3 granuliert (F2).

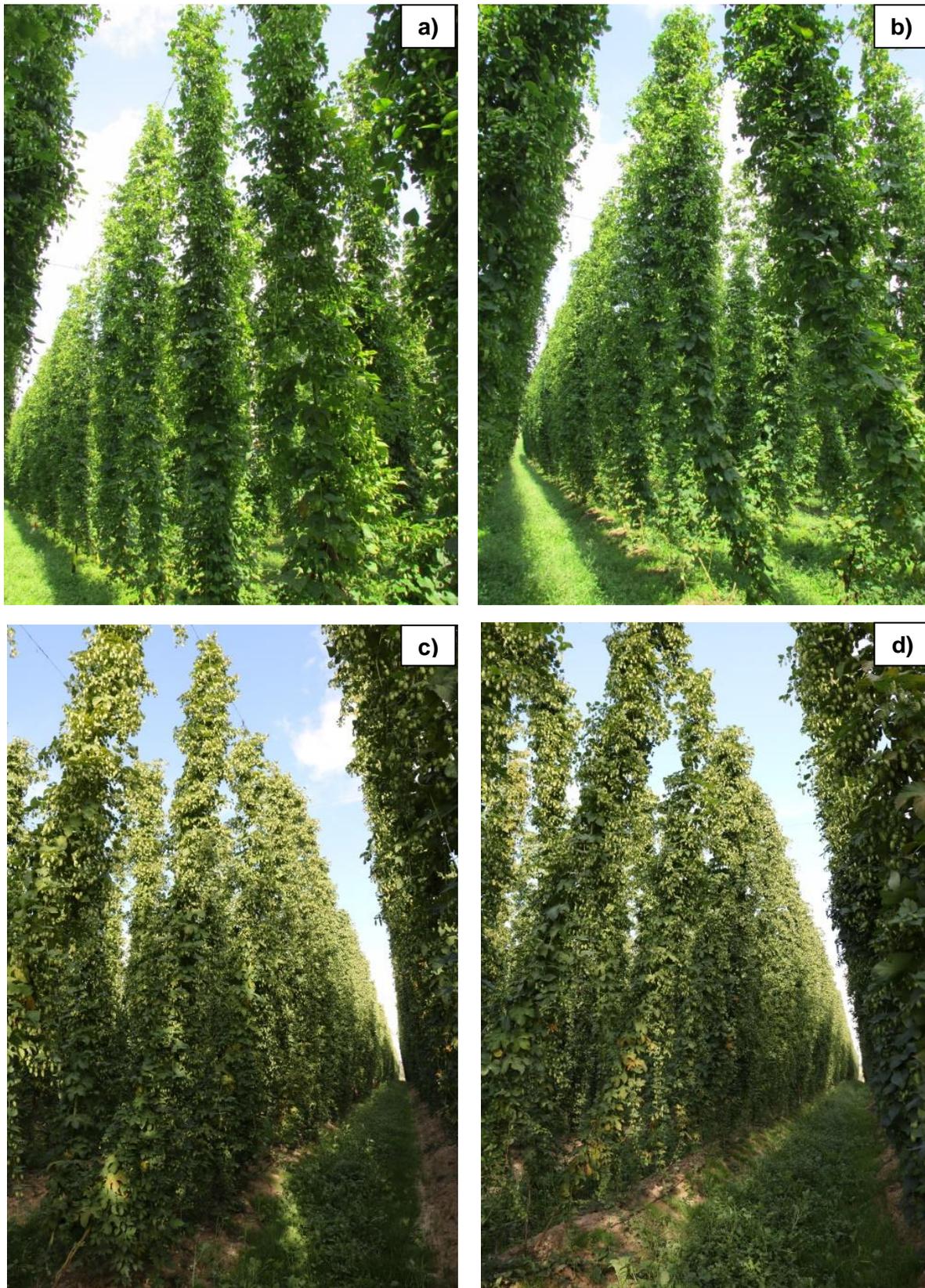


Abb. 5.15: Einfluss des Zeitpunkts der N-Düngung auf das Seitentriebwachstum und den Habitus der Hopfenpflanze: V2\_L\_PE\_18: **a)** KW23 (F6b); **b)** KW25 (F6); V2\_L\_HS\_19: **c)** KW23 (F6b); **d)** KW26 (F6d).

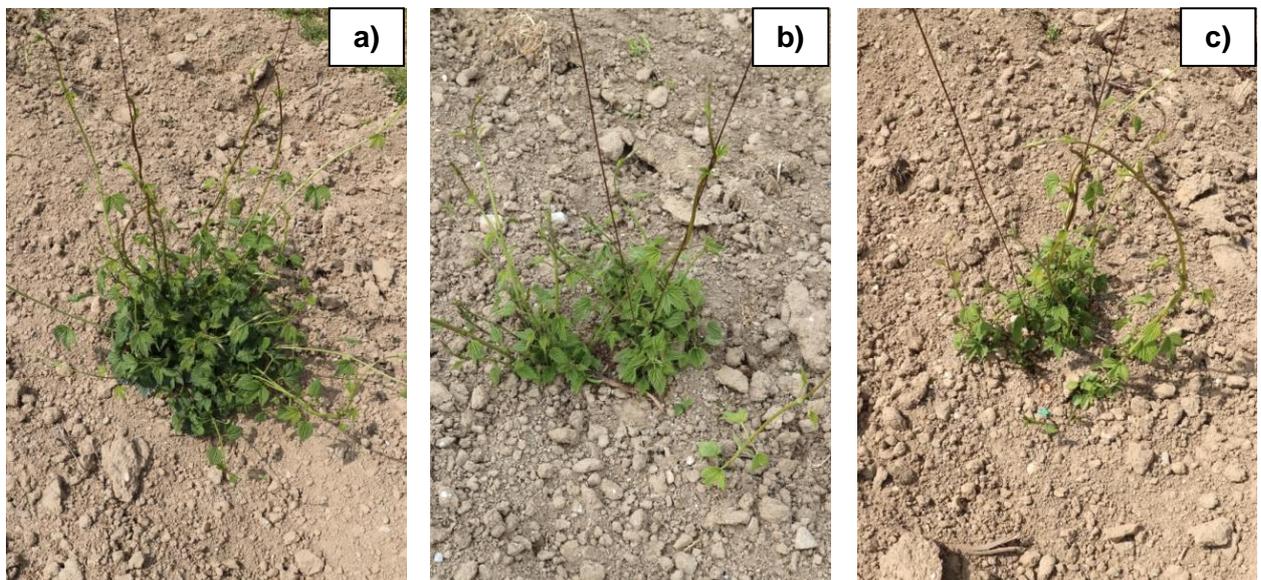


Abb. 5.16: Einfluss der Stickstoffdüngung (2018) auf den Wiederaustrieb im Folgejahr (2019) (V2\_L\_HS\_19): **a)** Reguläre N-Düngung; **b)** Reduzierte N-Düngung; **c)** Keine N-Düngung.

### 5.2.2 Doldenertrag und Alphasäuregehalt

Im ersten Versuchsjahr 2017 führte ein N-Angebot in Höhe von  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  (F2 bis F6) im Vergleich zur Kontrolle (F1) am lehmigen Standort, unabhängig vom Zeitpunkt und der Art der Ausbringung, weder bei Herkules noch bei Perle zu einer signifikanten Steigerung des Doldenertrags (Tab. 5.17). Im Gegensatz dazu reagierten die nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (F1) am sandigen Standort im Vergleich zu den mit  $180$  (Herkules) bzw.  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Perle) versorgten Varianten mit einem um  $23,4 \%$  (Herkules) bzw.  $13,7 \%$  (Perle) geringeren Doldenertrag. Obwohl am sandigen Standort höhere N-Mengen gedüngt wurden, unterschied sich das Ertragsniveau der gedüngten Versuchsvarianten (F2 bis F6) zwischen beiden Standorten nur geringfügig.

Am sandigen Standort erzielte im Jahr 2017 jede Variante mit Fertigation (F3 bis F6) einen höheren Ertrag als bei ausschließlich granulierter Ausbringung des Stickstoffs (F2), wobei sich bei Herkules deutlichere Unterschiede zeigten (Tab. 5.17). Die stärksten positiven Ertragseffekte ( $9 \%$  Mehrertrag) wurden sowohl bei Herkules, als auch Perle bei Ausbringung von einem Drittel der gesamten N-Menge verteilt auf einen 6-wöchigen Zeitraum ab KW25 (F4) erfasst. Am lehmigen Standort hingegen konnte eine positive Beeinflussung des Doldenertrags durch Fertigation nur bei der Sorte Herkules und nur für die Verteilung des Stickstoffs über einen 11-wöchigen Zeitraum ab KW25 (F3, F5) festgestellt werden.

Des Weiteren führte die ausschließlich granuliertete Ausbringung des Stickstoffs (F2) am lehmigen Standort der Sorte Herkules im Vergleich zur Kontrollvariante (F1) mit  $-7,1 \%$  zu einer signifikanten Reduktion des Alphasäuregehalts (Tab. 5.17). Wurden hingegen  $1/3$  (F3, F4) bzw.  $2/3$  (F5, F6) der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser ausgebracht, lag der Gehalt an Alphasäuren im Vergleich zu F2 im Mittel um  $12,4 \%$  bzw.  $6,9 \%$  höher. Weiterhin erreichten F3 und F5, mit Verteilung des Stickstoffs über einen längeren Zeitraum (11 Wochen), jeweils einen geringeren Gehalt als bei Konzentration derselben N-Menge auf 6 Wochen (F4, F6). Dieser Unterschied zeigte sich tendenziell auch bei Herkules am sandigen Standort (Tab. 5.17).

Tab. 5.17: Versuchsserie 2 – 2017: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Herkules	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	Lehm	p=0,027 *	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p=0,084 n.s.
F1	4.478	ab	3.867	c	17,0	ab	18,3	
F2	4.294	b	4.590	b	15,8	c	18,3	
F3	4.640	a	4.682	ab	17,5	ab	18,5	
F4	4.451	ab	5.010	a	18,0	a	19,0	
F5	4.503	ab	4.728	ab	16,5	bc	18,4	
F6	4.319	b	4.850	ab	17,3	ab	19,2	

Perle	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	Lehm	p=0,907 n.s.	Sand	p=0,015 *	Lehm	p=0,72 n.s.	Sand	p<0,001 ***
F1	2.758		2.516	b	9,7		8,0	c
F2	2.811		2.780	ab	9,5		8,5	bc
F3	2.896		2.862	ab	9,7		8,4	bc
F4	2.797		3.027	a	9,6		8,4	bc
F5	2.851		2.828	ab	9,7		8,9	ab
F6	2.877		2.811	ab	9,4		9,3	a

Im zweiten Versuchsjahr 2018 wurde auch am lehmigen Standort an beiden Sorten im Vergleich zur Düngung mit 100 kg N ha<sup>-1</sup> eine signifikante Reduktion des Doldenertrags nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (F1) erfasst (Tab. 5.18). Am sandigen Standort ergab sich, im Vergleich zum Vorjahr 2017, eine zunehmende Verringerung des Ertragsniveaus nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (F1). Diese zunehmende Ertragsreduktion setzte sich im dritten Versuchsjahr 2019 an beiden Standorten und Sorten fort (Tab. 5.19). Die durchschnittliche Ertragssteigerung durch eine Düngung mit Stickstoff (F2 bis F6d) lag in den Versuchsjahren 2018 und 2019 je nach Standort und Sorte bei 29 bis 82 %. Dabei wurde unabhängig vom Standort, der Sorte sowie dem Zeitpunkt und der Art der Ausbringung eine statistische Signifikanz nachgewiesen. Auffällig im Jahr 2018 war, dass eine Reduktion der N-Düngung (F6a) um 17 kg auf 83 kg N ha<sup>-1</sup> (Perle Lehm) bzw. um 100 kg N ha<sup>-1</sup> auf 50 kg N ha<sup>-1</sup> (Perle Sand) im Vergleich zur granulierten Ausbringung

(F2) zu keinem Minderertrag führte (Tab. 5.18). Weiterhin war durch die verringerte N-Düngung auch keine negative Beeinflussung des Alphasäuregehalts nachweisbar.

In den Versuchsjahren 2018 und 2019 bestätigte sich, dass durch Düngesysteme mit Fertigation (F5 bis F6d) im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Applikation (F2) eine Steigerung des Doldenertrags erreicht werden kann (Tab. 5.18, Tab. 5.19). Die Höhe der Ertragssteigerung war dabei sowohl von der Sorte, als auch den spezifischen Gegebenheiten des Standortes abhängig. Es zeigte sich jedoch auch, dass durch Fertigation im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Ausbringung nicht grundsätzlich höhere Erträge erzielt werden, sondern der Zeitpunkt der N-Applikation von Bedeutung ist und zugleich die Sorte sowie der Standort Einfluss nehmen.

Bei der Sorte Herkules am lehmigen Standort führte im Versuchsjahr 2018, gegenüber der ausschließlich granulierten N-Applikation (F2), vor allem die Konzentration von 2/3 der gesamten N-Menge ( $100 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) auf 6 Wochen ab KW25 (F6) zu positiven Ertragseffekten (Tab. 5.18). Die Verteilung derselben N-Menge auf einen 11-wöchigen Zeitraum ab KW25 (F5) wirkte sich im Vergleich zu F6 negativ aus. Auch für die Sorte Perle konnte an beiden Standorten gezeigt werden, dass bei einer Applikation von 2/3 der Gesamt-N-Menge ( $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  Lehm bzw.  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  Sand) ab KW25 (F5, F6), durch die Konzentration auf 6 Wochen (F6) im Vergleich zur Verteilung auf 10 Wochen (F5) ein höherer Ertrag erreicht wird. Bei Herkules am sandigen Standort hingegen wurde die stärkste Ertragssteigerung im Vergleich zu F2 durch die Verteilung von 2/3 des Stickstoffs auf 11 Wochen ab KW25 (F5) erreicht. Eine Verfrühung des 6-wöchigen Zeitfensters um zwei Wochen mit Beginn der Ausbringung ab KW23 (F6b) führte bei Herkules und Perle am lehmigen Standort im Vergleich zu F6 zu einer geringeren Ertragssteigerung, wohingegen sich bei Perle am sandigen Standort tendenziell positive Effekte ergaben. Die Verfrühung des 6-wöchigen Ausbringfensters um zwei Wochen mit Beginn ab KW23 (F6b) wirkte sich bei Herkules am lehmigen Standort tendenziell positiv auf den Alphasäuregehalt aus.

Tab. 5.18: Versuchsserie 2 – 2018: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Herkules	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p=0,005 **	Sand	p=0,346 n.s.
F1	3.428	b	3.038	c	16,9	b	17,5	
F2	4.385	a	4.012	b	16,9	b	16,5	
F6a	4.432	a	4.268	ab	17,2	ab	17,4	
F6b	4.441	a	4.424	ab	18,1	a	16,8	
F5	4.238	a	4.661	a	16,8	b	17,1	
F6	4.609	a	4.393	ab	17,3	ab	16,8	

Perle	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p=0,012 **	Sand	p=0,521 n.s.
F1	1.778	d	1.623	d	8,5	c	7,0	
F2	2.242	c	2.263	c	9,8	a	7,2	
F6a	2.411	bc	2.342	bc	9,1	abc	7,5	
F6b	2.528	ab	2.699	a	9,4	ab	7,4	
F5	2.318	bc	2.431	abc	9,4	ab	7,4	
F6	2.719	a	2.611	ab	9,1	bc	7,3	

Im dritten Versuchsjahr 2019 erfolgte durch die gezielte Verschiebung des 6-wöchigen Ausbringfensters im Rahmen der Varianten F6 bis F6d eine verstärkte Untersuchung des Einflusses des Zeitpunkts der N-Applikation über Fertigation. Dabei führte eine späte Applikation von 2/3 der gesamten N-Menge ab KW26 (F6d) bei Herkules am lehmigen Standort tendenziell zu den niedrigsten Erträgen, wohingegen durch diesen Applikationszeitpunkt am sandigen Standort die höchsten erreicht wurden (Tab. 5.19). Am sandigen Standort der Sorte Perle bestätigten sich die Ergebnisse des Vorjahres 2018, wonach die frühe Ausbringung des Stickstoffs über das Bewässerungswasser ab KW23 (F6b) die stärksten positiven Ertragseffekte hatte. Eine späte Applikation ab KW26 (F6d) führte hingegen zu Mindererträgen. Die Variante F6c der Sorte Perle am sandigen Standort sollte aufgrund der Beeinflussung des Wachstums durch Vorjahreseffekte (vgl. 5.2.1) von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Hinsichtlich des Alphasäuregehalts wurden bei Herkules am lehmigen Standort in den Varianten F6b und F6c mit Ausbringung des

Stickstoffs ab KW23 bzw. KW24 höhere Gehalte als bei der Applikation ab KW25 bzw. KW26 erfasst.

Tab. 5.19: Versuchsserie 2 – 2019: Mittlerer Ertrag und mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Herkules	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p=0,005 **	Sand	p=0,051 n.s.
F1	2.141	b	2.324	b	17,2	b	18,5	
F2	3.639	a	3.984	a	17,2	b	18,2	
F6c	3.836	a	4.084	a	18,3	ab	19,3	
F6b	3.727	a	4.226	a	18,9	a	18,6	
F6d	3.590	a	4.496	a	17,9	ab	18,4	
F6	3.752	a	4.324	a	17,5	b	19,8	

Perle	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]				Alphasäure [%]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p=0,059 n.s.	Sand	p=0,006 **
F1	1.671	b	1.386	c	9,3		8,0	b
F2	2.560	a	2.266	b	9,5		8,3	ab
F6c	2.828	a	2.279	b	9,1		8,6	a
F6b	2.803	a	2.606	a	9,1		8,1	ab
F6d	2.835	a	2.367	ab	9,5		8,6	a
F6	2.812	a	2.466	ab	8,9		8,3	ab

### 5.2.3 Restpflanzenbiomasse

Neben der Ermittlung der Parameter Doldenertrag und Alphasäuregehalt erfolgte im Zuge der Versuchsernte auch die Bestimmung der Restpflanzenbiomasse.

Im ersten Versuchsjahr 2017 beeinflusste eine N-Düngung in Höhe von 100 kg N ha<sup>-1</sup> in granulierter Form (F2) die Restpflanzenbiomasse der Sorte Herkules am lehmigen Standort im Vergleich zur Kontrolle (F1) nicht (Tab. 5.20). Die Sorte Perle hingegen reagierte am lehmigen Standort auf 100 kg N ha<sup>-1</sup>, unabhängig von Art und Zeitpunkt der Ausbringung (F2 bis F6), im Vergleich zur Kontrolle (F1) tendenziell mit einer höheren Biomassebildung. Im Gegensatz dazu bildeten die Sorten Herkules und Perle am sandigen

Standort durch eine Düngung mit Stickstoff im Mittel eine 33 bzw. 12 % höhere Restpflanzenbiomasse.

Wurde bei Herkules am lehmigen Standort hingegen ein Teil der gesamten N-Menge über Fertigation appliziert (F3 bis F6), bildeten die Pflanzen im Vergleich zu F2 durchschnittlich 8,3 % mehr Biomasse (Tab. 5.20). Am sandigen Standort wurde eine vergleichbare Steigerung der Biomassebildung bei Herkules nur bei Applikation von 1/3 des gesamten Stickstoffs über das Bewässerungswasser (F3, F4) erreicht. Auch die Sorte Perle reagierte am sandigen Standort auf die Ausbringung von 1/3 der gesamten N-Menge innerhalb eines 6-wöchigen Zeitraums ab KW25 (F4) im Vergleich zur ausschließlich granulierten Applikation (F2) tendenziell mit einer höheren Biomassebildung.

Tab. 5.20: Versuchsserie 2 – Jahr 2017: Mittlere Restpflanzenbiomasse der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Variante	Herkules [t TM ha <sup>-1</sup> ]				Perle [t TM ha <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p=0,004 **	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p=0,64 n.s.	Sand	p=0,038 *
F1	5,5	b	5,3	c	4,5		3,8	b
F2	5,6	ab	6,7	b	4,7		4,1	ab
F3	5,9	ab	7,2	ab	4,8		4,3	ab
F4	6,0	a	7,4	a	4,7		4,5	a
F5	6,0	a	6,8	b	4,8		4,2	ab
F6	5,8	ab	7,0	ab	4,8		4,3	ab

Im zweiten Versuchsjahr 2018 führte eine Düngung mit 100 kg N ha<sup>-1</sup> durch die Reduktion der Biomassebildung nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen auch am lehmigen Standort, unabhängig von der Sorte, zu einer signifikanten Steigerung der Restpflanzenbiomasse (Tab. 5.21). Am sandigen Standort verringerte sich die Biomassebildung nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen im Vergleich zum Vorjahr 2017, wodurch eine Düngung mit 180 (Herkules) bzw. 150 kg N ha<sup>-1</sup> (Perle) zu einer stärkeren Steigerung der Restpflanzenbiomasse um 57 bzw. 62 % führte. Die zunehmende Reduktion der Restpflanzenbiomasse nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen setzte sich, vergleichbar zur Entwicklung des Doldeenertrags, im dritten Versuchsjahr 2019 an beiden Standorten, unabhängig von der Sorte fort. Infolge dieser Entwicklung verstärkte sich die Steigerung der

Restpflanzenbiomasse durch die Ausbringung von Stickstoff, wodurch Werte zwischen 43 und 96 % erreicht wurden.

Im Gegensatz zur ausschließlich granulierten Applikation des Stickstoffs (F2) förderte die Ausbringung eines Anteils über Fertigation (F5 bis F6b) bei Herkules am sandigen Standort die Biomassebildung durchschnittlich um 8 % (Tab. 5.21). Bei Herkules am lehmigen Standort reduzierte sich die Restpflanzenbiomasse im Vergleich zu F2 tendenziell bei einer späten Ausbringung des Stickstoffs (F6a) und bei einer Verteilung über einen 11-wöchigen Zeitraum (F5). An beiden Versuchsstandorten der Sorte Perle führte die Konzentration von 2/3 der Gesamt-N-Menge auf einen 6-wöchigen Zeitraum ab KW23 (F6b) bzw. KW25 (F6) zu einer erhöhten Biomassebildung im Vergleich zu F2. Wurde dieselbe N-Menge hingegen über einen Zeitraum von 10 Wochen mit Beginn ab KW25 gedüngt (F5) lag die Restpflanzenmasse auf dem Niveau der ausschließlich granuliert gedüngten Pflanzen (F2). Auffällig bei Perle am sandigen Standort war, dass die Reduktion der N-Düngung auf 50 kg N ha<sup>-1</sup> bei F6a im Vergleich zu F2 keine verringerte Biomassebildung zur Folge hatte.

Tab. 5.21: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlere Restpflanzenbiomasse der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Variante	Herkules [t TM ha <sup>-1</sup> ]				Perle [t TM ha <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***
F1	4,3	c	4,3	b	3,4	c	2,6	b
F2	6,1	ab	6,3	a	4,4	b	3,9	a
F6a	5,5	b	6,6	a	4,3	b	3,9	a
F6b	5,9	ab	6,9	a	5,2	a	4,6	a
F5	5,7	ab	6,9	a	4,4	b	4,0	a
F6	6,2	a	6,7	a	5,0	a	4,3	a

Im dritten Versuchsjahr 2019 führten bei Herkules am lehmigen Standort bei Ausbringung von 2/3 des gesamten Stickstoffs über Fertigation (F6 bis F6d) nur die Applikationszeitpunkte KW24 (F6c) und KW25 (F6) tendenziell zu einer höheren Restpflanzenbiomasse im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (F2) (Tab. 5.22). Am sandigen Standort hingegen wurde durch die Applikation von 2/3 der Gesamt-N-Menge über das Bewässerungswasser (F6 bis F6d), wie bereits im Vorjahr 2018, grundsätzlich eine

höhere Restpflanzenbiomasse erreicht. Diese Aussage trifft auch für die Sorte Perle am lehmigen Standort zu. Bei Perle am sandigen Standort förderten die Applikationszeitpunkte KW23, KW24 und KW25 (F6b, F6c und F6) die Biomassebildung im Vergleich zu F2, während eine spätere Düngung desselben N-Anteils (F6d) zu keinem Zuwachs mehr führte.

Tab. 5.22: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlere Restpflanzenbiomasse der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Variante	Herkules [t TM ha <sup>-1</sup> ]				Perle [t TM ha <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***
F1	2,8	b	3,6	b	2,7	c	2,1	c
F2	4,5	a	6,7	a	3,8	b	3,4	b
F6c	4,9	a	7,0	a	4,3	ab	3,9	ab
F6b	4,6	a	7,2	a	4,3	a	4,4	a
F6d	4,5	a	6,9	a	4,3	ab	3,5	b
F6	4,7	a	7,1	a	4,4	a	4,1	a

#### 5.2.4 Stickstoffgehalt

Im ersten Versuchsjahr 2017 reagierten nicht mit Stickstoff gedüngte Pflanzen (F1) der Sorte Herkules an beiden Standorten mit reduzierten N-Gehalten sowohl in der Restpflanze als auch in den Dolden (Tab. 5.23). Dabei ist anzumerken, dass sich am sandigen Standort, wo auch eine Verringerung des Doldenertrags und der Restpflanzenbiomasse festgestellt wurde (Tab. 5.17, Tab. 5.20), der N-Gehalt stärker reduzierte. Bei der Sorte Perle wurde hingegen ausschließlich am sandigen Standort eine signifikante Verringerung des N-Gehalts nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen festgestellt (Tab. 5.23).

Während bei Herkules am lehmigen Standort die ausschließlich granuliert Applikation von 100 kg N ha<sup>-1</sup> (F2) zu den höchsten N-Gehalten führte, bestanden am sandigen Standort keine Unterschiede zwischen den mit 180 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Versuchsvarianten (F2 bis F6). Auch für die Sorte Perle konnten weder am lehmigen, noch am sandigen Standort Unterschiede zwischen den N-Düngevarianten gemessen werden.

Tab. 5.23: Versuchsserie 2 – Jahr 2017: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Herkules	N-Gehalt [% i. d. TM]							
	Restpflanze				Dolden			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***
F1	1,66	c	1,18	b	2,97	c	2,32	b
F2	2,03	a	1,68	a	3,47	a	3,01	a
F3	1,73	bc	1,70	a	3,06	bc	2,97	a
F4	1,81	bc	1,71	a	3,19	bc	3,05	a
F5	1,86	abc	1,76	a	3,27	ab	3,01	a
F6	1,92	ab	1,77	a	3,29	ab	2,97	a

Perle	N-Gehalt [% i. d. TM]							
	Restpflanze				Dolden			
	Lehm	p=0,216 n.s.	Sand	p=0,033 *	Lehm	p=0,794 n.s.	Sand	p<0,001 ***
F1	2,09		2,15	b	3,12		2,88	b
F2	2,31		2,46	ab	3,18		3,20	a
F3	2,22		2,47	ab	3,18		3,28	a
F4	2,22		2,44	ab	3,14		3,26	a
F5	2,24		2,56	a	3,20		3,39	a
F6	2,15		2,57	a	3,15		3,26	a

Im zweiten Versuchsjahr 2018 führte eine Düngung mit 100 kg N ha<sup>-1</sup> (F2 bis F6b) bei Herkules am lehmigen Standort (Tab. 5.24) im Vergleich zur Kontrolle (F1) unabhängig von der Ausbringungsart zu signifikant höheren N-Gehalten in den Dolden, wohingegen der N-Gehalt im Restpflanzenmaterial nur bei Varianten mit Fertigation (F5 bis F6b) tendenziell höher lag. Hingegen erreichten die mit 180 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Pflanzen (Herkules) am sandigen Standort grundsätzlich höhere N-Gehalte, wodurch die Ergebnisse des Vorjahres 2017 bestätigt wurden. Weiterhin zeigt ein Vergleich der Standorte (Herkules) auf, dass der N-Gehalt der Restpflanze der mit 100 kg N ha<sup>-1</sup> (F2 bis F6b) gedüngten Pflanzen des lehmigen Standortes tendenziell auf dem Niveau der nicht gedüngten Kontrolle (F1) des sandigen Bodens lag.

Wie sich bereits bei Herkules (Lehm) andeutete, wurden am lehmigen Standort auch bei der Sorte Perle im Vergleich zur Kontrolle (F1) nur bei Applikation von 2/3 der Gesamt-

N-Menge über Fertigation (F5 bis F6b) erhöhte N-Gehalte gemessen, wohingegen die ausschließlich granuliert N-Düngung zu keinem Anstieg führte. Am sandigen Standort hingegen führte eine Düngung mit 150 kg N ha<sup>-1</sup> (F2, F5, F6, und F6b) unabhängig von Zeitpunkt und Art der Ausbringung, zu einer signifikanten Erhöhung der N-Gehalte im Vergleich zur Kontrolle (F1). Erfolgte dort eine Reduktion der N-Düngung auf 50 kg N ha<sup>-1</sup> (F6a) (Tab. 4.9), wurden verringerte N-Gehalte gemessen, die auf dem Niveau nicht gedüngter Kontrollpflanzen (F1) lagen.

Tab. 5.24: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Herkules	N-Gehalt [% i. d. TM]							
	Restpflanze				Dolden			
	Lehm	p=0,117 n.s.	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***
F1	1,29		1,30	b	2,04	b	2,14	b
F2	1,29		1,94	a	2,42	a	3,13	a
F6a	1,35		1,91	a	2,46	a	3,27	a
F6b	1,37		1,99	a	2,44	a	3,26	a
F5	1,42		1,95	a	2,48	a	3,15	a
F6	1,44		1,87	a	2,62	a	3,24	a

Perle	N-Gehalt [% i. d. TM]							
	Restpflanze				Dolden			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***
F1	1,87	bc	2,15	b	2,59	c	2,95	b
F2	1,82	c	2,45	a	2,72	bc	3,37	a
F6a	1,99	ab	2,21	b	2,90	ab	3,02	b
F6b	1,97	abc	2,49	a	2,86	ab	3,47	a
F5	2,03	a	2,58	a	3,01	a	3,53	a
F6	2,11	a	2,63	a	2,95	a	3,39	a

Im dritten Versuchsjahr 2019 bestätigten sich die Ergebnisse des Vorjahres 2018 dahingehend, dass eine Düngung mit Stickstoff sowohl bei Herkules, als auch Perle an beiden Standorten, unabhängig vom Zeitpunkt und der Art der Applikation des Stickstoffs zu erhöhten N-Gehalten im Vergleich zur Kontrolle F1 führte (Tab. 5.31). Weiterhin ist

anzuführen, dass sich das Niveau der N-Gehalte am sandigen Standort im Vergleich zum Vorjahr 2018 bei beiden Sorten reduzierte.

Die Ausbringung von 2/3 der gesamten N-Menge über Fertigation ab KW25 (F6) bzw. KW26 (F6d) führte bei Herkules am lehmigen Standort, im Vergleich zur ausschließlich granulierten Düngung (F2), zu höheren N-Gehalten in der Restpflanze. An den Doldenproben beider Standorte (Herkules) zeigte sich, dass frühe Ausbringzeitpunkte ab KW23 bzw. KW24 (F6b, F6c) im Vergleich zur Applikation ab KW25 bzw. KW26 (F6, F6d) zu verringerten N-Gehalten führen können.

Tab. 5.25: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer N-Gehalt der Restpflanzen- und Doldenfraktion der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

		N-Gehalt [% i. d. TM]							
		Restpflanze				Dolden			
Herkules	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	
	F1	1,38	c	1,16	b	2,17	c	1,93	c
F2	1,49	bc	1,44	a	2,70	ab	2,63	ab	
F6c	1,56	ab	1,49	a	2,62	b	2,51	b	
F6b	1,53	ab	1,49	a	2,55	b	2,55	b	
F6d	1,64	a	1,50	a	2,75	ab	2,81	a	
F6	1,63	a	1,36	a	2,85	a	2,62	ab	

		Restpflanze				Dolden			
Perle	Lehm	p=0,001 **	Sand	p=0,178 n.s.	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	
	F1	1,65	b	1,97		2,19	c	2,62	b
F2	1,91	ab	2,26		2,54	b	3,05	a	
F6c	1,99	a	2,23		2,67	ab	2,93	a	
F6b	2,05	a	2,13		2,83	a	2,98	a	
F6d	2,07	a	2,29		2,74	ab	2,97	a	
F6	1,98	a	2,21		2,78	a	2,94	a	

### 5.2.5 Stickstoffentzug

Im Versuchsjahr 2017 führte eine N-Düngung bei Herkules mit 100 kg N ha<sup>-1</sup> am lehmigen bzw. mit 180 kg N ha<sup>-1</sup> am sandigen Standort (F2 bis F6), im Vergleich zur Kontrolle (F1), jeweils zu einer signifikanten Steigerung des N-Entzugs der Gesamtpflanze (Tab. 5.26). Dabei lagen die N-Entzüge gedüngter Varianten am sandigen Standort im Mittel geringfügig über denen des lehmigen. Bei der Sorte Perle erzielten die mit 100 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Pflanzen (F2 bis F6) am lehmigen Standort zwar höhere N-Entzüge, eine statistische Absicherung des Unterschieds zur Kontrolle (F1) war jedoch nicht möglich. Hingegen erreichten die mit 150 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Pflanzen (F2 bis F6) der Sorte Perle am sandigen Standort einen signifikant höheren N-Entzug als die der Kontrolle (F1). Weiterhin entzogen nicht mit Stickstoff gedüngte Pflanzen (F1) am sandigen Standort, im Vergleich zum lehmigen, im ersten Versuchsjahr 2017 um 67 kg N ha<sup>-1</sup> (Herkules) bzw. 24 kg N ha<sup>-1</sup> (Perle) weniger Stickstoff.

Ausschließlich granuliert gedüngte Pflanzen (F2) der Sorte Herkules erreichten am lehmigen Standort (100 kg N ha<sup>-1</sup>), mit einer im Vergleich zu F1 um 37 kg N ha<sup>-1</sup> höheren N-Aufnahme, den höchsten N-Entzug (Tab. 5.26). Am sandigen Standort hingegen führten N-Düngesysteme mit Fertigation sowohl bei Herkules (180 kg N ha<sup>-1</sup>), als auch Perle (150 kg N ha<sup>-1</sup>) tendenziell zu höheren N-Aufnahmen. Wurde bei Herkules am sandigen Standort ein Teil des Stickstoffs über das Bewässerungswasser gedüngt (F3 bis F6), lag der N-Entzug bei Konzentration der Ausbringung auf einen 6-wöchigen Zeitraum (F4, F6) jeweils tendenziell höher als bei Applikation derselben N-Menge über einen längeren Zeitraum (F3, F5).

Tab. 5.26: Versuchsserie 2 – Jahr 2017: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Variante	Herkules [kg N ha <sup>-1</sup> ]				Perle [kg N ha <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p=0,351 n.s.	Sand	p=0,004 *
F1	211	c	144	b	172		148	b
F2	248	a	239	a	190		182	a
F3	230	b	247	a	189		190	a
F4	237	ab	264	a	183		198	a
F5	244	ab	241	a	189		195	a
F6	239	ab	254	a	185		194	a

Im zweiten Versuchsjahr 2018 reduzierte sich der N-Entzug der zweijährig nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (F1) mit  $-93 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Herkules) bzw.  $-67 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Perle) am lehmigen Standort stärker als am sandigen ( $-26 \text{ kg N ha}^{-1}$  bei HS,  $-49 \text{ kg N ha}^{-1}$  bei PE) (Tab. 5.27). Die Reduktion des N-Entzugs nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (F1) setzte sich auch im dritten Versuchsjahr 2019 sortenunabhängig fort (Tab. 5.28). Im Gegensatz zum ersten Versuchsjahr 2017 unterschied sich der absolute N-Entzug einer Sorte innerhalb des Jahres 2018 bzw. 2019 zwischen den beiden Standorten nicht (Tab. 5.27, Tab. 5.28).

Erfolgte eine Düngung mit Stickstoff (F2 bis F6d), führte dies in den Versuchsjahren 2018 und 2019, unabhängig vom Standort und der Sorte, zu einer signifikanten Steigerung des N-Entzugs (Tab. 5.27, Tab. 5.28). Im Versuchsjahr 2018 lag die N-Aufnahme gedüngter Pflanzen (F2 bis F6b) am sandigen Standort auf dem Niveau des Vorjahres 2017, wohingegen am lehmigen Standort sowohl Herkules, als auch Perle geringere Entzüge erreichten (Tab. 5.27).

Im Vergleich zur ausschließlich granulierten Ausbringung des Stickstoffs (F2) wurden im Jahr 2018 durch Applikation von  $2/3$  der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser (F5, F6, F6b) bei Herkules am sandigen Standort sowie Perle an beiden Standorten höhere N-Entzüge erzielt (Tab. 5.27). Bei Herkules am lehmigen Standort hingegen führten Düngesysteme mit Fertigation nur bei einer Konzentration von  $2/3$  der Gesamt-N-Menge auf einen 6-wöchigen Zeitraum ab KW25 (F6) zu höheren N-Entzügen im Vergleich zu F2. Auch bei der Sorte Perle zeigte sich, dass der Zeitpunkt der Ausbringung des Stickstoffs über Fertigation den N-Entzug beeinflusst. An beiden Standorten führte eine Konzentration von  $2/3$  der Gesamt-N-Menge auf einen 6-wöchigen Zeitraum ab KW23 (F6b) bzw. KW25 (F6) jeweils zu höheren N-Entzügen als bei einer Verteilung derselben N-Menge über einen längeren Zeitraum von 11 Wochen (F5). Auffällig am sandigen Standort der Sorte Perle ist, dass sich durch eine Reduktion der N-Düngung auf  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$  (F6a) der N-Entzug im Vergleich zur Ausbringung von  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  (F2) nur geringfügig reduzierte.

Tab. 5.27: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Variante	Herkules [kg N ha <sup>-1</sup> ]				Perle [kg N ha <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***
F1	118	c	118	b	105	d	99	d
F2	174	b	240	a	135	c	164	bc
F6a	172	b	248	a	148	c	150	c
F6b	179	ab	273	a	166	ab	198	a
F5	175	b	264	a	151	bc	181	ab
F6	199	a	253	a	177	a	194	a

Im dritten Versuchsjahr 2019 erfolgte eine verstärkte Untersuchung der Auswirkungen einer Verschiebung des 6-wöchigen Ausbringfensters. Bei der Sorte Herkules führten dabei an beiden Standorten nur bestimmte Düngetermine zu höheren N-Entzügen als bei ausschließlich granulierter N-Ausbringung (Tab. 5.28). Wurden 2/3 der Gesamt-N-Menge über Fertigation, verteilt auf einen 6-wöchigen Zeitraum appliziert (F6 bis F6d), führte am lehmigen Standort die Ausbringung ab KW25 (F6), wie bereits im Vorjahr 2018, tendenziell zu den höchsten N-Entzügen. Am sandigen Standort hingegen wurden die höchsten N-Entzüge bei Beginn ab KW26 (F6d) gemessen.

Auch bei der Sorte Perle bestanden Unterschiede zwischen den Standorten. Während Düngesysteme mit Fertigation am lehmigen Standort unabhängig vom Zeitpunkt der Ausbringung (F6 bis F6d) zu einer signifikanten Steigerung des N-Entzugs im Vergleich zur Kontrolle führten, konnten am sandigen Standort die Ergebnisse des Vorjahres 2018 bestätigt werden, wonach die Termine KW23 (F6b) bzw. KW25 (F6) tendenziell die höchste Effektivität aufwiesen.

Tab. 5.28: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer N-Entzug der Gesamtpflanze der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Variante	Herkules [kg N ha <sup>-1</sup> ]				Perle [kg N ha <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***
F1	80	c	86	c	77	c	74	c
F2	155	b	194	b	131	b	140	b
F6c	166	ab	199	ab	153	a	147	ab
F6b	155	b	207	ab	160	a	163	a
F6d	163	ab	213	a	159	a	145	ab
F6	172	a	198	ab	157	a	156	ab

### 5.2.6 Nmin-Gehalte

Im Frühjahr des ersten Versuchsjahres 2017 wurden in den Feldversuchen am sandigen Standort (V2\_S) mittlere bis hohe Nmin-Gehalte erfasst, während am lehmigen Standort (V2\_L) mit bis zu 149 kg N ha<sup>-1</sup> sehr hohe Werte gemessen wurden (Tab. 5.29). Im Herbst nach der Ernte reduzierten sich die Nmin-Gehalte am lehmigen Standort, an dem nur 100 kg N ha<sup>-1</sup> (F2) gedüngt wurden, bei beiden Sorten. Auch am sandigeren Standort verringerten sich die Nmin-Gehalte im Vergleich zum Frühjahr 2017, obwohl dort höhere N-Mengen gedüngt wurden (Tab. 4.7). In den Versuchsjahren 2018 und 2019 lagen die erfassten Nmin-Gehalte sowohl im Frühjahr als auch im Herbst, unabhängig von der Höhe der N-Düngung, auf einem niedrigen Niveau. Eine Ausnahme dabei stellt die Sorte Perle am sandigen Standort dar, wo vor allem im Herbst nach der Ernte erhöhte Nmin-Gehalte gemessen wurden.

Tab. 5.29: Nmin-Gehalte im Boden (0 bis 90 cm) an den Standorten des Versuchsansatzes 2 zu Beginn & Ende Vegetationsperiode (Frühjahr und Herbst).

	Zeitpunkt	Nmin [kg N ha <sup>-1</sup> ]							
		V2_S_PE		V2_S_HS		V2_L_PE		V2_L_HS	
		F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
<b>2017</b>	Frühjahr	92	92	75	75	121	121	149	149
	Herbst	60	70	38	44	43	48	33	50
<b>2018</b>	Frühjahr	43	52	43	51	38	42	50	69
	Herbst	58	81	35	60	23	31	25	26
<b>2019</b>	Frühjahr	40	54	37	38	43	52	28	36
	Herbst	57	76	33	54	41	49	39	44

### 5.2.7 Apparente Stickstoffausnutzung und Stickstoffeffizienz

Die apparente N-Ausnutzung, gemessen an der gesamten oberirdisch gebildeten Biomasse, beschreibt die prozentuale Ausnutzung des eingesetzten Stickstoffs auf Grundlage der Differenzmethode, wobei der N-Entzug nicht gedüngter Pflanzen als Bezugsbasis dient. Hingegen drückt die agronomische N-Effizienz den Mehrertrag an Hopfendolden je eingesetztem Kilogramm Dünger-N unter Berücksichtigung des Ertrags nicht gedüngter Pflanzen aus.

Die Parameter apparente N-Ausnutzung und agronomische N-Effizienz erreichten im Versuchsjahr 2017 am sandigen Standort sowohl bei Herkules, als auch Perle ein höheres Niveau als am lehmigen Standort (Tab. 5.30).

Weiterhin führten Düngesysteme mit Fertigation (F3 bis F6) am sandigen Standort im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (F2) bei beiden Sorten tendenziell zu einer Steigerung der apparenten N-Ausnutzung und N-Effizienz (Tab. 5.30). Sowohl bei Herkules als auch Perle (Sand) wurde im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (F2) vor allem bei Konzentration von 1/3 der Gesamt-N-Menge auf 6 Wochen ab KW25 (F4) eine höhere Ertragsbildung bzw. N-Effizienz gemessen. Am lehmigen Standort der Sorte Herkules erreichten die ausschließlich granuliert gedüngten Pflanzen (F2) tendenziell die höchste apparente N-Ausnutzung, wobei der aufgenommene Stickstoff zugleich jedoch zu einem Minderertrag im Vergleich zu nicht gedüngten Pflanzen (F1) führte. Wurden hingegen 2/3 des Stickstoffs in granulierter Form und 1/3 über Fertigation verteilt auf 11 Wochen ab KW25 (F3) ausgebracht, verringerte sich die apparente N-Ausnutzung signifikant und durch den aufgenommenen Stickstoff wurde im Vergleich zur Kontrolle (F1) ein Mehrertrag erzielt.

Erfolgte bei Herkules (Sand) eine Konzentration des Stickstoffs auf einen 6-wöchigen Zeitraum ab KW25 (F4, F6), verbesserte dies die apparente N-Ausnutzung und N-Effizienz im Vergleich zur Verteilung derselben N-Menge über einen Zeitraum von 11 Wochen (F3, F5).

Tab. 5.30: Versuchsserie 2 – Jahr 2017: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Herkules	Apparente N-Ausnutzung [%]				Agro. N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p=0,027 *	Sand	p=0,189 n.s.	Lehm	p=0,016 *	Sand	p=0,004 **
F1								
F2	37	a	53		-1,8	b	4,0	b
F3	19	b	58		1,6	a	4,5	b
F4	27	ab	67		-0,3	ab	6,4	a
F5	34	ab	54		0,2	ab	4,8	b
F6	28	ab	61		-1,6	b	5,5	ab

Perle	Apparente N-Ausnutzung [%]				Agro. N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p=0,90 n.s.	Sand	p=0,632 n.s.	Lehm	p=0,921 n.s.	Sand	p=0,382 n.s.
F1								
F2	18		23		0,5		1,8	
F3	16		28		1,4		2,3	
F4	11		34		0,4		3,4	
F5	17		32		0,9		2,1	
F6	13		31		1,2		2,0	

Im zweiten Versuchsjahr 2018 erreichten die Parameter apparente N-Ausnutzung und N-Effizienz, unabhängig vom Standort und der Sorte, ein höheres Niveau als im Vorjahr 2017 (Tab. 5.31).

Im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (F2) führten Düngesysteme mit Fertigation (F5 bis F6b) bei der Sorte Herkules am sandigen Standort sowie Perle an beiden Standorten jeweils zu einer Steigerung der apparenten N-Ausnutzung und N-Effizienz (Tab. 5.31). Am lehmigen Standort der Sorte Herkules hingegen bewirkte, bei Ausbringung von 2/3 der Gesamt-N-Menge über Fertigation (F5 bis F6b), nur die Verteilung auf einen 6-wöchigen Zeitraum ab KW25 (F6) eine Erhöhung der apparenten N-Ausnutzung und N-Effizienz im Vergleich zu F2. Wurde dieselbe N-Menge stattdessen über einen Zeitraum von 11 Wochen verteilt (F5), verringerte sich die Ausnutzung des Stickstoffs im Vergleich zu F6 signifikant und die N-Effizienz reduzierte sich um 3,7 kg je

eingesetztem Kilogramm Stickstoff. Die Verteilung des über Fertigation auszubringenden N-Anteils über einen längeren Zeitraum (10 Wochen) ab KW25 (F5) führte im Vergleich zur Konzentration auf 6 Wochen ab KW23 (F6b) bzw. KW25 (F6) auch bei der Sorte Perle zu einer verringerten apparenten N-Ausnutzung und Ertragswirkung. Die Ergebnisse bezüglich der Länge des Ausbringfensters bestätigen die Erkenntnisse aus dem Versuchsjahr 2017.

Hinsichtlich des Beginns des 6-wöchigen Ausbringfensters zeigte sich, dass am lehmigen Standort die Applikation ab KW25 (F6) im Vergleich zu KW23 (F6b) sowohl bei Perle, als auch Herkules zu einer Steigerung der Parameter apparente N-Ausnutzung und N-Effizienz führte, wohingegen sich am sandigen Standort die Düngung ab KW23 (F6b) tendenziell positiv auswirkte.

Tab. 5.31: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Herkules	Apparente N-Ausnutzung [%]				Agro. N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p=0,019 *	Sand	p=0,222 n.s.	Lehm	p=0,198 n.s.	Sand	p=0,032 *
F1								
F2	55	b	68		9,6		5,4	b
F6a	58	b	76		10,7		7,2	ab
F6b	60	ab	86		10,1		7,7	ab
F5	56	b	81		8,1		9,0	a
F6	80	a	75		11,8		7,5	ab

Perle	Apparente N-Ausnutzung [%]				Agro. N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p<0,001 ***	Lehm	p=0,001 **	Sand	p<0,001 ***
F1								
F2	30	c	43	b	4,6	c	4,3	b
F6a	52	c	102	a	7,6	bc	14,4	a
F6b	62	ab	66	b	7,5	ab	7,2	b
F5	47	bc	55	b	5,4	bc	5,4	b
F6	72	a	63	b	9,4	a	6,6	b

Im dritten Versuchsjahr 2019 war, unabhängig vom Standort und der Sorte, ein weiterer Anstieg der Parameter apparente N-Ausnutzung und N-Effizienz im Vergleich zum Vorjahr zu verzeichnen (Tab. 5.32). Weiterhin bestätigte sich die Beobachtung der Jahre 2017 und 2018, dass Düngesysteme mit Fertigation (F6 bis F6d) im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (F2) zu einer Steigerung der apparenten N-Ausnutzung und N-Effizienz führen können.

Bei der Sorte Herkules war an beiden Versuchsstandorten ein Einfluss des Zeitpunkts der N-Ausbringung über Fertigation zu erkennen. Am lehmigen Standort erreichte, gemessen an der oberirdischen Biomasse, wie bereits 2018 die Ausbringung von 2/3 der Gesamt-N-Menge ab KW25 (F6) tendenziell die höchste apparente N-Ausnutzung, wohingegen die Düngung ab KW23 (F6b) zu einer signifikanten Verringerung führte. Die N-Effizienz beider Zeitpunkte unterschied sich hingegen nicht voneinander, diese verringerte sich jedoch tendenziell bei Ausbringung des Stickstoffs ab KW26 (F6d). Am sandigen Standort (Herkules) zeigte sich eine Tendenz hin zu höherer Ertragsbildung je eingesetztem Kilogramm Stickstoff bei Applikation von 2/3 der Gesamt-N-Menge über Fertigation zu späteren Terminen ab KW25 (F6) bzw. KW26 (F6d) im Vergleich zur früheren Ausbringung ab KW23 (F6b) bzw. KW24 (F6c). Bei der Sorte Perle führte am sandigen Standort die früheste Ausbringung des Stickstoffs über Fertigation ab KW23 (F6b) tendenziell zur höchsten Ausnutzung und Effizienz, wohingegen am lehmigen Standort im Versuchsjahr 2019 keine Unterschiede zwischen den Terminen bestanden.

Tab. 5.32: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlere apparente N-Ausnutzung der Gesamtpflanze und mittlere agronomische N-Effizienz bezogen auf den Doldenertrag der Sorten Herkules und Perle in Abhängigkeit des Standortes und der N-Düngung.

Herkules	Apparente N-Ausnutzung [%]				Agro. N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p=0,069 n.s.	Sand	p=0,03 *	Lehm	p=0,085 n.s.	Sand	p=0,043 *
F1								
F2	62	b	89	b	12,5		13,8	b
F6c	72	ab	94	ab	14,1		14,7	ab
F6b	63	b	100	ab	13,2		15,8	ab
F6d	69	ab	106	a	12,1		18,1	a
F6	77	a	93	ab	13,4		16,7	ab

Perle	Apparente N-Ausnutzung [%]				Agro. N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]			
	Lehm	p<0,001 ***	Sand	p=0,019 *	Lehm	p=0,101 n.s.	Sand	p=0,016 *
F1								
F2	54	b	65	b	8,9		8,8	b
F6c	77	a	72	ab	11,6		8,9	b
F6b	83	a	89	a	11,3		12,2	a
F6d	82	a	71	ab	11,6		9,8	ab
F6	80	a	82	ab	11,4		10,8	ab

### 5.2.8 Stickstoffgehalt in Speicherwurzeln und Austrieb

Zu Beginn des Jahres 2019 erfolgte an beiden Sorten des lehmigeren Standortes die Untersuchung der N-Einlagerung in die Speicherwurzeln in Abhängigkeit von der N-Düngung des Vorjahres (2018). Dafür wurden vor Vegetationsbeginn mehrjährige Speicherwurzeln und im Frühjahr, unmittelbar nach dem Austreiben der Pflanzen, Triebe beprobt und auf Gesamt-N analysiert.

Wie die Ergebnisse der Wurzelanalysen zeigen (Tab. 5.33), lag der N-Gehalt der Speicherwurzeln bei Herkules auf einem niedrigeren Niveau als bei Perle. Des Weiteren erreichten die im Vorjahr (2018) mit 100 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Pflanzen der Varianten F2, F5 und F6 im Vergleich zu nicht mit Stickstoff gedüngten (F1) keinen höheren N-Gehalt in den Speicherwurzeln. Bei der Sorte Perle hingegen lag der ermittelte N-Gehalt bei im

Vorjahr zu 2/3 über Fertigation gedüngten Pflanzen (F5, F6) tendenziell über dem nicht gedüngter (F1).

Tab. 5.33: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer N-Gehalt von Speicherwurzeln (vor Vegetationsbeginn) der Sorten *Herkules* und *Perle* am lehmigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung.

Variante	N-Gehalt [% N i. d. TM]			
	<b>Herkules</b>	p=0,538 n.s.	<b>Perle</b>	p=0,198 n.s.
F1	1,1		1,4	
F2	1,1		1,5	
F5	1,2		1,7	
F6	1,2		1,7	

Ein Vergleich des N-Gehalts der im Frühjahr 2019 untersuchten Triebe des Wiederaustriebs (Tab. 5.34) zeigt, dass die Pflanzen am lehmigen Standort einen geringeren N-Gehalt als am sandigeren aufwiesen. Dabei lag das Niveau der im Vorjahr (2018) gedüngten Pflanzen (F2 bis F6b) des lehmigeren Standortes unter dem nicht gedüngter Pflanzen (F1) des sandigeren Bodens. Des Weiteren wurden bei der Sorte *Herkules* am lehmigen Standort keine Unterschiede in Abhängigkeit von der N-Düngung ermittelt. Bei der Sorte *Perle* hingegen erreichten die im Vorjahr über Fertigation gedüngten Pflanzen (F5 bis F6b) im Vergleich zu nicht mit Stickstoff gedüngten (F1) im Austrieb tendenziell höhere N-Gehalte.

Tab. 5.34: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer N-Gehalt von Trieben des Wiederaustriebs (Frühjahr) der Sorten *Herkules* und *Perle* in Abhängigkeit der N-Düngung.

Variante	N-Gehalt [% N i. d. TM]							
	Lehm				Sand			
	<b>HS</b>	p=0,336 n.s.	<b>PE</b>	p=0,427 n.s.	<b>HS</b>	p=0,856 n.s.	<b>PE</b>	p=0,098 n.s.
F1	4,0		4,1		4,7		4,9	
F2	3,8		4,2		-		-	
F6a	4,2		4,4		-		-	
F6b	3,9		4,3		-		-	
F5	4,2		4,4		-		-	
F6	4,0		4,4		4,7		5,3	

Im Anbaujahr 2020 erfolgte im Zuge der Analysen zur Verteilung von  $^{15}\text{N}$ -markiertem UAN-Stickstoff in den Feldversuchen am lehmigeren Standort vor Vegetationsbeginn erneut eine Untersuchung des N-Gehalts der Speicherwurzeln (Tab. 5.35). Dabei wurde bei beiden Sorten zwischen dem regulären Erntetermin und einer vorzeitigen Ernte unterschieden (vgl. 4.5.8). Eine Beeinflussung des N-Gehalts in den Speicherwurzeln durch den Zeitpunkt der Ernte konnte weder für Herkules noch für Perle festgestellt werden. Des Weiteren lag der N-Gehalt von im Vorjahr (2019) nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (F1) bei beiden Sorten tendenziell unter dem Niveau gedüngter Pflanzen (F2 bis F6x).

Tab. 5.35: Versuchsserie 2 – Jahr 2020: Mittlerer N-Gehalt von Speicherwurzeln (vor Vegetationsbeginn) der Sorten Herkules und Perle am lehmigen Standort in Abhängigkeit des Erntetermins und der N-Düngung.

Variante	N-Gehalt [% N i. d. TM]							
	Herkules				Perle			
	Frühe Ernte	$p=0,143$ n.s.	Reg. Ernte	$p=0,089$ n.s.	Frühe Ernte	$p=0,886$ n.s.	Reg. Ernte	$p=0,077$ n.s.
F1	-		1,17		-		1,23	
F2	-		1,37		-		1,51	
F6b	1,27		1,25		1,50		1,48	
F6	1,25		1,34		1,50		1,44	
F6x	1,43		1,39		-		-	

### 5.2.9 Chlorophyllwerte im Vegetationsverlauf

Ab dem zweiten Versuchsjahr 2018 erfolgte an beiden Standorten und Sorten der Versuchsserie 2 eine regelmäßige Erfassung der Chlorophyllwerte. Die Messungen wurden an Haupttriebblättern des unteren Pflanzenabschnitts durchgeführt. Da bei Variante F6a die Ausbringung von Stickstoff über Fertigation erst ab Feststellung reduzierter Messwerte im Vergleich zu F6b erfolgte (vgl. 4.4.2.2), werden diese Varianten in Abb. 5.17 (Herkules) und Abb. 5.18 (Perle) jeweils miteinander verglichen. Als Referenz dienen dabei ausschließlich granuliert (F2) sowie nicht gedüngte Pflanzen (F1).

Bei Herkules führte eine Düngung mit  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  am lehmigen (Abb. 5.17 a) bzw.  $180 \text{ kg N ha}^{-1}$  am sandigen Standort (Abb. 5.17 b) im Vergleich zur Kontrolle (F1) jeweils zu einem messbar höheren Verlauf der Chlorophyllwerte. Eine Unterscheidung des Kurvenverlaufs der ausschließlich granulierten N-Applikation (F2) und der Düngung von  $2/3$  der Gesamt-N-Menge über das Bewässerungswasser mit Beginn ab KW23 (F6b) ist an keinem der Standorte möglich. Ende Juni wurden an den Pflanzen, welche bis zu diesem Zeitpunkt lediglich mit  $1/3$  der gesamten N-Menge in granulierter Form gedüngt wurden (F6a), reduzierte Chlorophyllwerte erfasst. An beiden Standorten wurde deshalb am 29. Juni mit der Applikation zuvor definierter N-Mengen (Tab. 4.9) über Fertigation begonnen. Am lehmigeren Boden (Abb. 5.17 a) führte diese Verzögerung der Ausbringung bei gleichzeitiger Reduktion der Gesamt-N-Menge um  $6 \text{ kg ha}^{-1}$  (F6a) bis zum nächsten Messtermin Anfang Juli zu weiter sinkenden Chlorophyllwerten, wohingegen bei Pflanzen der Variante F6b ein weiterer Anstieg zu verzeichnen war. Bis zum darauffolgenden Termin (Mitte Juli) sanken die Werte von F2 und F6b, während bei F6a eine Stabilisierung auf dem Niveau der vorherigen Messung stattfand. Im weiteren Verlauf reduzierten sich die Chlorophyllwerte in den Varianten F2, F6a und F6b kontinuierlich und fielen bis Anfang August unter 40. Am sandigeren Standort (Abb. 5.17 b) führte die Verzögerung der Ausbringung und Reduktion der gesamten N-Menge um  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  (F6a) im Zeitraum von Mitte bis Ende Juni zunächst zu einer marginalen Verringerung des Messwertes. Im darauffolgenden Abschnitt, nach Beginn der N-Ausbringung am 29. Juni, konnte bis Mitte Juli ein Anstieg des Chlorophyllwertes erfasst werden. Im weiteren Wachstumsverlauf verringerten sich die Messwerte der gedüngten Varianten (F2, F6a, F6b) geringfügig, wobei sich das Niveau deutlich über dem des lehmigen stabilisierte.

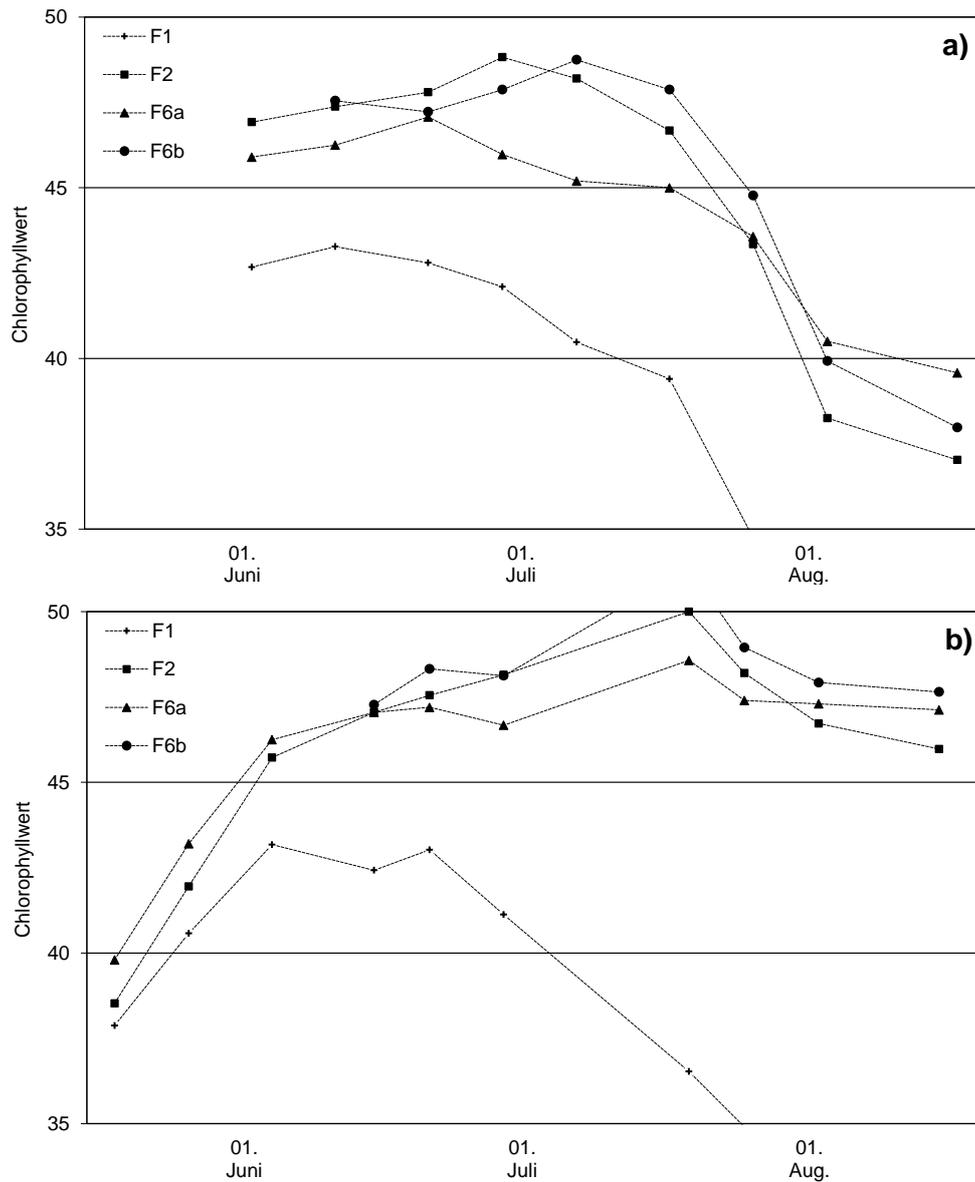


Abb. 5.17: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Herkules am **a)** lehmigen bzw. **b)** sandigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung; Maximaler Chlorophyllwert bei F6a (b) bei 51,3; Minimumwerte zum Zeitpunkt der Reife bei 30 (a) bzw. 33 (b).

Auch bei Perle führte eine N-Düngung mit  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  am lehmigen (Abb. 5.18 a) bzw.  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  am sandigen Standort (Abb. 5.18 b) im Vergleich zur Kontrolle (F1) jeweils zu einem messbar höheren Verlauf der Chlorophyllwerte.

Am 29. Juni wurde an den Pflanzen von F6a, welche bis zu diesem Zeitpunkt lediglich mit  $1/3$  der gesamten N-Menge Ende April in granulierter Form gedüngt wurden, an beiden Standorten reduzierte Chlorophyllwerte erfasst. Die Differenz zur Variante F6b, mit Beginn der N-Ausbringung über Fertigation ab KW23, betrug am leichteren Standort 0,6 und am lehmigeren 1,0 Chlorophyllwerteinheiten. Da der Unterschied jedoch an keinem der Standorte größer als 1,0 war, erfolgte bei F6a am 29. Juni vorerst noch keine N-Ausbringung über Fertigation. Am darauffolgenden Messtermin Anfang Juli überstieg die Differenz das festgelegte Mindestmaß an beiden Orten. Bei Perle am lehmigen Standort (Abb. 5.18 a) wurde deshalb am 6. Juli mit der Applikation von Stickstoff über Fertigation begonnen. Am leichteren Standort (Abb. 5.18 b) war die Entwicklung des Pflanzenbestands jedoch bereits weit fortgeschritten, sodass ein zweites, zuvor festgelegtes Kriterium, nach welchem nach Abschluss des vegetativen Wachstums der Seitentriebe keine Ausbringung mehr erfolgen sollte, Anwendung fand. Obwohl bei F6a am sandigeren Standort keine zusätzliche N-Düngung mehr stattfand, konnte an den Haupttriebblättern des unteren Pflanzenabschnitts keine Reduktion der Chlorophyllwerte erfasst werden. Bei F2 und F6b war hingegen ab Ende Juni ein Anstieg zu erkennen, wodurch diese im weiteren Vegetationsverlauf auf einem höheren Niveau verliefen. Eine Unterscheidung des Kurvenverlaufs der ausschließlich granulierten N-Applikation (F2) und der Düngung von  $2/3$  der Gesamt-N-Menge über das Bewässerungswasser mit Beginn ab KW23 (F6b) ist dabei nicht möglich.

Im Gegensatz dazu fand am lehmigeren Standort (Abb. 5.18 a) bei ausschließlich granulierter N-Düngung (F2) ab Ende Juni eine Reduktion des Messwertes statt, wodurch sich im weiteren Wachstumsverlauf ein geringeres Niveau ergab. Zudem war dort bei F6a trotz der ab Anfang Juli erfolgten N-Düngung über Fertigation kein erneuter Anstieg der Chlorophyllwerte auf das Niveau der Pflanzen von F6b zu erkennen.

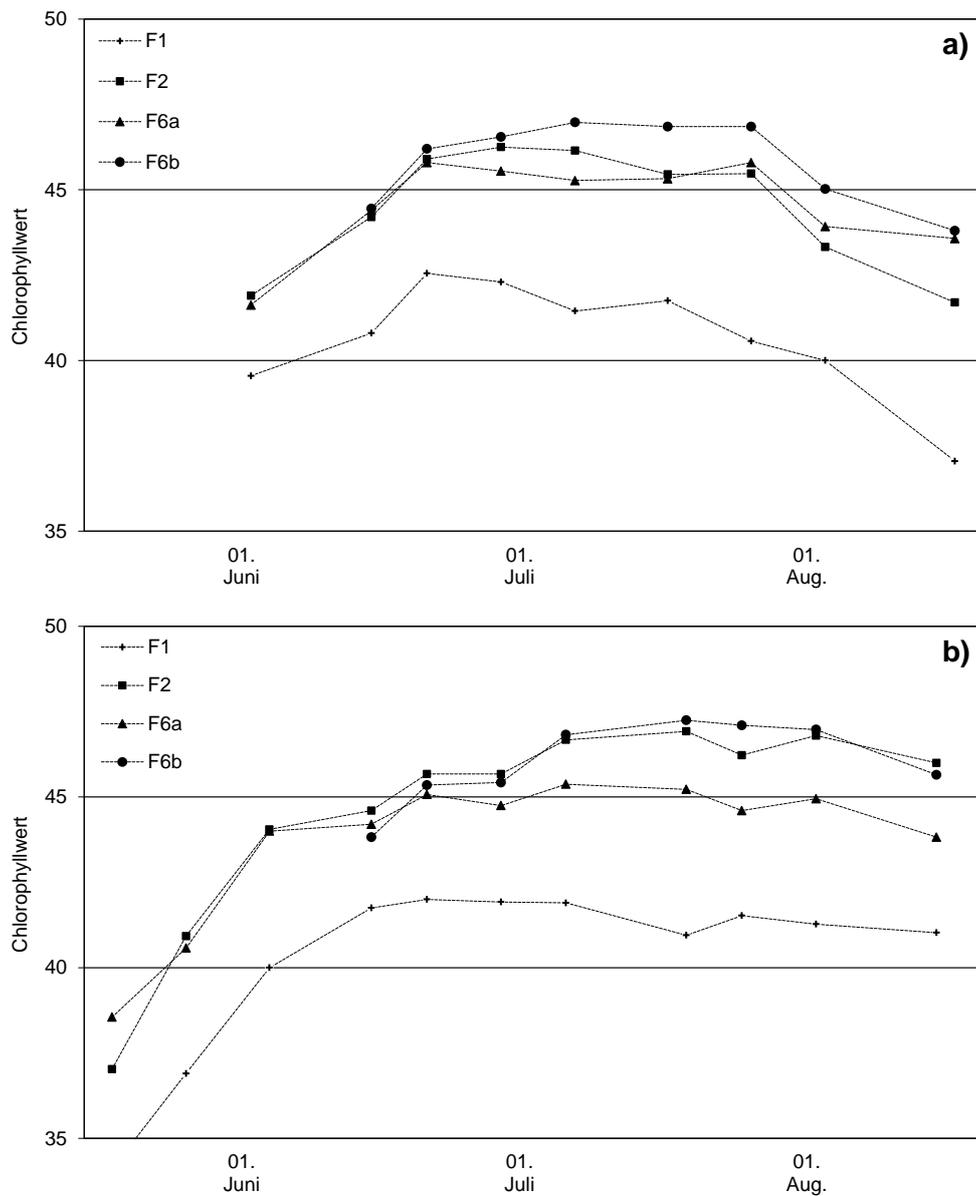


Abb. 5.18: Versuchsserie 2 – Jahr 2018: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Perle am a) lehmigen bzw. b) sandigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung.

Auch im Versuchsjahr 2019 erfolgte an beiden Standorten und Sorten eine regelmäßige Erfassung der Chlorophyllwerte an den Haupttriebblättern des unteren Pflanzenabschnitts. Aufgrund einer verstärkten Untersuchung des Einflusses des Zeitpunkts der N-Ausbringung im dritten Versuchsjahr, werden in der nachfolgenden Abb. 5.19 und Abb. 5.20 die Varianten F6b mit Fertigation von 2/3 der Gesamt-N-Menge ab KW23 und F6d mit Ausbringung desselben Anteils ab KW26 miteinander verglichen. Als Referenzvarianten dienen dabei weiterhin nicht gedüngte (F1) und vollständig granuliert gedüngte Pflanzen (F2).

Bei Herkules erreichten die Chlorophyllwerte der Pflanzen am lehmigeren Standort (Abb. 5.19 a) ein höheres Niveau als am sandigeren (Abb. 5.19 b), obwohl sich die Gesamthöhe der N-Düngung mit  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  nicht unterschied. An beiden Standorten ergaben sich für die nicht mit Stickstoff versorgten Pflanzen (F1) im Vergleich zu gedüngten (F2 bis F6d) über die gesamte Vegetation messbar niedrigere Werte. Am schwereren Boden (Abb. 5.19 a) stiegen die Chlorophyllwerte von F2, F6b und F6d bis zum vierten Messtermin am 21. Juni stark an, wobei eine Unterscheidung der Kurven nicht möglich ist. Bis zur darauffolgenden Messung erhöhte sich der Wert von F6b, deren Pflanzen bis zu diesem Zeitpunkt bereits mit drei Einzelgaben über Fertigation gedüngt wurden, deutlich stärker als bei F2 und F6d. Im weiteren Wachstumsverlauf stiegen die Messwerte von F6b bis Mitte Juli bis auf 49,7 SPAD-Punkte, wohingegen bei F2 bereits Anfang Juli eine Stagnation bei ca. 47 Punkten gemessen wurde. Bei den ab KW26 über das Bewässerungswasser gedüngten Pflanzen von F6d zeigte sich, drei Wochen nach Beginn der Applikation, zwischen Mitte Juni und Ende Juli, ein Anstieg des Messwertes. Von Anfang August bis zum Erreichen der Erntereife fand bei allen gedüngten Varianten eine Reduktion der Chlorophyllwerte statt. Während bei F6b, mit Ausbringung der letzten N-Gabe über Fertigation Mitte Juli, bereits ab Ende Juli sinkende Werte zu verzeichnen waren, wurde bei F6d im selben Zeitraum noch ein Anstieg erfasst.

Am sandigeren Standort (Abb. 5.19 b) stiegen die Chlorophyllwerte von F2 und F6b mit ausschließlich granulierter Düngung bzw. Fertigation von 2/3 ab KW23 bis zum 21. Juni stark an, während die Werte von F6d bereits auf einem niedrigeren Niveau stagnierten. Im weiteren Wachstumsverlauf erreichten die Pflanzen von F6b bis Mitte Juli höhere Werte als die von F2. Wurden hingegen 2/3 der Gesamt-N-Menge erst ab KW26 (F6d) ausgebracht stiegen die Chlorophyllwerte an den Haupttriebblättern des unteren Rebenabschnitts bis Ende Juli deutlich langsamer an. Auffällig ist, dass bei F6b nach

Ausbringung der letzten N-Gaben ab Mitte Juli eine Reduktion der Messwerte stattfand, wohingegen bei F6d ein weiterer Anstieg verzeichnet werden konnte. Ab Ende Juli unterschied sich das Niveau der Chlorophyllwerte der gedüngten Varianten nicht mehr, zudem fand bis zum Erreichen der Erntereife eine deutliche Verringerung statt.

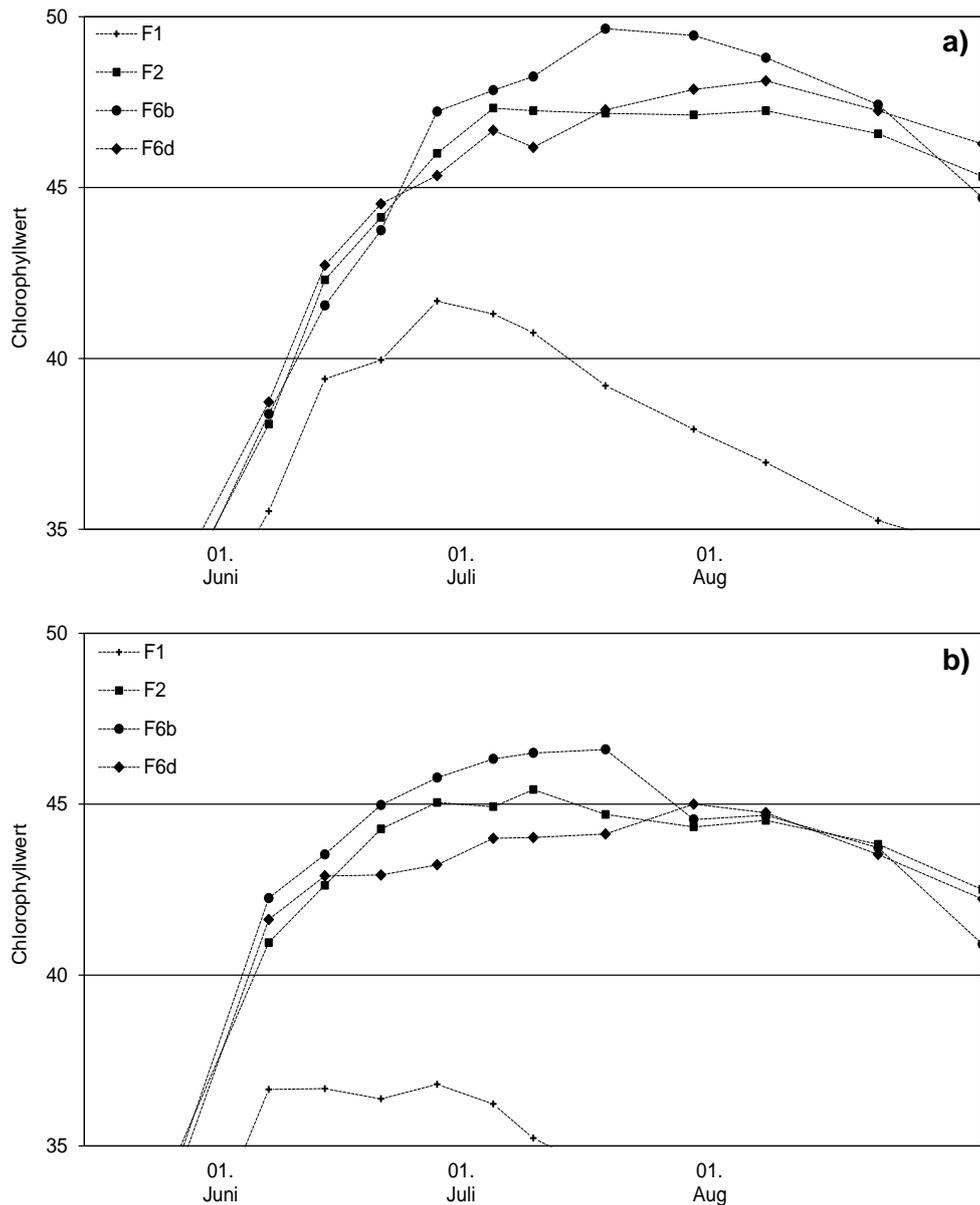


Abb. 5.19: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte *Herkules* am **a)** lehmigen bzw. **b)** sandigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung; Minimumwerte zum Zeitpunkt der Reife bei 34 (a) bzw. 29 (b).

Auch bei der Sorte Perle lagen die Chlorophyllwerte nicht gedüngter Pflanzen (F1) an beiden Standorten über den gesamten Wachstumsverlauf auf einem niedrigeren Niveau (Abb. 5.20).

Am lehmigeren Standort (Abb. 5.20 a) erhöhte sich der Messwert von F6b mit Fertigation ab KW23, deren Pflanzen bis zum vierten Messtermin Ende Juni bereits mit drei Einzelgaben gedüngt wurden, deutlich stärker als bei F2 und F6d. Die Chlorophyllwerte dieser Pflanzen erreichten auch im weiteren Wachstumsverlauf bis Mitte Juli ein höheres Niveau. Im Gegensatz dazu führte die ausschließlich granuliert Applikation derselben Gesamt-N-Menge, verteilt auf drei Einzelgaben (F2), ab Mitte Juni zu niedrigeren Messwerten. Wurde bis KW26 nur 1/3 des gesamten Stickstoffs gedüngt (F6d) unterschied sich der Kurvenverlauf bis Mitte Juli nicht von dem von F2. Jedoch zeigte sich bei ab KW26 über das Bewässerungswasser gedüngten Pflanzen (F6d), drei Wochen nach Beginn der Applikation, zwischen Mitte und Ende Juli, ein Anstieg des Chlorophyllwertes auf das Niveau von F6b. Im weiteren Wachstumsverlauf konnte ab Ende Juli auf Basis der Messung an den unteren Haupttriebblättern zwischen F6b und F6d kein Unterschied mehr erfasst werden.

Am sandigeren Standort (Abb. 5.20 b) unterschieden sich die Messwerte der früheren Fertigation ab KW23 (F6b) und vollständig granulierten N-Düngung (F2) bis Anfang Juli nicht voneinander. Im weiteren Wachstumsverlauf wurde bei F6b jedoch ein Anstieg erfasst, während F2 auf einem niedrigeren Niveau stagnierte. Die Ausbringung von 2/3 des gesamten Stickstoffs ab KW26 (F6d) führte hingegen zu einem verzögerten Anstieg des Chlorophyllwertes der Haupttriebblätter des unteren Rebenabschnitts.

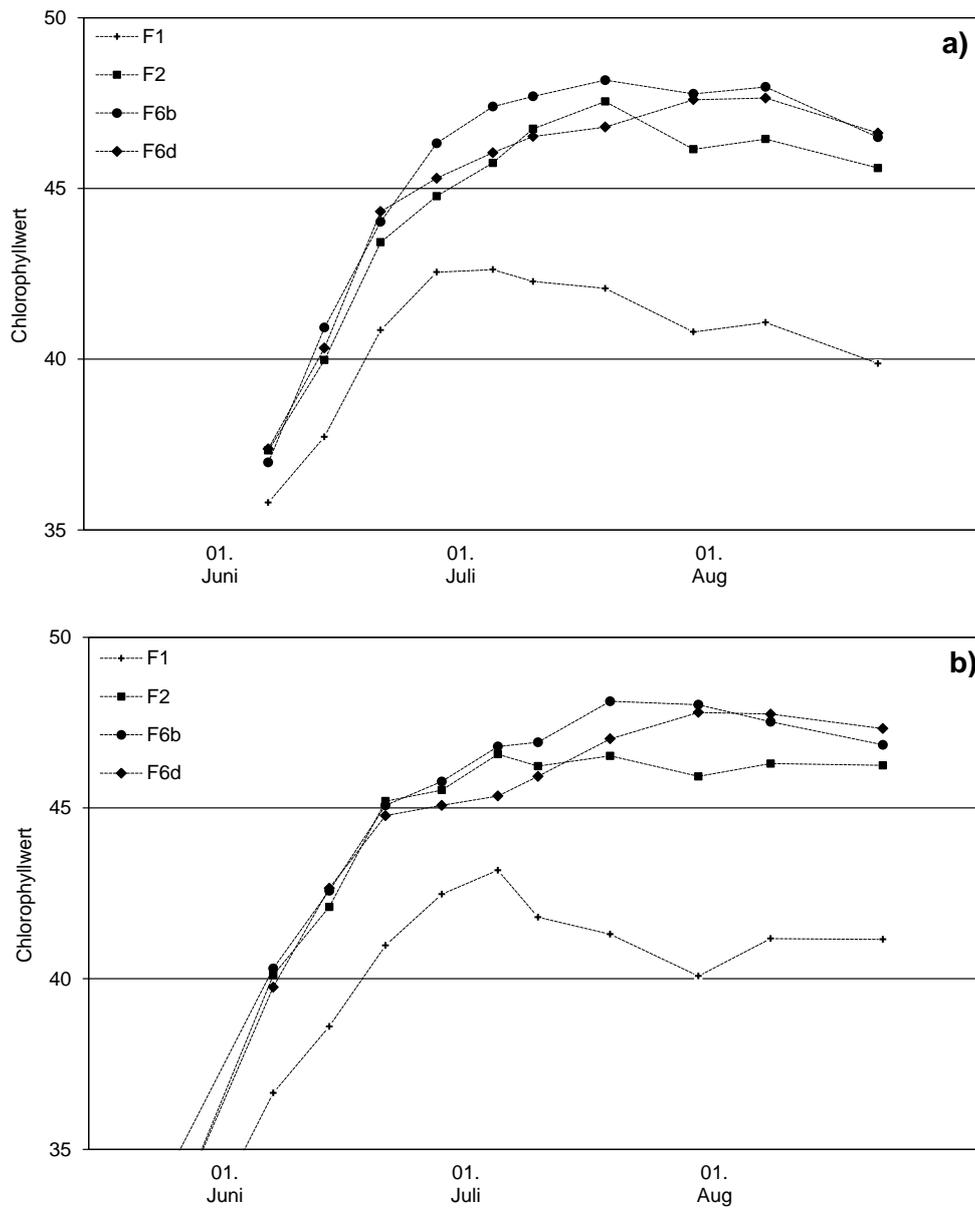


Abb. 5.20: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Mittlerer Verlauf der Chlorophyllwerte (SPAD) der Sorte Perle am a) lehmigen bzw. b) sandigen Standort in Abhängigkeit der N-Düngung.

### 5.2.10 Seitentriebwachstum, Habitus und Ertragsaufbau

Die Analyse des Einflusses der N-Düngung auf den Habitus und Ertragsaufbau von Hopfen erfolgte im Anbaujahr 2019 in Feldversuchen des Versuchsansatzes 2. Wie unter 4.5.6 erläutert, wurden einzelne Reben zunächst in die vier Längenabschnitte Basis, Unten, Mitte und Oben unterteilt. Innerhalb dieser Abschnitte erfolgte jeweils eine Differenzierung in Zentralrebe (Z-Rebe) und Seitentriebe (S-Triebe). Der Abschnitt „Kopf“ wurde definiert als Haupttriebabschnitt, der über die maximale Gerüsthöhe hinauswuchs, wobei keine weitere Unterteilung vorgenommen wurde.

Auf Basis repräsentativer Reben von granuliert gedüngten Pflanzen (F2) wird am Beispiel der Feldversuche des lehmigeren Standortes zunächst auf die grundsätzliche Verteilung des Doldenertrags innerhalb einer Hopfenrebe eingegangen (Tab. 5.36). Sowohl bei Herkules, als auch Perle wurden mit 80 bzw. 82 % in den Fraktionen Kopf, Oben und Mitte mehr als drei Viertel des gesamten Doldenertrags in der oberen Pflanzenhälfte ermittelt. Die zusätzlich erfolgte Unterteilung der Längenabschnitte ergab, dass mit 76 % (HS) bzw. 82 % (PE) der Großteil der Dolden an den Seitentrieben gebildet wird. An der Zentralrebe wurden hingegen kaum Dolden gebildet, vor allem nicht in den Abschnitten Basis und Unten. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass auch der Beitrag der Seitentriebe des Basisabschnitts zum Gesamt-Doldenertrag nur bei 1 bis 2 % liegt.

Tab. 5.36: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Verteilung des Doldenertrags am Beispiel der Sorten Herkules und Perle; Gerüsthöhe: 7,0 m; Unterteilung der Gesamtpflanze in 4 Längenabschnitte zu je 1,50 m (Basis – Oben) ab der Bruchstelle des Drahtes, Abschnitt „Kopf“ > Drahtbruchstelle; Differenzierung in Z-Rebe und S-Triebe (Verzweigungen > 10 cm) in den Abschnitten Basis bis Oben; Einzelrebenenertrag: Herkules = 928 ± 87 g/Rebe, Perle = 782 ± 44 g/Rebe (10 % H<sub>2</sub>O).

	Herkules [%] v. 928 g				Perle [%] v. 782 g			
	Gesamtpfl.	Z-Rebe	S-Triebe	Kopf	Gesamtpfl.	Z-Rebe	S-Triebe	Kopf
Kopf	11			11	8			8
Oben	36	9	27		37	7	30	
Mitte	34	4	30		37	3	35	
Unten	18	1	17		17	1	16	
Basis	2	0	2		1	0	1	
Summe	100 %	13 %	76 %	11 %	100 %	10 %	82 %	8 %

Aufgrund der wesentlichen Bedeutung der Seitentriebe für die Ertragsbildung (Tab. 5.36), sowie der beobachteten Beeinflussung des Habitus durch die N-Düngung (vgl. 5.2.1),

erfolgte zudem eine empirische Untersuchung der Seitentriebsausbildung. Dabei wurde auf Basis der ermittelten Anzahl und Länge gebildeter Seitentriebe die Gesamtseitentrieblänge [m] je Längenabschnitt berechnet. Um zusätzlich durch die N-Düngung verursachte Effekte aufzuzeigen, werden die Varianten F6 und F6d mit Fertigation von 2/3 der Gesamt-N-Menge ab KW25 bzw. KW26 des lehmigeren Standortes der Sorte Herkules mit der ausschließlich granulierten N-Düngung (F2) verglichen (Tab. 5.37).

Im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (F2) führte die Applikation von 2/3 der Gesamt-N-Menge ab KW25 (F6) zu einem verringerten Seitentriebwachstum in der unteren Pflanzenhälfte (Basis, Unten), mit einer deutlichen Reduktion der Trieblänge im Basis-Abschnitt um 30 % (Tab. 5.37). In der oberen Pflanzenhälfte wurde hingegen ein verbessertes Wachstum mit einer starken Zunahme von 32 % im Abschnitt „Oben“ gemessen. Erfolgte die Applikation des über Fertigation auszubringenden Anteils der N-Düngung hingegen erst ab KW26 (F6d), verstärkte sich die Reduktion der Gesamtseitentrieblänge in den Abschnitten Basis und Unten auf -50 % bzw. -42 %. Zudem wurde auch im mittleren Abschnitt ein reduziertes Wachstum erfasst. Eine positive Beeinflussung des Seitentriebwachstums mit einer Steigerung von 14 % konnte hingegen nur im obersten Abschnitt festgestellt werden.

Tab. 5.37: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Gesamtseitentrieblänge und prozentuale Veränderung je Längenabschnitt in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der N-Düngung am Beispiel der Sorte Herkules; Angabe der Standardabweichung als  $\pm$ .

	Seitentrieblänge [m]								
	Granuliert (F2)			KW25 (F6)			KW26 (F6d)		
Oben	12,0	$\pm 1,1$	15,9	$\pm 4,7$	+ 32 %	13,7	$\pm 2,0$	+ 14 %	
Mitte	16,9	$\pm 4,4$	17,9	$\pm 4,0$	+ 6 %	14,8	$\pm 1,0$	- 12 %	
Unten	24,4	$\pm 5,5$	22,0	$\pm 5,9$	- 10 %	14,2	$\pm 3,3$	- 42 %	
Basis	22,9	$\pm 3,2$	16,0	$\pm 4,3$	- 30 %	11,4	$\pm 3,1$	- 50 %	
Summe	76,2	$\pm 7,0$	71,8	$\pm 8,6$	- 6 %	54,1	$\pm 3,6$	- 29 %	

Auf Basis der Gesamtseitentrieblänge (Tab. 5.37) sowie der an den Seitentrieben gebildeten Dolden je Abschnitt kann der Parameter „Gramm Dolden je Meter Seitentrieb“ [ $\text{g m}^{-1}$ ] berechnet werden. Diese Kennzahl ermöglicht es die Bedeutung der Seitentriebsbildung in unterschiedlichen Pflanzenabschnitten im Hinblick auf die Ertragsbildung zu bewerten. Dabei wurden an den granuliert gedüngten Referenzpflanzen (F2) folgende Werte ermittelt:

- Oben 21,2 g m<sup>-1</sup>
- Mitte 16,7 g m<sup>-1</sup>
- Unten 6,9 g m<sup>-1</sup>
- Basis 0,6 g m<sup>-1</sup>

Mit 21,2 g m<sup>-1</sup> liegt die Doldenbildung der Sorte Herkules im obersten Abschnitt um das 35-Fache über der des Basis-Abschnitts.

Neben der Seitentrieausbildung wurden an den Pflanzen der Sorte Herkules des lehmigeren Standortes auch die Auswirkungen der N-Düngung auf den Ertragsaufbau untersucht (Tab. 5.38). Es erfolgt ein Vergleich von F6 und F6d mit Fertigation ab KW25 bzw. KW26, wobei als Referenz ausschließlich granuliert gedüngte Pflanzen (F2) dienen. Da ein Großteil der Dolden einer Hopfenpflanze an den Seitentrieben und im Kopfbereich gebildet wird und die Zentralrebe eine geringe Ertragsrelevanz aufweist (Tab. 5.36), wird auf die Differenzierung von Z-Rebe und S-Trieben verzichtet.

Im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (F2) führte die Ausbringung von 2/3 der gesamten N-Menge ab KW25, insgesamt zu einer um 14 % höheren Doldenmenge je Rebe, wohingegen die spätere N-Applikation ab KW26 die Menge um 12 % verringerte. Erfolgte die Ausbringung des Stickstoffs über Fertigation ab KW25 (F6) bildeten die Pflanzen vor allem in der unteren Rebenhälfte in den Abschnitten Basis und Unten um 38 % bzw. 14 % weniger Dolden. Im mittleren Abschnitt konnte keine Beeinflussung festgestellt werden. Im oberen Abschnitt und Kopfbereich wurden hingegen um 40 % bzw. 34 % mehr Dolden gebildet.

Die Pflanzen mit Fertigation ab KW26 (F6d) reagierten in der unteren Rebenhälfte mit einer deutlich stärkeren Reduktion der Doldenbildung. Des Weiteren wurde auch im mittleren Abschnitt eine Ertragsreduktion in Höhe von 16 % erfasst. Im oberen Abschnitt wurde die Doldenbildung hingegen kaum beeinflusst. Lediglich im Kopfbereich konnte im Vergleich zu F2 eine geringfügig positive Beeinflussung nachgewiesen werden.

Tab. 5.38: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Doldenertrag je Längenabschnitt (Basis bis Oben) bzw. Kopf und Veränderung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der N-Düngung am Beispiel der Sorte Herkules; Angabe der Standardabweichung als  $\pm$ .

	Doldengewicht [g]								
	Granuliert (F2)			KW25 (F6)			KW26 (F6d)		
Kopf	98	$\pm 10$	131	$\pm 7$	+ 34 %	111	$\pm 20$	+ 13 %	
Oben	334	$\pm 68$	466	$\pm 29$	+ 40 %	343	$\pm 62$	+ 3 %	
Mitte	312	$\pm 39$	306	$\pm 62$	- 2 %	262	$\pm 12$	- 16 %	
Unten	169	$\pm 38$	145	$\pm 50$	- 14 %	91	$\pm 7$	- 46 %	
Basis	14	$\pm 11$	9	$\pm 3$	- 38 %	5	$\pm 3$	- 63 %	
Summe	928	$\pm 87$	1.058	$\pm 92$	+ 14 %	812	$\pm 64$	- 12 %	

Im Zuge der Untersuchungen des Ertragsaufbaus wurde neben der Seitentriebausildung und Doldenverteilung [g] auch die Anzahl und Größe der gebildeten Dolden ermittelt. Auf Basis der Daten des obersten Längenabschnitts (Tab. 5.38) wird durch ein lineares Regressionsmodell analysiert (Abb. 5.21), ob ein Zusammenhang zwischen der Doldenanzahl und der Doldenmenge [g] sowie der Doldenanzahl und der Doldengröße [cm<sup>2</sup>] besteht. Wie die Ergebnisse der Regressionsanalyse zeigen, führte eine höhere Doldenanzahl auch zu einer erhöhten Doldenmasse ( $R^2 = 0,77$ ), wohingegen die Parameter Doldenanzahl und Doldengröße [cm<sup>2</sup>] tendenziell negativ korreliert waren ( $R^2 = 0,48$ ).

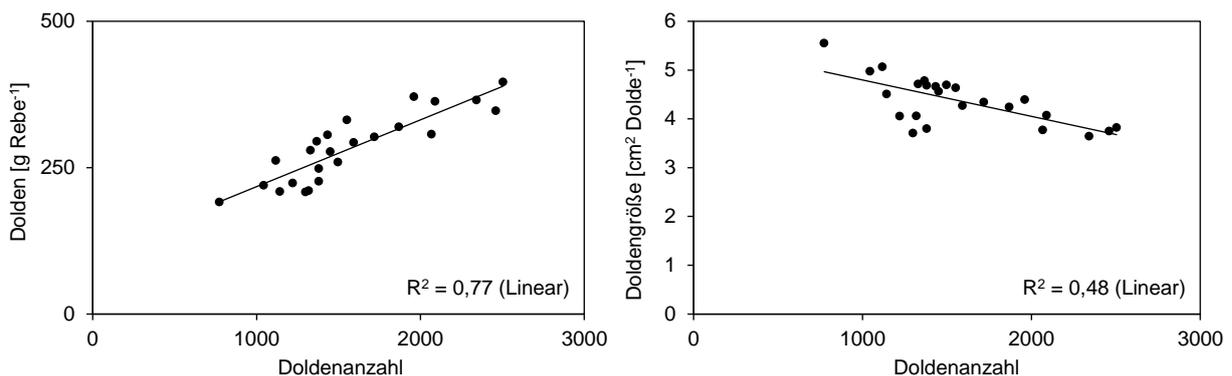


Abb. 5.21: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Lineare Regression zwischen der Doldenanzahl und dem Doldenertrag bzw. der Doldenanzahl und der Doldengröße, gemessen an den Seitentrieben des oberen Längenabschnitts.

### 5.2.11 Verteilung und Recovery von $^{15}\text{N}$ -markiertem UAN-N

Die Untersuchung der Verteilung und Recovery (Wiederfindung) von  $^{15}\text{N}$ -markiertem UAN-N erfolgte, wie unter 4.5.8 erläutert, im Rahmen des Versuchsansatzes 2 in Abhängigkeit von Zeitpunkt und Höhe des N-Angebots. Zur Gewinnung von experimentellen Daten wurden die Sorten Perle und Herkules am lehmigeren Standort genutzt. Dabei wurde bei beiden Sorten für die am 22. Juni bei F6b bzw. am 5. Juli bei F6 und F6x über Fertigation applizierte N-Gabe (Tab. 4.10) der  $^{15}\text{N}$ -Gehalt des gedüngten Stickstoffs auf 2,55 at% erhöht.

#### 5.2.11.1 Entwicklung der $^{15}\text{N}$ -Gehalte im Vegetationsverlauf

Die Verteilung des  $^{15}\text{N}$ -angereicherten ausgebrachten Stickstoffs in der oberirdischen Biomasse wurde durch regelmäßige Analysen des  $^{15}\text{N}$ -Gehalts in Blatt- und Blüten- bzw. Doldenproben verfolgt. Für die Entnahme der Blattproben wurden, wie unter 4.5.8 erläutert, drei unterschiedliche Höhenabschnitte (Unten, Mitte, Oben) definiert, wobei jeweils eine Differenzierung in Haupt- und Seitentriebblätter erfolgte. Die Beprobung von Blüten bzw. Dolden fand ausschließlich an den Seitentrieben des mittleren und oberen Abschnitts statt. Hinsichtlich der Probennahme ist weiterhin zu beachten, dass die oberen Seitentriebblätter bei keiner Sorte beprobt werden konnten und die oberen Haupttriebblätter nur beprobt wurden, soweit dadurch keine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums stattfand. Die Angabe der analysierten  $^{15}\text{N}$ -Gehalte erfolgt durch den Wert  $\delta^{15}\text{N}$  in der Einheit Promille, wodurch beschrieben wird in welchem Umfang die am Standort vorherrschende natürliche  $^{15}\text{N}$ -Anreicherung (0,3679 at%  $^{15}\text{N}$ ) überschritten wird. Die erste Messung erfolgte an beiden Sorten vier Tage nach der Ausbringung (ndA). Eine Ausnahme stellt dabei die Variante F6 der Sorte Herkules dar, bei welcher die erste Messung bereits einen Tag ndA stattfand.

Unabhängig von der Versuchsvariante und dem Messtermin konnte an beiden Sorten (Abb. 5.22, Abb. 5.23) infolge der Applikation des  $^{15}\text{N}$ -angereicherten Stickstoffs in jeder untersuchten Fraktion eine Erhöhung des  $^{15}\text{N}$ -Gehalts festgestellt werden ( $\delta^{15}\text{N} > 0$ ).

Bei den Pflanzen von F6b (Abb. 5.22 a) der Sorte Herkules lag der  $^{15}\text{N}$ -Gehalt am ersten Messtermin (4 Tage ndA) in den mittleren Haupttriebblättern mit 377 ‰ um das 2,7-fache über dem der Unteren (138 ‰). Bis zur zweiten Messung (17 Tage ndA) stieg der Gehalt an  $^{15}\text{N}$  im mittleren Abschnitt bis auf 609 ‰, während in den unteren Blättern 214 ‰ gemessen wurden. Die tendenziell höchsten  $^{15}\text{N}$ -Gehalte wurden mit 773 ‰ in den

oberen Haupttriebblättern analysiert. An den darauffolgenden Messterminen unterschieden sich die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der oberen und mittleren Blätter nicht und deren Niveau lag deutlich über 500 ‰. Die Messwerte der unteren Haupttriebblätter stagnierten hingegen auf einem deutlich geringeren Niveau unter 250 ‰. Auch bei der Untersuchung der Seitentriebblätter konnten an den ersten Messterminen im mittleren Abschnitt höhere  $^{15}\text{N}$ -Gehalte als im Unteren ermittelt werden. Vier Tage nach der Applikation lagen die Gehalte bei 374 ‰ (Unten) bzw. 625 ‰ (Mitte). Dabei ist zu beachten, dass sich der Unterschied im Wachstumsverlauf, infolge des kontinuierlichen Anstiegs des  $^{15}\text{N}$ -Gehalts in den unteren Blättern bis auf 577 ‰, verringerte. Des Weiteren wurde in den Seitentriebblättern eines Höhenabschnitts jeweils ein höherer  $^{15}\text{N}$ -Gehalt als in den Blättern am Haupttrieb gemessen. Die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der ab dem 23. Juli beprobten Blüten bzw. Dolden des oberen und mittleren Abschnitts erreichten mit Werten über 500 ‰ das Niveau der unteren Seitentriebblätter.

Bei den Pflanzen von Variante F6 (Abb. 5.22 b) erfolgte die Ausbringung der  $^{15}\text{N}$ -angereicherten N-Gabe zwei Wochen später am 5. Juli. Einen Tag nach der Ausbringung, zum Zeitpunkt der ersten Messung, erreichten die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der analysierten Haupt- und Seitentriebblätter bereits Werte zwischen 40 ‰ und 100 ‰. Am zweiten Messtermin (4 Tage ndA) wurden die höchsten Gehalte mit 546 ‰ in den oberen Haupttriebblättern erfasst, wohingegen die mittleren und unteren Blätter des Haupttriebs nur 223 ‰ bis 260 ‰ erreichten. Bis zum dritten Messtermin stiegen die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der mittleren Haupttriebblätter geringfügig bis auf 320 ‰ an, während der Gehalt in den unteren Blättern auf dem Niveau des zweiten Messtermins stagnierte. In den Seitentriebblättern lagen die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte vier Tage ndA zwischen 325 ‰ (Unten) und 400 ‰ (Mitte), wobei die Werte in den unteren Blättern auf diesem Niveau stagnierten, im mittleren Abschnitt hingegen noch bis auf 586 ‰ anstiegen. Auch bei F6 wurde in den Seitentriebblättern eines Höhenabschnitts jeweils ein höherer  $^{15}\text{N}$ -Gehalt als in den Blättern am Haupttrieb gemessen. In den ab dem 23. Juli beprobten Blüten bzw. Dolden des oberen und mittleren Abschnitts wurden Ende Juli mit bis zu 718 ‰ hohe  $^{15}\text{N}$ -Gehalte gemessen, die sich im weiteren Wachstumsverlauf jedoch bis auf 422 ‰ bis 471 ‰ verringerten.

Bei F6x (Abb. 5.22 c) erfolgte die Ausbringung der  $^{15}\text{N}$ -angereicherten N-Gabe zum exakt selben Zeitpunkt wie bei F6 (Abb. 5.22 b), mit dem Unterschied, dass die N-Düngung insgesamt um 1/3 erhöht wurde (vgl. 4.4.2.2). Im Vergleich zu F6 erhöhte sich in jeder einzelnen Fraktion das Niveau der  $^{15}\text{N}$ -Gehalte, die grundsätzliche  $^{15}\text{N}$ -Verteilung

innerhalb der Pflanzen veränderte sich jedoch nicht, weshalb auf eine detaillierte Beschreibung der ermittelten Gehalte an dieser Stelle verzichtet wird.

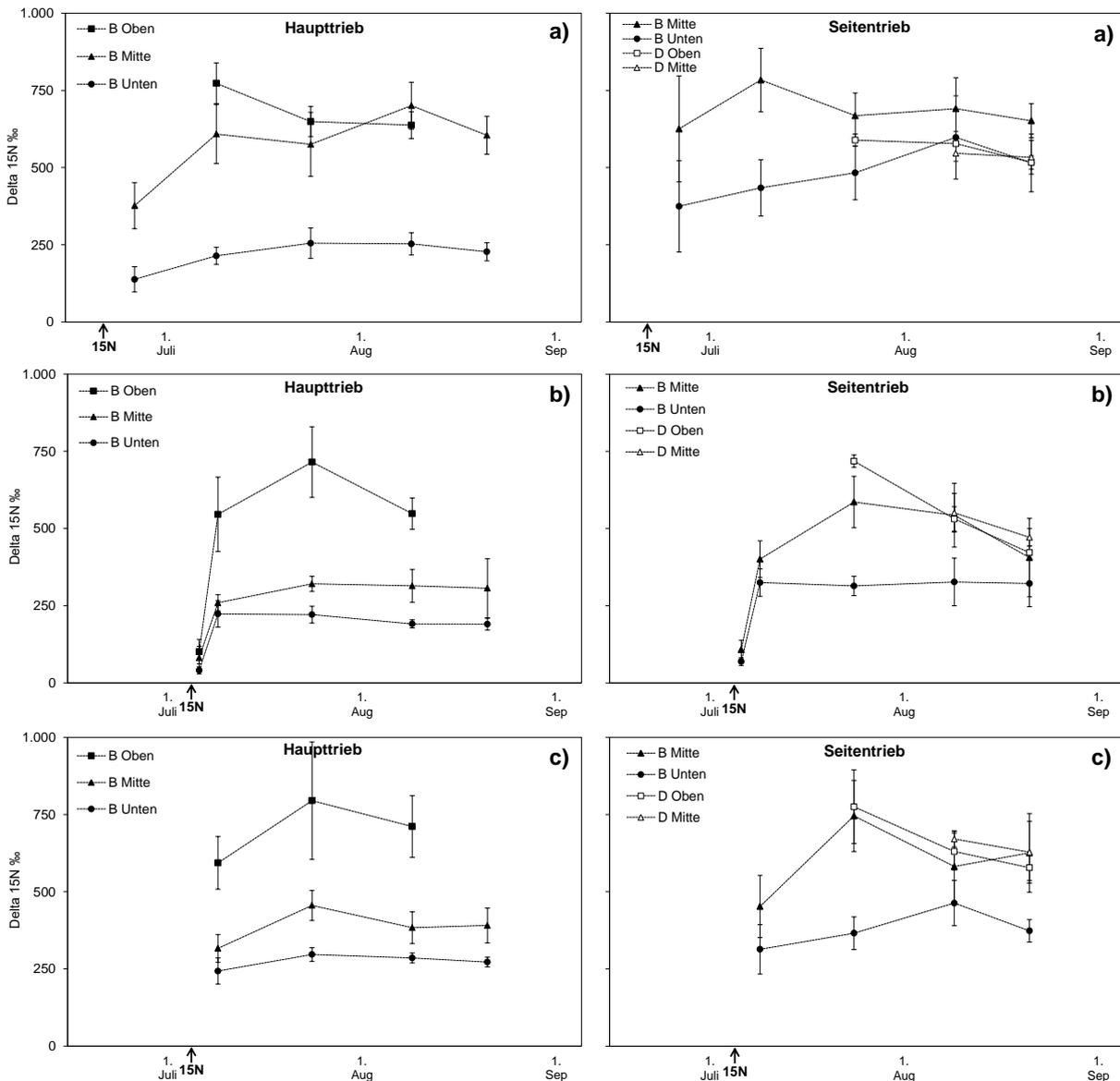


Abb. 5.22: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Delta  $^{15}\text{N}$ -Gehalte unterschiedlicher Höhenabschnitte (Unten, Mitte, Oben) der Sorte Herkules im Vegetationsverlauf mit Differenzierung in Haupt- und Seitentriebe sowie Blatt- (B) und Doldenproben (D); **a)** Variante F6b; **b)** Variante F6; **c)** Variante F6x; Ausbringung der  $^{15}\text{N}$ -angereicherten N-Gaben am 22. Juni bzw. 5. Juli.

Bei der Sorte Perle erfolgte die Ausbringung der  $^{15}\text{N}$ -angereicherten N-Gaben in den Varianten F6b (Abb. 5.23 a) und F6 (Abb. 5.23 b) zu den exakt selben Zeitpunkten wie bei Herkules, mit dem Unterschied, dass die N-Düngung insgesamt reduziert wurde (Tab. 4.7).

Erfolgte die Applikation des  $^{15}\text{N}$ -angereicherten Stickstoffs am 22. Juni (Abb. 5.23 a), lagen die vier Tage nach der Ausbringung erfassten  $^{15}\text{N}$ -Gehalte in den unteren Haupttriebblättern bei 94 ‰, während im mittleren Abschnitt 318 ‰ erreicht wurden. Bis zur zweiten Messung (17 Tage ndA) stieg der Gehalt bis auf 444 ‰ in der Pflanzenmitte und 170 ‰ in den unteren Blättern. Mit 512 ‰ wiesen die oberen Haupttriebblätter tendenziell die höchsten  $^{15}\text{N}$ -Gehalte auf. Im weiteren Wachstumsverlauf stagnierten die Gehalte auf jeder Blatttage. Auch in den Seitentriebblättern konnten an den ersten Messterminen im mittleren Abschnitt höhere  $^{15}\text{N}$ -Gehalte als im Unteren ermittelt werden. Vier Tage nach der Applikation lagen die Gehalte Unten bei 258 ‰ bzw. 464 ‰ in der Mitte. Dabei ist anzumerken, dass diese Unterschiede sich im Wachstumsverlauf durch den kontinuierlichen Anstieg des  $^{15}\text{N}$ -Gehalts in den unteren Blättern bis auf 425 ‰ und der Reduktion der Gehalte in den mittleren Blättern verringerten. Des Weiteren wurde in den Seitentriebblättern eines Höhenabschnitts jeweils ein höherer  $^{15}\text{N}$ -Gehalt als in den Blättern am Haupttrieb gemessen. Die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der ab dem 23. Juli beprobten Blüten bzw. Dolden des oberen und mittleren Abschnitts erreichten mit Werten zwischen 425 und 499 ‰ das Niveau der Seitentriebblätter.

Wurde dieselbe Menge an  $^{15}\text{N}$ -angereichertem Stickstoff zwei Wochen später am 5. Juli ausgebracht (Abb. 5.23, b), lagen die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte am ersten Messtermin (4 Tage ndA) in den unteren und mittleren Haupttriebblättern bei 111 ‰ bzw. 210 ‰, wohingegen im oberen Abschnitt 350 ‰ gemessen wurden. Bis zum zweiten Messtermin stiegen die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der unteren sowie mittleren Haupttriebblätter geringfügig bis auf 172 ‰ bzw. 265 ‰ an, während sich der Gehalt in den oberen Blättern bis auf 511 ‰ erhöhte. Im weiteren Wachstumsverlauf wurde unabhängig vom Pflanzenabschnitt eine Stagnation der  $^{15}\text{N}$ -Gehalte erfasst. In den Seitentriebblättern lagen die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte vier Tage nach der Ausbringung bei 186 ‰ (Unten) bzw. 263 ‰ (Mitte). Im mittleren Abschnitt erfolgte bis zum zweiten Messtermin ein Anstieg auf ein Maximum von 474 ‰, während sich die Werte unten nur geringfügig erhöhten. Des Weiteren wurde auch bei F6 in den Seitentriebblättern eines Höhenabschnitts jeweils ein höherer  $^{15}\text{N}$ -Gehalt als in den Blättern am Haupttrieb gemessen. Die ab dem 23. Juli beprobten Blüten bzw. Dolden des oberen Abschnitts erreichten mit 621 ‰ die höchsten  $^{15}\text{N}$ -Gehalte, die sich im weiteren Wachstumsverlauf bis auf 451 ‰ verringerten und nicht von denen des mittleren Pflanzenabschnitts unterschieden.

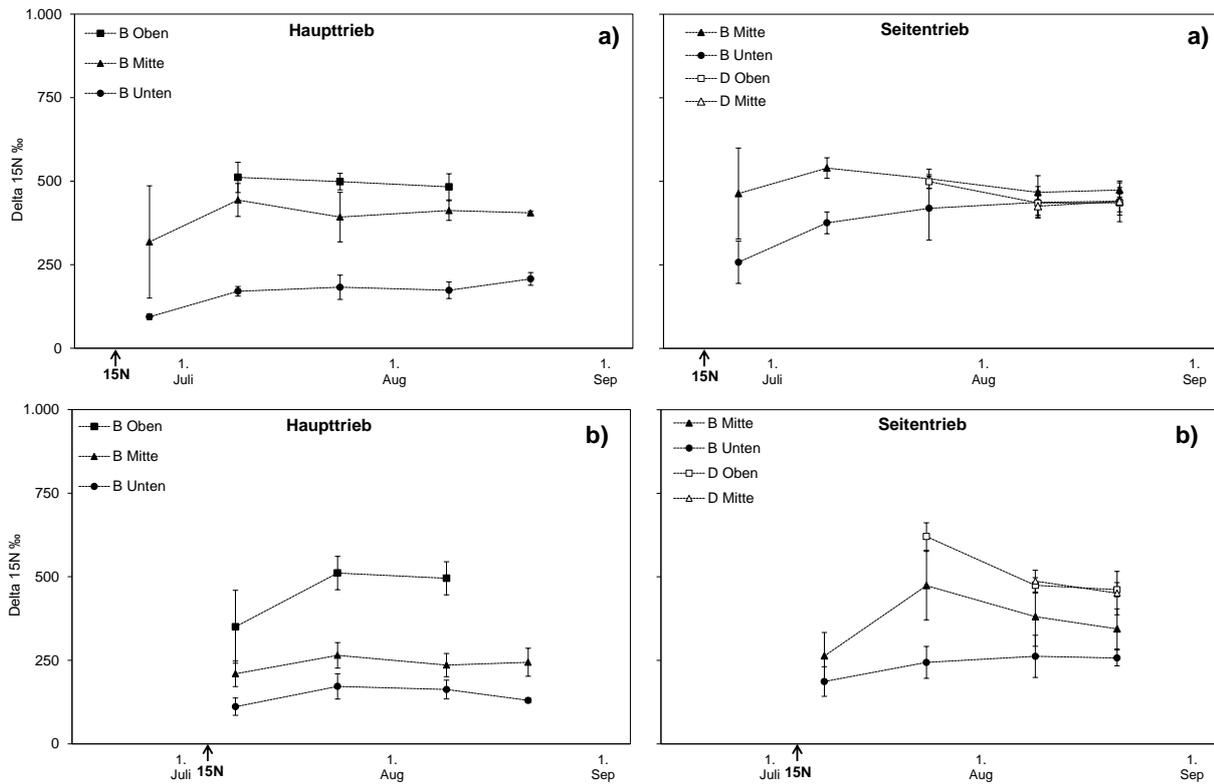


Abb. 5.23: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Delta  $^{15}\text{N}$ -Gehalte unterschiedlicher Höhenabschnitte (Unten, Mitte, Oben) der Sorte Perle im Vegetationsverlauf mit Differenzierung in Haupt- und Seitentriebe sowie Blatt- (B) und Doldenproben (D); **a)** Variante F6b; **b)** Variante F6. Ausbringung der  $^{15}\text{N}$ -angereicherten N-Gaben am 22. Juni bzw. 5. Juli.

### 5.2.11.2 $^{15}\text{N}$ -Recovery in der oberirdischen Biomasse

Die  $^{15}\text{N}$ -Recovery beschreibt die prozentuale Wiederfindungsrate des im markierten UAN enthaltenen  $^{15}\text{N}$ -Anteils. Dabei erfolgt die Berechnung auf Grundlage der zum Zeitpunkt der Erntereife ermittelten oberirdisch gebildeten Biomasse, sowie der darin enthaltenen Gesamt-N- und  $^{15}\text{N}$ -Gehalte.

Für beide untersuchten Sorten lag die in der gesamten oberirdisch gebildeten Bio-masse ermittelte  $^{15}\text{N}$ -Recovery, unabhängig von Zeitpunkt und Höhe der applizierten N-Gabe, bei 65 bis 67 % (Abb. 5.24). Der in den Dolden wiedergefundene Anteil des  $^{15}\text{N}$  betrug bei Herkules 36 bis 38 %, wohingegen die Werte im Restpflanzenmaterial mit 28 bis 29 % auf einem niedrigeren Niveau lagen. Bei Perle hingegen lag die ermittelte  $^{15}\text{N}$ -Recovery bei 34 bis 35 % in der Restpflanze und 30 bis 32 % in den Dolden. Weiterhin führte bei Perle die frühere Applikation am 22. Juni (F6b) im Vergleich zur späteren am

5. Juli (F6) tendenziell zu stärkeren Unterschieden zwischen der Restpflanzen- und Doldenfraktion.

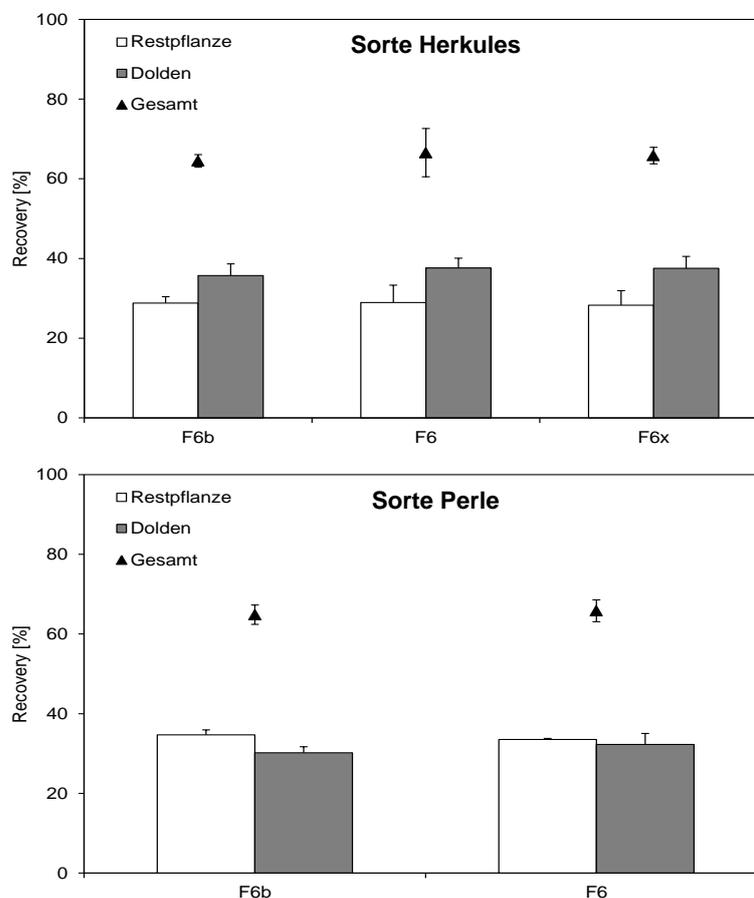


Abb. 5.24: Versuchsserie 2 – Jahr 2019:  $^{15}\text{N}$ -Recovery in Abhängigkeit von Zeitpunkt und Höhe der N-Düngung; Unterteilung in Dolden, Restpflanze und Gesamtpflanze.

### 5.2.11.3 $^{15}\text{N}$ -Gehalte in Speicherwurzeln

Aufgrund der Bedeutung der unterirdischen Überdauerungsorgane für den Wiederaustritt einer Hopfenpflanze wurden, im Zuge der Untersuchungen zur Verteilung des  $^{15}\text{N}$ -markierten UAN-Stickstoffs, auch die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der Speicherwurzeln analysiert. Die Probenahme hierfür erfolgte im darauffolgenden Anbaujahr 2020 vor Vegetationsbeginn. Der analysierte  $^{15}\text{N}$ -Gehalt wird als  $\delta^{15}\text{N}$ -Wert in Promille angegeben. Weiterhin wird bei beiden Sorten zwischen dem regulären Erntetermin und einer vorzeitigen Ernte unterschieden.

Unabhängig von der Versuchsvariante und dem Erntetermin konnten sowohl bei Herkules als auch bei Perle (Abb. 5.25) erhöhte  $^{15}\text{N}$ -Gehalte in den Speicherwurzeln festgestellt werden ( $\delta^{15}\text{N} > 0$ ). Bei der Sorte Herkules lag der  $^{15}\text{N}$ -Gehalt der am 22. Juni bzw. 5. Juli

in gleicher Höhe gedüngten Pflanzen (F6b bzw. F6) zwischen 317 ‰ und 347 ‰. Hingegen führte die Steigerung der N-Menge am 5. Juli (F6x) mit 392 ‰ bis 409 ‰ tendenziell zu höheren  $^{15}\text{N}$ -Gehalten. Eine Beeinflussung des  $^{15}\text{N}$ -Gehalts durch den Erntetermin konnte hingegen nicht festgestellt werden. Bei der Sorte Perle wurden bei einer vorgezogenen Ernte in den am 22. Juni gedüngten Pflanzen (F6b) mit 309 ‰ tendenziell höhere  $^{15}\text{N}$ -Gehalte als bei Applikation derselben N-Menge am 5. Juli (F6) erfasst. Bei den am regulären Termin geernteten Pflanzen lag der  $^{15}\text{N}$ -Gehalt, unabhängig von der Versuchsvariante bei 222 ‰.

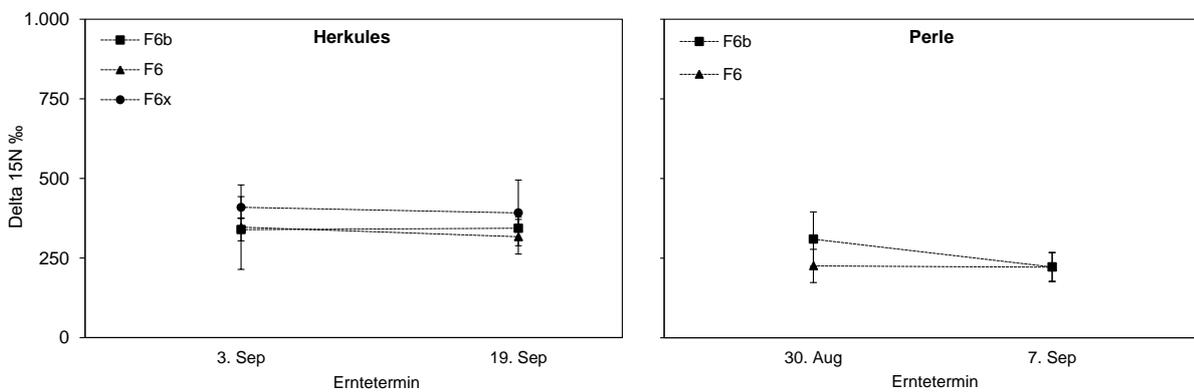


Abb. 5.25: Versuchsserie 2 – Jahr 2019: Delta  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der Speicherwurzeln in Abhängigkeit des Erntetermins.

## 5.3 Versuchsansatz 3 – Wasser- & N-Applikationsform

Im Rahmen des Versuchsansatzes 3 wurden an der Sorte Perle auf einem sandigen Standort unterschiedliche Wasser- und N-Applikationsformen untersucht. Zum einen wurden dabei die drei Bewässerungsstufen „nicht bewässert“, „oberirdisch bewässert“ sowie „unterirdisch bewässert“ verglichen, zum anderen die drei Düngungsstufen „keine N-Düngung“, „ausschließlich granuliert N-Düngung“ und ein „Düngesystem mit Fertigation“, bei welchem 2/3 der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser appliziert wurden. Für einen Überblick über die Versuchsvarianten siehe Tab. 4.11.

Da dieser Versuch über den gesamten Zeitraum von 2017 bis 2019 statisch durchgeführt wurde, können dreijährige Mittelwerte ausgewiesen werden. Aufgrund der stark ausgeprägten Heterogenität des Bodens am Versuchsstandort erfolgt auch eine Thematisierung der Unterschiede zwischen Hangober- (Hang-OS) und Hangunterseite (Hang-US).

### 5.3.1 Doldenertrag und Alphasäuregehalt

Wurde über den gesamten Versuchszeitraum (2017 bis 2019) kein Stickstoff gedüngt und nicht bewässert (B1) führte dies im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (B2) zu einer signifikanten Verringerung des Doldenertrags um 33 %, wobei der Ertragsrückgang an der Hangoberseite stärker ausgeprägt war (Tab. 5.39). Die zusätzliche Bewässerung nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (B3, B6) verstärkte die Ertragsreduktion, wobei der Effekt mit -45 % bei unterirdischer Tropfschlauchpositionierung (B6) am stärksten ausfiel. Am deutlichsten zeigte sich diese Verringerung des Doldenertrags durch Bewässerung an der Hangunterseite.

Wurden die Pflanzen ausschließlich in granulierter Form gedüngt (B2, B4, B7), führte eine oberirdische Bewässerung (B4) im Vergleich zu nicht bewässerten Pflanzen (B2) im Mittel zu einem Mehrertrag in Höhe von 7 %, wohingegen die unterirdische Bewässerung den Ertrag um 1,5 % erhöhte. Im Versuchsjahr 2017 mit einer ausgeprägten Trockenheit während der Phase der Hauptbiomassebildung lag die Ertragssteigerung durch oberirdische Bewässerung (B4) bei 12 %. Werden die unterschiedlichen Bodenqualitäten innerhalb des Schrages berücksichtigt, zeigt sich, dass die unterirdische Bewässerung (B7) an der Hangoberseite keine Wirkung auf den Ertrag hatte, wohingegen an der Hangunterseite eine Steigerung von 3,2 % messbar war. Durch oberirdische Bewässerung hingegen wurde an der Hangoberseite eine Ertragssteigerung in Höhe von 13 % erzielt.

Wurden zwei Drittel der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser appliziert (B5, B8), lag die mittlere Ertragssteigerung im Vergleich zu nicht bewässerten und granuliert gedüngten Pflanzen (B2) bei 15,1 % bei oberirdischer (B5) und bei 8,2 % bei unterirdischer Tropfschlauchverlegung (B8). Erfolgt eine Unterscheidung in Abhängigkeit von der Bodenqualität zeigt sich, dass im Mittel der drei Jahre an der Hangoberseite durch oberirdische Fertigation eine Ertragssteigerung von 24,1 % erzielt wurde.

Tab. 5.39: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlerer Ertrag (Wassergehalt 10 %) in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung; Differenzierung in Hangober- und Hangunterseite.

Variante	Gesamtfläche	Ertrag [kg ha <sup>-1</sup> ]		
		p<0,001 ***	Hang-OS	Hang-US
B1	1.749	c	1.486	2.012
B2	2.599	b	2.461	2.736
B3	1.576	cd	1.510	1.643
B4	2.777	ab	2.775	2.779
B5	2.992	a	3.054	2.931
B6	1.430	d	1.262	1.598
B7	2.639	b	2.455	2.822
B8	2.811	ab	2.510	3.112

Hinsichtlich des Alphasäuregehalts ist anzuführen, dass nicht bewässerte, ausschließlich granuliert gedüngte Pflanzen (B2) im dreijährigen Mittel mit 6,5 % die niedrigsten Gehalte erzielten (Tab. 5.40). Erfolgte bei ausschließlich granulierter N-Düngung eine zusätzliche oberirdische Bewässerung (B4) erhöhte sich der Gehalt relativ um 15,3 %. Wurde hingegen ein Teil des Stickstoffs über Fertigation ausgebracht, konnte der Gehalt an Alphasäure im Vergleich zu B2 über die gesamte Versuchsfläche im Mittel um 23,4 % bzw. an der Hangoberseite mit geringerer Bodenbonität um 34 % gesteigert werden. Wurde hingegen kein Stickstoff ausgebracht, aber oberirdisch bewässert (B3), erzielten die Pflanzen im Vergleich zu B2 ebenfalls höhere Gehalte.

Unterirdische Bewässerung und granuliert gedüngte N-Düngung (B7) führten im Vergleich zu nicht bewässerten, granuliert gedüngten Pflanzen (B2) zu einer relativen Steigerung des Alphasäuregehalts um 6,7 %, wohingegen durch Fertigation (B8) 15,2 % erzielt wurden. Hinsichtlich des Unterschieds zwischen Hangober- und Hangunterseite kann angeführt

werden, dass dieser durch die unterirdische Positionierung des Tropfschlauches nicht ausgeglichen werden konnte.

Tab. 5.40: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlerer Alphasäuregehalt (Wassergehalt 10 %) in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung; Differenzierung in Hangober- und Hangunterseite.

Variante	Gesamtfläche	Alphasäure [%]		
		p<0,001 ***	Hang-OS	Hang-US
B1	6,8	cd	6,8	6,9
B2	6,5	d	5,9	7,1
B3	7,3	bc	7,1	7,4
B4	7,5	b	7,4	7,6
B5	8,0	a	7,9	8,1
B6	7,1	bc	7,0	7,1
B7	6,9	cd	6,5	7,3
B8	7,5	b	7,2	7,7

### 5.3.2 Restpflanzenbiomasse

Wurde über den gesamten Versuchszeitraum (2017 bis 2019) kein Stickstoff gedüngt und nicht bewässert (B1) führte dies im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Düngung (B2) zu einer signifikanten Verringerung der Restpflanzenmasse um 39,4 %, wobei der Rückgang an der Hangoberseite stärker ausfiel (Tab. 5.41). Die zusätzliche ober- und unterirdische Bewässerung der nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (B3, B6) verstärkten an der Hangunterseite die Reduktion der Restpflanzenmasse. An der Hangoberseite hingegen führte nur die unterirdische Bewässerung zu einer Verstärkung des Effekts.

Wurden die Pflanzen ausschließlich in granulierter Form gedüngt (B2, B4, B7), führte eine oberirdische Bewässerung (B4) im Vergleich zu nicht bewässerten Pflanzen (B2) im Mittel der gesamten Versuchsfläche zu einer Steigerung der Restpflanzenmasse um 8,9 %, wohingegen die unterirdische Bewässerung diese um 2,1 % verringerte. Eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Bodenqualitäten innerhalb des Schrages zeigt, dass eine Verbesserung der Biomassebildung durch oberirdische Bewässerung ausschließlich an der Hangoberseite stattfand.

Wurden hingegen zwei Drittel der gesamten N-Düngemenge über das Bewässerungswasser appliziert (B5, B8), lag die mittlere Steigerung der Biomassebildung im Vergleich zu nicht bewässerten und granuliert gedüngten Pflanzen (B2) bei 20,2 % bei oberirdischer (B5) und bei 6,6 % bei unterirdischer Tropfschlauchverlegung (B8). Bei einer zusätzlichen Unterscheidung in Abhängigkeit von der Bodenqualität zeigt sich, dass im Mittel der drei Jahre an der Hangoberseite durch oberirdische Fertigation eine Steigerung der Biomassebildung von 34,3 % erzielt wurde.

Tab. 5.41: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlere Restpflanzenbiomasse in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung; Differenzierung in Hangober- und Hangunterseite.

Variante	Restpflanzenbiomasse [t TM ha <sup>-1</sup> ]			
	Gesamtfläche	p<0,001 ***	Hang-OS	Hang-US
B1	2,6	c	2,2	3,0
B2	4,3	b	3,9	4,8
B3	2,5	c	2,4	2,6
B4	4,7	b	4,8	4,7
B5	5,2	a	5,3	5,2
B6	2,2	c	1,8	2,5
B7	4,3	b	3,8	4,7
B8	4,6	b	4,0	5,2

### 5.3.3 Stickstoffentzug, -saldo, -effizienz und Nmin-Gehalte

Erfolgte im ersten Versuchsjahr 2017 keine N-Düngung (B1, B3, B6) reduzierte sich im Vergleich zu ausschließlich granuliert gedüngten, nicht bewässerten Pflanzen (B2) der N-Entzug (Tab. 5.42). In den darauffolgenden Versuchsjahren 2018 und 2019 verringerte sich der N-Entzug nicht gedüngter Pflanzen zunehmend. Dabei verstärkte eine zusätzliche Bewässerung nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (B3, B6), darunter vor allem die Unterirdische (B6), die Reduktion des N-Entzugs. Auch der Gesamtsaldo der Jahre 2017 bis 2019 weist aus, dass zusätzliche Bewässerung nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen zu einer Verringerung des N-Entzugs führt.

Bei ausschließlich granulierter N-Düngung (B2, B4, B7) beeinflusste eine oberirdische Bewässerung (B4) den Gesamtsaldo nicht, wohingegen die unterirdische

Tropfbewässerung (B7) zu einer Verringerung des N-Entzugs führte. Wurden hingegen zwei Drittel der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser ausgebracht (B5, B8), erhöhte sich der Gesamt-N-Entzug im Vergleich zu ausschließlich granuliert gedüngten und nicht bewässerten Pflanzen (B2) um 45 kg N ha<sup>-1</sup> bei oberirdischer (B5) bzw. um 23 kg N ha<sup>-1</sup> bei unterirdischer Fertigation (B8).

Tab. 5.42: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlerer N-Entzug und mittlerer N-Saldo in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung.

Variante	N-Entzug [kg N ha <sup>-1</sup> ]						N-Saldo 2017 bis 2019
	2017	p<0,001 ***	2018	p<0,001 ***	2019	p<0,001 ***	
B1	104	c	88	b	73	b	-265
B2	156	b	194	a	187	a	-57
B3	109	c	77	b	61	b	-246
B4	179	ab	193	a	162	a	-53
B5	187	a	203	a	192	a	-102
B6	96	c	61	b	60	b	-217
B7	160	b	170	a	176	a	-26
B8	179	ab	189	a	191	a	-80

Hinsichtlich der berechneten Stickstoffeffizienz ist zu beachten, dass aufgrund der zunehmenden Verringerung des Ertragsniveaus der als Bezugsbasis genutzten, nicht mit Stickstoff gedüngten und nicht bewässerten Pflanzen (B1), ein Anstieg der berechneten Stickstoffeffizienzwerte über den Versuchszeitraum 2017 bis 2019 stattfand (Tab. 5.43).

Wurde die gesamte N-Menge ausschließlich in granulierter Form ausgebracht (B2, B4, B7), führte nur die oberirdische Bewässerung (B4) tendenziell zu einer Verbesserung der N-Effizienz. Erfolgte die Ausbringung des Stickstoffs hingegen zu zwei Drittel über Fertigation (B5, B8), erhöhte sich die N-Effizienz bei oberirdischer Bewässerung (B5) stärker als bei der unterirdischen Tropfschlauchverlegung (B8).

Tab. 5.43: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Mittlere N-Effizienz in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung.

Variante	Agro. N-Effizienz [kg kg <sup>-1</sup> ]					
	2017	p=0,004 **	2018	p=0,145 n.s.	2019	p=0,42 n.s.
B2	2,1	b	5,8		8,7	
B4	3,7	ab	7,6		8,4	
B5	4,8	a	8,3		10,8	
B7	3,1	ab	5,4		8,7	
B8	4,0	a	7,3		9,2	

Der Verlauf der Nmin-Gehalte zeigt, dass das Niveau des Gehalts im Boden durch Fertilisation bei oberirdischer Tropfschlauchverlegung im Vergleich zu granuliert gedüngten Pflanzen ohne Bewässerung verringert werden kann (Abb. 5.26).

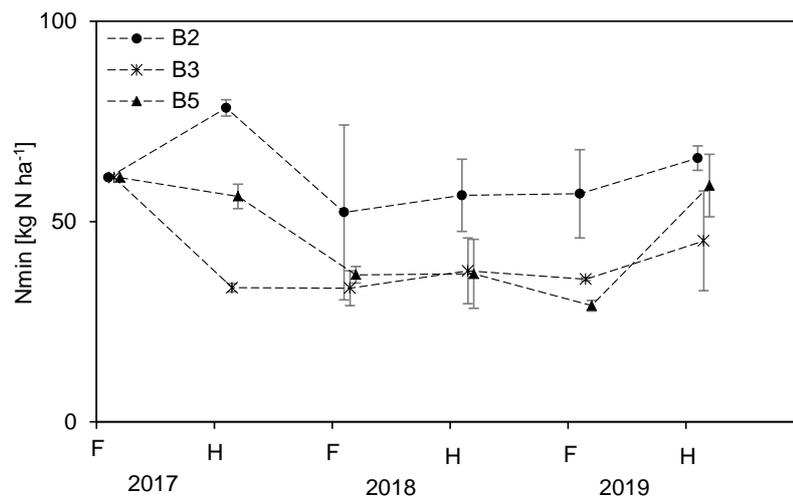


Abb. 5.26: Versuchsansatz 3 – Jahre 2017 bis 2019: Verlauf der Nmin-Gehalte (0 bis 90 cm); F = Frühjahr; H = Herbst.

### 5.3.4 Feinwurzelverteilung

Um mögliche Ursachen der unterschiedlichen Effektivität von ober- und unterirdischer Tropfbewässerung zu analysieren, erfolgte eine Untersuchung der Feinwurzelverteilung von entsprechend behandelten Hopfenpflanzen. Dabei wurden Bodenprofile gegraben, Profilwände präpariert und die Wurzelspitzen mit Wasser freigelegt. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Anzahl und Verteilung der Feinwurzeln im aufgeschütteten Damm sowie unterhalb der Bodenoberfläche auf einer Breite von 160 cm und bis zu einer

Tiefe von 70 cm. Abb. 5.27 zeigt exemplarisch das Ergebnis für ein Bodenprofil mit Andeutung der Position eines ober- bzw. unterirdischen Tropfschlauches. Auffällig dabei ist, dass sich das Feinwurzelwerk einer Hopfenpflanze zu hohen Anteilen im aufgeschütteten Bifang und in den darunter liegenden Bodenschichten befindet. Zu beachten ist jedoch auch, dass es sich bei den im Dammbereich ermittelten Wurzeln nicht ausschließlich um sprossbürtige Sommerwurzeln handelte, da eine Differenzierung dieser nicht möglich war.

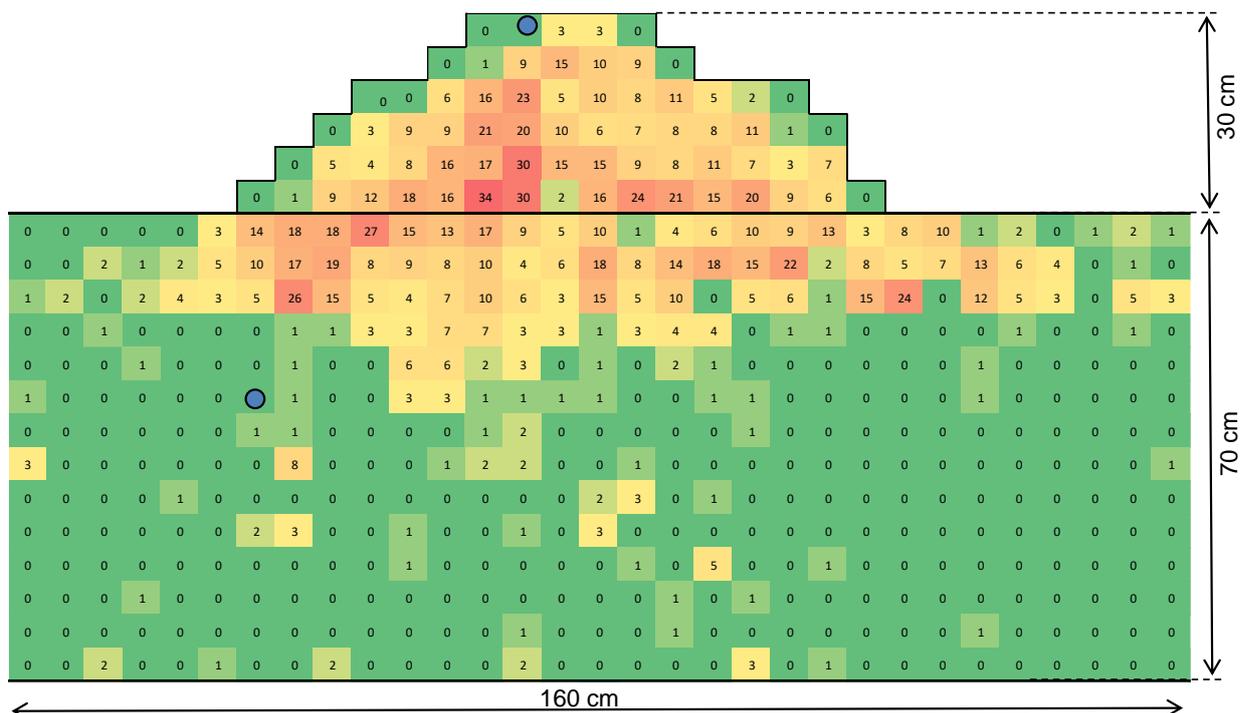


Abb. 5.27: Exemplarische Feinwurzelverteilung (Anzahl an Wurzelspitzen je Zählfeld) mit Andeutung der Position des ober- bzw. unterirdischen Tropfschlauches (blauer Punkt).

Aufgrund der unterschiedlichen Größe der aufgeschütteten Dämme erfolgt der Vergleich Ergebnisse der einzelnen Versuchsvarianten in unterschiedlichen Bereichen des Bodenprofils als Anzahl an Wurzeln je Quadratmeter Profilfläche (Tab. 5.44).

In jeder Versuchsvariante zeigte sich im aufgeschütteten Damm im Vergleich zu den Bereichen unterhalb der Bodenoberfläche (< 0 cm) eine um 4- bis 6-fach höhere Dichte an Feinwurzeln. Bei Betrachtung des Gesamtprofils erreichten oberirdisch bewässerte Pflanzen (B3 bis B5) im Mittel eine um 20,1 % höhere Wurzeldichte als unterirdisch bewässerte (B6 bis B8). Diese lag auf dem Niveau nicht bewässerter Pflanzen (B2). Unterirdische Zusatzbewässerung führte hingegen im Gesamtprofil im Vergleich zu B2 zu einer

Reduktion der Wurzeldichte um 15,3 %. Dabei reduzierte sich die Bildung von Feinwurzeln vor allem im aufgeschütteten Damm. Im Mittel lag die erreichte Wurzeldichte dort um 24 % unter der von nicht bewässerten Pflanzen (B2). Im Vergleich zur oberirdischen Bewässerung (B3 bis B5) reduzierte sich die Dichte um 20 %.

Tab. 5.44: Versuchsansatz 3 – Jahr 2019: Feinwurzelverteilung in unterschiedlichen Bereichen des Profils in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung; Angabe der Standardabweichung als  $\pm$ .

Variante	Feinwurzeln [Anzahl je m <sup>2</sup> Profilwand]					
	Gesamtprofil		Damm		0 bis -70 cm	
B1	1.250	$\pm 27$	3.278	$\pm 289$	771	$\pm 70$
B2	1.444	$\pm 142$	4.573	$\pm 72$	741	$\pm 118$
B3	1.437	$\pm 569$	4.116	$\pm 730$	829	$\pm 629$
B4	1.566	$\pm 258$	4.314	$\pm 260$	1.101	$\pm 289$
B5	1.400	$\pm 351$	4.587	$\pm 1339$	823	$\pm 103$
B6	1.191	$\pm 131$	3.241	$\pm 787$	762	$\pm 359$
B7	1.235	$\pm 464$	3.799	$\pm 1959$	757	$\pm 220$
B8	1.241	$\pm 3$	3.365	$\pm 114$	863	$\pm 28$

Weiterhin kann die relative Verteilung der Anzahl an Wurzeln in Abhängigkeit von der Bodentiefe angegeben werden (Tab. 5.45). Dabei wurden im aufgeschütteten Damm, dessen Anteil an der Fläche des Gesamtprofils zwischen 14 und 20 % betrug, 40 bis 58 % der gesamten Feinwurzeln gezählt. Weitere 35 bis 50 % befanden sich in den ersten 20 cm ab Bodenoberfläche, sodass insgesamt 80 bis 95 % aller Wurzeln im Damm oder in den oberen 20 cm des Profils ermittelt wurden. In den tieferen Schichten der Bodenprofile ab 20 bis 70 cm wurden grundsätzlich nur wenige Feinwurzeln gezählt. Eine Ausnahme stellt die unterirdische Fertigation dar, bei welcher im Vergleich zu anderen Varianten der Anteil tendenziell höher lag.

Tab. 5.45: Versuchsansatz 3 – Jahr 2019: Feinwurzelverteilung in unterschiedlichen Tiefen des Profils in Abhängigkeit von Bewässerung und N-Düngung.

Variante	Feinwurzeln [% der Gesamtanzahl]		
	> 0 cm (Damm)	0 bis 20 cm	20 bis 70 cm
B1	50	35	15
B2	58	36	5
B3	56	37	7
B4	40	50	9
B5	49	42	9
B6	48	42	10
B7	48	43	9
B8	41	40	19

Des Weiteren wurde bei Varianten mit ober- und unterirdischer Bewässerung die Lagerungsdichte des Bodens bestimmt (Abb. 5.28). Die dabei ermittelte Dichte lag in den Bereichen um den unterirdischen Tropfschlauch mit  $1,7 \text{ g cm}^{-3}$  signifikant über der des aufgeschütteten Damms ( $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ ).

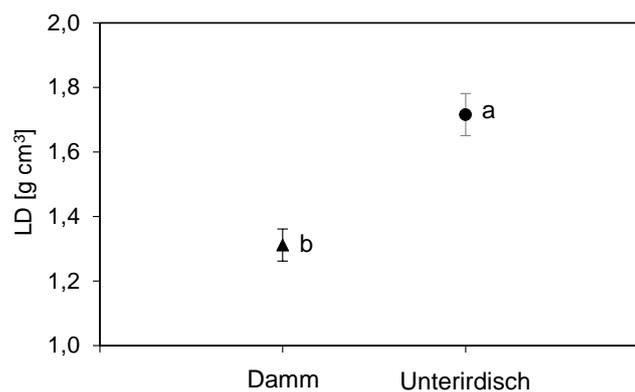


Abb. 5.28: Versuchsansatz 3 – Jahr 2019: Mittlere Lagerungsdichte (LD) unterhalb des oberirdisch (Damm) bzw. unterirdisch verlegten Tropfschlauches.

## 6 Diskussion

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der grundlegenden Frage, ob Stickstoff-Düngesysteme, bei welchen ein Anteil der gesamt auszubringenden N-Menge über das Bewässerungswasser appliziert wird, zu einer Optimierung der N-Düngung des Hopfens beitragen können. Um grundsätzliche Zusammenhänge zu analysieren und empirische Daten zu gewinnen, wurden verschiedene Teilaspekte im Freiland in unterschiedlich konzeptionierten Feldversuchen experimentell geprüft. Hervorzuheben ist dabei, dass ein wesentlicher Teil der Arbeit darin bestand, die im Rahmen der Versuchsdurchführung genutzten Vorgehensweisen und Untersuchungsmethoden vor deren Anwendung zunächst zu entwickeln und zu validieren, da für Hopfen oftmals keine standardisierte Methodik existierte.

Zum einen erfolgte die Untersuchung der Auswirkungen eines in Zeit und Höhe variierten N-Angebots, sowohl in einjähriger Betrachtungsweise als auch unter Berücksichtigung der perennierenden Eigenschaften einer Hopfenpflanze. Zum anderen wurden, um die Effekte einer Stickstoffernährung über das Bewässerungswasser zu analysieren, unterschiedliche N-Düngesysteme mit Fertigation geprüft und der ausschließlich granulierten N-Düngung gegenübergestellt. In diesem Zusammenhang wurde außerdem untersucht, welche Auswirkungen die zusätzliche Bewässerung der Hopfenpflanze hat und welche Einflüsse sich durch eine ober- oder unterirdische Positionierung des Tropfschlauches ergeben. Da für Hopfen keine Methoden zur nicht-invasiven Erfassung des aktuellen N-Versorgungszustandes existieren, wurde weiterhin geprüft, ob eine Messung des Chlorophyllwertes oder die Aufnahme der Reflexionssignatur und Ableitung von Vegetationsindices Aussagen zum Stickstoffernährungszustand der Hopfenpflanze liefern können. Im Rahmen dieses Kapitels werden die beschriebenen Beobachtungen und Ergebnisse wiederaufgegriffen und Erklärungsansätze diskutiert.

### 6.1 Biomassebildung und N-Aufnahme im Wachstumsverlauf

Zur zeitlichen Anpassung des Stickstoffangebots an den Bedarf der Hopfenpflanze sind Kenntnisse über den Verlauf der Biomassebildung und der Stickstoffaufnahme

essenziell, jedoch sind die Verläufe für die aktuell im Anbau befindlichen Hopfensorten weitestgehend unbekannt.

Die an der Sorte Tradition Anfang Mai erfasste Biomassebildung in Höhe von 2 % der bis zur Ernte gebildeten gesamten Pflanzenmasse (Tab. 5.13) zeigt auf, dass Hopfenpflanzen während der Phase des Wiederaustriebs bis Anfang Mai (Abb. 4.4) nur einen geringen Anteil der Gesamtbiomasse bilden. Da sich das Wachstum unterschiedlicher Hopfensorten im Frühjahr während des Austriebs kaum unterscheidet (LfL, 2020b), ist diese grundsätzliche Aussage auch auf Herkules sowie weitere Sorten übertragbar. Wie die Ergebnisse weiterhin zeigen, erstreckt sich die **Hauptwachstumsperiode** einer Hopfenpflanze, unter den klimatischen Bedingungen in der Hallertau, von Anfang Mai bis Ende August über einen Zeitraum von vier Monaten (Abb. 5.3, Tab. 5.13). Dabei werden jedoch 60 bis 70 % der gesamten Biomasse in einem 7- bis 8-wöchigen Zeitraum zwischen Anfang Juni und Anfang August gebildet. Somit kann auf Basis der zugrunde liegenden Daten außerdem eine Phase der **Hauptbiomassebildung** definiert werden. Erfolgt eine Gegenüberstellung des Entwicklungsverlaufs einer Hopfenpflanze wird ersichtlich, dass in dieser Phase neben dem Längenwachstum der Pflanze vor allem ein intensives Wachstum der Seitentriebe sowie die Ausbildung der Verzweigungen für die Ertragsanlagen stattfindet (Abb. 4.4). Auch Seiffert (1995) konnte bereits einen Zusammenhang zwischen der Ausbildung der Seitentriebe sowie der Ertragsanlagen und der Hauptbiomassebildung der Hopfenpflanze herstellen.

Der Verlauf der N-Aufnahme ist, wie auch bei anderen Kulturpflanzen, über den Wachstumsverlauf und Bedarf des Sprosses grundsätzlich an die Biomassebildung der Hopfenpflanze gekoppelt (Abb. 5.3, Tab. 5.13). **Maximale tägliche N-Aufnahmeraten** wurden zwischen Anfang Juni und Anfang August erfasst. Diese Beobachtung konnte auch von Gingrich et al. (1994), Portner et al. (2007), Schäufele (1966), Seiffert (1995), Seiffert und Claassen (1993) und Zattler (1965) gemacht werden. Im Gegensatz zu Seiffert (1995), welcher tägliche N-Aufnahmeraten von bis zu  $3,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  ermittelte, betragen die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Raten maximal  $3,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Dabei ist jedoch davon auszugehen, dass Pflanzenbestände mit einer höheren Gesamt-N-Aufnahme während der Phase der Hauptbiomassebildung auch höhere maximale tägliche N-Aufnahmeraten erreichen. Als Beispiel hierfür ist die Sorte Herkules am sandigen Standort des Versuchsansatzes 2 mit einem erfassten Gesamt-N-Entzug von bis zu  $273 \text{ kg N ha}^{-1}$  anzuführen (Tab. 5.27). Die N-Aufnahme erreichte bis Ende Juli, zu welchem Zeitpunkt sich die

Hopfenpflanze noch in der Vollblüte befindet (Abb. 4.4), in Abhängigkeit von der Sorte und dem Anbaujahr bereits 79 bis 91 % der insgesamt aufgenommenen N-Menge (Tab. 5.13). Der Stickstoff-Anteil in den ab Anfang August gebildeten Dolden betrug je nach Sorte jedoch 40 bis 60 % der aufgenommenen Gesamt-N-Menge (vgl. 5.1.5). Somit kann die Aussage abgeleitet werden, dass ab Anfang August, während der Ausbildung und Reife der Dolden (Abb. 4.4), zwar noch Stickstoff in die oberirdische Biomasse aufgenommen wird, ein wesentlicher Teil der in der Doldenmasse enthaltenen N-Menge jedoch aus Verlagerungsprozessen innerhalb der Pflanze stammen muss.

Bei der Sorte Tradition wurden bis zum 19. Juni insgesamt 34 % der gesamten Biomasse gebildet, wohingegen die akkumulierte N-Menge bereits 49 % des endgültigen Wertes erreichte (Tab. 5.13). In den Untersuchungen lag die relative N-Aufnahme der Pflanzen, unabhängig von der Sorte oder dem Anbaujahr, an jedem Messtermin über der relativen Biomassebildung (Tab. 5.13). Dieser Effekt wurde auch in früheren Untersuchungen von Portner et al. (2007) sowie Seiffert (1995) beschrieben. Daraus resultiert, dass Unterschiede in der Biomassebildungsrate, ausgelöst durch eine reduzierte oder erhöhte N-Aufnahme, auch bei Hopfen zeitlich verzögert auftreten können. Diese These kann durch folgende Beobachtungen bestätigt werden. Bei der Sorte Herkules wurde am 20. Juni (2018) an nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (N1) im Vergleich zur Düngung mit 120 (N5) bzw. 180 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) eine um 12 % geringere Biomasse erfasst, während sich die N-Aufnahme mit -38 % bereits wesentlich stärker reduzierte. Im darauffolgenden Zeitraum bis Anfang Juli stieg die Biomassebildungsrate gedüngter Pflanzen (N2 bis N6) deutlich an, während die Wachstumsrate nicht gedüngter (N1) stagnierte (Abb. 5.4). Wurden nur 60 kg N ha<sup>-1</sup> (N2 bis N4) ausgebracht, nahmen die Ende Mai gedüngten Pflanzen (N3) im Zeitraum zwischen Ende Mai und dem 20. Juni, im Vergleich zum Düngetermin Ende April (N2), zunächst eine höhere N-Menge auf, bevor im darauffolgenden Zeitraum bis Anfang Juli eine erhöhte Biomassebildungsrate erfasst wurde (Abb. 5.4).

Wie die Ergebnisse weiterhin zeigen, wird der grundsätzliche Verlauf der Biomassebildung und N-Aufnahme einer Hopfenpflanze sowohl von der Sorte als auch den Witterungsbedingungen beeinflusst. Bis Ende Juli bildeten die Aromasorten Perle und Tradition, welche sich zu diesem Zeitpunkt noch im Stadium der Vollblüte befanden (Abb. 4.4), bereits 80 bis 82 % der endgültigen Biomasse, wohingegen Herkules zum selben Termin in beiden Jahren ein niedrigeres Niveau erreichte (Tab. 5.13). Die Sorte Herkules bildete folglich im Zeitraum zwischen Ende Juli und dem Erreichen der Erntereife, in welchem

vor allem die Ausbildung der Dolden stattfindet (Abb. 4.4), einen höheren Anteil der Gesamtbiomasse als die Aromasorten. Als Begründung für die zeitliche Verschiebung der Biomassebildung von Herkules kann zum einen die spätere Reife (LfL, 2020b) und somit verlängerte Wachstumsphase angeführt werden (Abb. 5.3, Tab. 5.13). Zum anderen liegt der Anteil der Doldenmasse an der Gesamtbiomasse bei der Sorte Herkules höher (vgl. 5.1.2, 5.1.3). Ein Vergleich der absoluten Biomassebildung und N-Aufnahme bis zum Erntezeitpunkt zeigt, dass Herkules im Mittel der zwei Untersuchungsjahre eine um 28 % höhere Pflanzenmasse als die Aromasorten Perle und Tradition bildete, die zusätzlich aufgenommene N-Menge jedoch in geringerem Umfang anstieg (Abb. 5.3). Die Sorte Herkules erreichte somit bei niedrigeren N-Konzentrationen höhere Biomassebildungsraten.

Im Versuchsjahr 2017 bildete die Sorte Perle bis zum 8. Juni 10 % der Gesamtbiomasse und nahm 14 % des gesamten Stickstoffs auf (Tab. 5.13). Im darauffolgenden Versuchsjahr 2018 lagen Biomassebildung und N-Aufnahme der Sorte Tradition bereits am 28. Mai auf einem vergleichbaren Niveau. Grundsätzlich weisen die Aromasorten Perle und Tradition jedoch einen vergleichbaren Entwicklungsverlauf auf. Als Ursache für die fortgeschrittene Entwicklung der Sorte Tradition im Jahr 2018, die auch im Feld beobachtet werden konnte (vgl. 5.1.1), können die hohen Frühjahrstemperatursummen des Anbaujahres (vgl. 4.3) angesehen werden. Hingegen konnte bei der Sorte Herkules im Jahr 2018 keine fortgeschrittene Pflanzenentwicklung beobachtet werden. Eine Begründung der sortenspezifischen Reaktion auf die Witterungsbedingungen kann auf Basis des sortenabhängig unterschiedlichen Schnitzeitpunkts erfolgen, da dieser vor allem die Frühjahrsentwicklung einer Hopfenpflanze beeinflusst (Mahaffee et al., 2009). Aromasorten wie Perle und Tradition werden früher als die Hochalphasorte Herkules geschnitten. Je später eine Hopfenpflanze zurückgeschnitten wird, desto stärker wird das Wachstum dieser verzögert (LfL, 2020b), wodurch sich der Einfluss höherer Temperaturen in frühen Wachstumsphasen verringert.

Im Hinblick auf den Einfluss der N-Düngung führte eine Steigerung der N-Düngung von  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  (N5) auf  $180 \text{ kg N ha}^{-1}$  (N6) durch die Applikation einer dritten N-Gabe Anfang Juli bei der Sorte Herkules über den gesamten Vegetationsverlauf nicht zu einer Beeinflussung der Biomassebildung (Abb. 5.4). Jedoch reduzierte sich ab Ende Juli die N-Aufnahmerate niedriger gedüngter Pflanzen (N5), wodurch bis zum Erreichen der Erntereife eine geringere N-Menge in der oberirdischen Biomasse akkumuliert wurde. Die

Sorte Tradition hingegen reagierte auf eine Erhöhung der N-Düngung von 100 (N5) auf 150 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) nicht nur mit einer höheren N-Aufnahme, sondern auch mit einer gesteigerten Biomassebildung (Abb. 5.5). Durch eine weitere Reduktion der N-Düngung auf 60 (HS) bzw. 50 (HT) kg N ha<sup>-1</sup> (N2 bis N4) verringerten sich bei Herkules sowohl die N-Aufnahme als auch die Biomassebildung, wohingegen bei Tradition eine Abhängigkeit vom Zeitpunkt der N-Applikation bestand (Abb. 5.4, Abb. 5.5). Während die bereits im April gedüngten Pflanzen (N2) der Sorte Tradition noch eine mit N5 vergleichbare Biomassebildung und N-Aufnahme erreichten, führten spätere Applikationszeitpunkte (N3, N4) zu einer Reduktion. Bei der Sorte Herkules hingegen erreichten unter den mit 60 kg N ha<sup>-1</sup> versorgten Pflanzen (N2, N3, N4) die Ende Mai gedüngten (N3) die höchste Biomasse und N-Aufnahme.

Wie an den ausschließlich Anfang Juli mit 50 bzw. 60 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngten Pflanzen (N4) beider Sorten beobachtet werden konnte, führte diese späte N-Applikation von unten beginnend bis auf etwa 2/3 der Gerüsthöhe zu einer Reduktion des Seitentriebwachstums (vgl. 5.1.1). Der Habitus der Pflanzen veränderte sich dadurch deutlich. Im Anschluss an die Applikation von Stickstoff Anfang Juli konnte zwar eine Ausbildung der Seitentriebe im obersten Pflanzenabschnitt beobachtet werden, jedoch zeigten die Seitentriebe der unteren Rebenabschnitte kein erneutes Wachstum mehr. Wie die im Rahmen der <sup>15</sup>N-Tracer-Technik gewonnenen Erkenntnisse aufzeigen (vgl. 5.2.11.1), werden vor allem in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien erhöhte Anteile des ausgebrachten Stickstoffs in höher liegende Pflanzenabschnitte transportiert (Abb. 5.22, Abb. 5.23). Durch diesen Effekt zeigen die unteren Seitentriebe auch bei erneuter N-Zufuhr zu einem späteren Zeitpunkt kein Wachstum mehr, da wesentliche Anteile des Stickstoffs in höher liegende Pflanzenabschnitte transportiert werden. Bei einer Verschiebung des Ausbringzeitpunkts auf Ende Mai (N3) beschränkte sich die Reduktion des Seitentriebwachstums hingegen auf den untersten Rebenabschnitt (vgl. 5.1.1). Im Gegensatz dazu zeigten die Pflanzen der bereits im April gedüngten Varianten (N2, N5, N6) ein deutlich stärker ausgeprägtes Seitentriebwachstum im untersten Rebenabschnitt. Auch die im Rahmen der Versuchsserie 2 durchgeführte empirische Untersuchung des Seitentriebwachstums in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der N-Applikation bestätigt, dass der Zeitpunkt der N-Düngung das Seitentriebwachstum beeinflusst (vgl. 5.2.10). Neben dem Zeitpunkt wirkt sich auch die Höhe der N-Düngung auf die Ausbildung der Seitentriebe aus, wie vor allem an nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen zu erkennen war (vgl. 5.1.1).

Aufgrund des erläuterten Zusammenhangs zwischen dem Seitentriebwachstum und der Biomassebildung können die Unterschiede in der gebildeten Biomasse (Abb. 5.3, Abb. 5.4) mit dem durch die N-Düngung beeinflussten Habitus begründet werden. Durch die Erkenntnis, dass ein verändertes Seitentriebwachstum ursächlich für Biomasseunterschiede infolge einer variierten N-Düngung ist, kann auch das verzögerte Auftreten von Biomasseeffekten erklärt werden. Eine Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Seitentriebausildung zeigt, dass diese während des Längenwachstums der Hopfenpflanze zunächst angelegt werden, ein intensives Wachstum jedoch erst mit dem Erreichen einer bestimmten Mindesthöhe des Haupttriebs stattfindet (vgl. 2.1, Abb. 4.4). Dieser Zeitpunkt stellt in etwa auch den Beginn der Hauptbiomassebildung dar, weshalb Biomasseunterschiede infolge einer variierten N-Düngung erst mit dem Beginn dieser Phase erfasst werden konnten.

Da Aromasorten wie Tradition und Perle bei hohen Frühjahrstemperaturen stärker zu einer fortgeschrittenen Pflanzenentwicklung als Herkules neigen (LfL, 2020b), besteht bei diesen ein höheres Risiko für eine Einschränkung des Seitentriebwachstums und der Pflanzenentwicklung bei zu später N-Ausbringung. Wie die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zeigen, konnte bei Tradition im Anbaujahr 2018 durch die Verschiebung des Ausbringzeitpunkts einer einzelnen N-Gabe von Ende April (N2) auf Ende Mai (N3) bereits ein deutlich reduziertes Seitentriebwachstum (vgl. 5.1.1) sowie eine verringerte Biomassebildung (Abb. 5.5) festgestellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die bis Ende Mai erfasste prozentuale N-Aufnahme bei Pflanzen, die unter nicht limitiertem N-Angebot wuchsen (N5, N6), nur bei 10 bis 14 % lag. Daraus kann die Aussage abgeleitet werden, dass obwohl bis Ende Mai nur ein geringer Anteil der gesamten N-Menge aufgenommen wird, eine Unterversorgung mit Stickstoff bis zu diesem Zeitpunkt bereits ausreicht, um das Seitentriebwachstum und dadurch im weiteren Wachstumsverlauf auch die Biomassebildung einzuschränken. Bei der Sorte Herkules hingegen erreichten die Ende Mai mit  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten Pflanzen (N3), aufgrund der späteren Reife und verlängerten Wachstumsperiode, eine höhere Biomasse und N-Aufnahme als bei einer Düngung Ende April (N2).

Aufgrund der erläuterten Zusammenhänge wird eine ausschließliche Ausrichtung der N-Düngung an der N-Aufnahmekurve der Hopfenpflanze als nicht sinnvoll erachtet. Vor allem Sorten, deren Entwicklung vergleichbar mit der von Perle und Tradition ist, benötigen für eine sortentypische Ausbildung der Seitentriebe bereits zu relativ frühen Zeitpunkten

(während der Phase des Wiederaustriebs im April) eine bestimmte Menge an Stickstoff. In der Praxis hat sich die frühzeitige Ausbringung der ersten N-Gabe (vgl. 2.3.2) in der Vergangenheit wahrscheinlich deshalb etabliert, da das damalige Sortenspektrum, zu welchem auch die untersuchten Aromasorten Perle und Tradition zählen, auf eine zu späte N-Düngung mit reduziertem Wachstum und Ertragseinbußen reagierte. Auch Seifert (1995) konnte an der Sorte Tettlinger zeigen, dass eine zu späte N-Düngung den Doldenertrag tendenziell reduziert. Bei spätreiferen Sorten wie Herkules hingegen ist der Zeitpunkt der ersten N-Gabe weniger bedeutend, da durch die verlängerte Wachstumsphase ein höheres Potenzial zur Kompensation besteht.

## 6.2 Erfassung des aktuellen N-Versorgungszustandes

Die Erfassung des aktuellen N-Versorgungszustandes von Kulturpflanzen ermöglicht eine Anpassung der Stickstoffdüngung an den tatsächlichen Bedarf, wodurch eine Optimierung agronomischer Kennzahlen, bei gleichzeitiger Minimierung negativer umweltökologischer Effekte, erreicht werden kann (vgl. 2.4). Zur Bestimmung des aktuellen N-Versorgungszustandes einer Hopfenpflanze im Vegetationsverlauf wurden im Rahmen dieser Arbeit die Ermittlung des Blatt-Chlorophyllwertes auf Basis des Lichttransmissionsverhaltens mit einem SPAD-Meter sowie die Erfassung der Reflexionssignatur durch ein passives Spektrometer-Messsystem geprüft (vgl. 4.5.4).

Da für Hopfen keine validierte Vorgehensweise zur Analyse des Blatt-Chlorophyllwertes mittels eines SPAD-Meters existierte, wurde im Versuchsjahr 2017 zunächst eine geeignete Methodik zur Erfassung repräsentativer Messwerte entwickelt (vgl. 4.5.4.1). Gianquinto et al. (2004) beschreiben, dass das Messergebnis durch die Exposition eines Blattes im Sonnen- oder Schattenbereich der Pflanze beeinflusst wird. Diese Beobachtung konnte auch im Rahmen der eigenen Untersuchungen gemacht werden, weshalb die Ermittlung eines repräsentativen Messwertes an beiden Einzelreben einer Hopfenpflanze erfolgte (vgl. 4.5.4.1). Um zu analysieren, ob der mit dem SPAD-Meter erfasste Chlorophyllwert den N-Gehalt eines Hopfenblattes überhaupt abbildet, wurde bei der Sorte Herkules im Jahr 2018 der Gesamt-N-Gehalt der gemessenen Blätter bestimmt (vgl. 4.5.4.1). Wie die Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse zeigen, lagen die Bestimmtheitsmaße zwischen 0,85 und 0,95 (Abb. 5.10 a). Somit kann der N-Gehalt eines Hopfenblattes durch den Chlorophyllwert des SPAD-Meters abgebildet werden. Weiterhin besteht mit  $R^2$ -Werten zwischen 0,79 und 0,82 auch ein Zusammenhang zwischen

dem Chlorophyllwert des Blattes und dem im Zuge der Ermittlung der N-Aufnahme erfassten N-Gehalt der gesamten Hopfenpflanze (Abb. 5.10 b). Für beide Beziehungen variierten in Abhängigkeit des Messtermins sowohl die Steigung als auch der y-Achsenabschnitt der Geraden (Abb. 5.10 a, b). Auf Grundlage dieser Erkenntnisse kann die Aussage getroffen werden, dass unterschiedliche N-Versorgungsniveaus, auf Basis eines an den unteren Blättern des Haupttriebs mit einem SPAD-Meter erfassten Chlorophyllwertes, grundsätzlich unterschieden werden können.

Weiterhin kann, basierend auf im Rahmen des Versuchsansatzes 1 an den Sorten Herkules und Tradition (2018, 2019) ermittelten Ergebnissen, die Aussage getroffen werden, dass ein zeitlich und mengenmäßig variiertes N-Angebot anhand des Kurvenverlaufs der Chlorophyllwerte differenziert werden kann (Abb. 5.6 bis Abb. 5.9). Aussagen dazu, ab welchem N-Versorgungsniveau bei Hopfen der von Rostami et al. (2008), Schepers et al. (1998), sowie Yang et al. (2014) beschriebene Sättigungseffekt eintritt, können jedoch nicht getroffen werden. Am Standort der Sorte Herkules wurden im Anbaujahr 2019 im Vergleich zu 2018 bei jeder N-Düngestufe höhere Maximalwerte erfasst, obwohl sich die Höhe der N-Düngung nicht unterschied (Abb. 5.6, Abb. 5.8). Da im Frühjahr 2019 jedoch keine erhöhten N<sub>min</sub>-Gehalte erfasst wurden (Tab. 5.11), weist diese Beobachtung auf eine erhöhte Mineralisation organischer N-Verbindungen während der Vegetation hin. Somit kann die Aussage dahingehend erweitert werden, dass durch den Chlorophyllwert neben dem Zeitpunkt und der Höhe der N-Düngung auch eine Erfassung der N-Nachlieferung aus dem Boden möglich ist.

Erfolgte bei der Sorte Tradition eine Verschiebung des Ausbringzeitpunkts einer einzelnen N-Gabe von Ende April (N2) auf Ende Mai (N3) bzw. Anfang Juli (N4), führte dies in zwei Anbaujahren über den gesamten Vegetationsverlauf zu einem niedrigeren Verlauf der Chlorophyllwerte (Abb. 5.7, Abb. 5.9). Im Gegensatz dazu stieg bei der Sorte Herkules der Messwert der Ende Mai (N3) gedüngten Pflanzen auf das Niveau des Düngezeitpunkts Ende April (N2) an (Abb. 5.6, Abb. 5.8). Vergleichbare Beobachtungen konnten im Versuchsjahr 2019 auch im Rahmen des Versuchsansatzes 2 gemacht werden. Dabei führte eine Verschiebung des Beginns des 6-wöchigen Ausbringfensters von Anfang Juni (KW23, F6b) auf Ende Juni (KW26, F6d) zu einem niedrigeren Kurvenverlauf der Chlorophyllwerte. Ein späterer Anstieg der Messwerte auf das Niveau der bereits ab KW23 (F6b) gedüngten Pflanzen wurde im Zeitraum der Hauptbiomassebildung nur bei der Sorte Perle gegen Ende Juli erfasst (Abb. 5.19, Abb. 5.20). In diesem Zusammenhang

wurde im Versuchsjahr 2018 weiterhin geprüft, ab welchem Zeitpunkt eine Verzögerung des Beginns der Applikation des über Fertigation auszubringenden N-Anteils (F6a), im Vergleich zu einer Referenz (F6b KW23), zu verringerten Chlorophyllwerten führt und ob durch die anschließende Ausbringung von Stickstoff ein Anstieg der Chlorophyllwerte messbar ist (vgl. 4.4.2.2). Dabei konnte an den Blättern des unteren Haupttriebs im Vergleich zur Referenz (F6b) zwar eine Verringerung des Chlorophyllwertes erfasst werden, bei anschließender N-Ausbringung war jedoch kein Anstieg der Werte mehr messbar (Abb. 5.17, Abb. 5.18).

Die Herleitung eines Erklärungsmodells für die beschriebenen Effekte kann auf Grundlage der im Versuchsjahr 2019 eingesetzten  $^{15}\text{N}$ -Tracer-Technik erfolgen (vgl. 4.5.8). Wie die  $\delta^{15}\text{N}$ -Gehalte zeigen, wurde ausgebrachter Stickstoff sowohl bei Herkules, als auch bei Perle grundsätzlich in alle untersuchten Teile der Hopfenpflanzen transportiert (Abb. 5.22, Abb. 5.23). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Verteilung des Stickstoffs innerhalb der Pflanze nicht homogen erfolgte. Unabhängig vom Zeitpunkt und der Höhe der N-Ausbringung wurde der applizierte Stickstoff verstärkt in höher liegenden Pflanzenabschnitten bzw. in den Seitentriebblättern erfasst, während in den Haupttriebblättern des unteren Pflanzenabschnitts die niedrigsten Gehalte gemessen wurden. Dabei führte eine Verschiebung des Ausbringzeitpunkts der  $^{15}\text{N}$ -markierten N-Gabe von KW25 (F6b) auf KW27 (F6) dazu, dass sich der Anteil des Stickstoffs der in die unteren Pflanzenabschnitte transportiert wurde, verringerte. Yoneyama et al. (2003) beschreiben bei unterschiedlichen Kulturen, dass aufgenommener Stickstoff vor allem zu im Wachstum befindlichen Pflanzenorganen transportiert wird. Somit ist die fehlende oder stark verzögerte Reaktion des Chlorophyllwertes, gemessen an den Blättern des unteren Haupttriebs, mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass während der Phase der Hauptbiomassebildung erhöhte Anteile des ausgebrachten Stickstoffs in höhere bzw. jüngere Pflanzenabschnitte transportiert wurden. Daraus resultiert, dass eine Messung des Chlorophyllwertes an den unteren Blättern des Haupttriebs den N-Versorgungszustand der Pflanze zwar grundsätzlich abbildet, kurzfristige Änderungen des N-Ernährungszustandes während der Phase der Hauptbiomassebildung jedoch nicht ausreichend erfasst werden können. Im Hinblick auf den zukünftigen Einsatz bei Düngesystemen mit Fertigation zur Bemessung des notwendigen Düngebedarfs **während der Hauptbiomassebildung** eignet sich die Messung somit nicht.

Hinsichtlich des grundsätzlichen Kurvenverlaufs der Chlorophyllwerte während der Vegetation zeigte sich, unabhängig von der Sorte, dem Standort oder der Höhe der N-Düngung, dass die an den unteren Blättern des Haupttriebs gemessenen Chlorophyllwerte zunächst ansteigen, während der Phase der Hauptbiomassebildung in der Regel ein Maximum erreichen und im Anschluss bis zum Erreichen der Erntereife wieder abnehmen (vgl. 5.1.10.1, 0). Ein Vergleich des Verlaufs der Chlorophyllwerte im Zeitraum vor der Ernte mit den N-Gehalten in Speicherwurzeln zeigt auf, dass ein starker Rückgang des Messwertes ein Hinweis auf eine verringerte N-Einlagerung sein kann (Abb. 5.6, Tab. 5.12 und Abb. 5.17 a, Tab. 5.33). Weiterhin wurde im Rahmen der Feldversuche beobachtet, dass eine starke Verringerung des Chlorophyllwertes bereits während der Hauptbiomassebildung ein Indiz für eine unzureichende Höhe der N-Düngung ist (Abb. 5.17 a). Die Nutzung von Chlorophyllwerten zur Optimierung der N-Düngung wird, wie im Kapitel 2.4 erläutert, sowohl bei acker-, als auch gartenbaulichen Kulturen verfolgt, wobei die verschiedenen Ansatzpunkte auf der Festlegung von Schwellenwerten basieren. Die von Gianquinto et al. (2004) beschriebene Abhängigkeit des Messwertes vom Entwicklungszustand der Pflanze besteht auch bei Hopfen, weshalb die Festlegung von Schwellenwerten, die über die gesamte Vegetation gültig sind, nicht möglich ist. Als sinnvoll wird bei Hopfen eine Unterteilung der Pflanzenentwicklung in **vor**, **während** und **nach** der Hauptbiomassebildung erachtet.

Eine endgültige Definition von Schwellenwerten ist auf Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Daten jedoch nicht möglich, hierzu wäre zum einen eine höhere Anzahl an N-Steigerungsstufen nötig gewesen. Zum anderen ist aufgrund des im Kapitel 6.3 erläuterten Zusammenhangs zwischen der N-Düngung, der N-Einlagerung sowie dem Wiederaustrieb im Folgejahr zwingend eine mehrjährige Betrachtung erforderlich. In zukünftigen Untersuchungen könnten, wie von Zheng et al. (2015) beschrieben, auch sortenspezifische dynamische Schwellenwerte auf Basis von quadratischen Regressionsfunktionen zur Anpassung des Grenzwertes im Verlauf der Vegetation Anwendung finden.

Neben der Nutzung von Chlorophyllwerten wurde weiterhin untersucht, ob durch Vegetationsindices, berechnet auf Basis einer passiven Messung der Reflexionssignatur, Pflanzenparameter wie der N-Gehalt, die Biomasse oder die N-Aufnahme abgebildet werden können und dadurch ein Bezug zum N-Versorgungszustand sowie zur N-Düngung hergestellt werden kann. Die Erfassung der Reflexionssignaturen erfolgte im Rahmen des Versuchsansatzes 1 an der Sorte Herkules (2018) an fünf Terminen und in drei

bzw. zwei Messhöhen. Aufgrund hoher Beschattung durch den Pflanzenbestand wurde ab Ende Juli auf die unterste Messhöhe verzichtet (vgl. 4.5.4.2).

Auf Basis der erläuterten Ergebnisse kann die Aussage getroffen werden, dass die Pflanzenparameter N-Gehalt und N-Aufnahme sowohl durch den Index REIP, als auch IR G mit einer hohen Präzision abgebildet werden können (Tab. 5.14, Tab. 5.15). Dabei ist hinsichtlich des Messtermins anzuführen, dass der REIP zu früheren Zeitpunkten bessere Ergebnisse lieferte, während zu späteren Terminen der IR G höhere Bestimmtheitsmaße erreichte. Die Untersuchung der Messhöhe ergab, dass sich für die Bestimmung des N-Gehalts der Gesamtpflanze die oberste Höhe am besten eignet, wohingegen für die Abbildung der N-Aufnahme auf der mittleren Messhöhe die höchsten Bestimmtheitsmaße erreicht wurden. Weiterhin ist die Beziehung zwischen den Vegetationsindices und den Pflanzenparametern abhängig vom Messtermin, da sowohl die Steigung, als auch der y-Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichungen variierten (Abb. 5.11, Abb. 5.12). Die Messpräzision des häufig in anderen Kulturen genutzten Index NDVI lag auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Ursächlich für diesen Effekt könnte ein Sättigungseffekt sein, da bekannt ist, dass beim NDVI mit steigendem Biomasseaufwuchs ein Sättigungseffekt eintritt und die Sensitivität des Index sinkt (Scotford und Miller, 2004a; 2004b). Für die Indices REIP sowie IR G konnten hingegen auf Grundlage dieser Datenbasis keine Anzeichen eines Sättigungseffektes ermittelt werden. Neben der Abbildung der genannten Pflanzenparameter konnte durch die Indices REIP und IR G auch ein konkreter Bezug zur N-Düngung hergestellt werden, wie die Messwerte im Vegetationsverlauf zeigen (Abb. 5.13).

Da durch Vegetationsindices neben dem N-Gehalt auch die tatsächliche N-Aufnahme bestimmt werden kann, haben passive Reflexionsmessungen im Vergleich zu Chlorophyllwert-Messungen eine höhere Informationskraft hinsichtlich des aktuellen N-Versorgungszustandes der Pflanze. In zukünftigen Untersuchungen sollte auch überprüft werden, ob hopfenspezifische Wellenlängen existieren, welche die Präzision der Bestimmung unterschiedlicher Pflanzenparameter erhöhen.

### 6.3 Auswirkungen einer in Höhe und Zeit variierten N-Düngung

Die Ergebnisse der durchgeführten Düngeversuche zeigen auf, dass durch ein in Zeit und Höhe variiertes N-Angebot umfangreiche Auswirkungen, sowohl auf agronomisch bedeutende Parameter wie den Doldenertrag und Alphasäuregehalt, als auch auf umweltökologisch relevante Faktoren zu erwarten sind. Die Effekte werden nachfolgend diskutiert.

#### ***Auswirkungen der Höhe der N-Düngung auf den Doldenertrag:***

Eine Steigerung der N-Düngung auf bis zu 170 kg N ha<sup>-1</sup> (PE) bzw. 190 kg N ha<sup>-1</sup> (HS) führte in den Feldversuchen V1\_PE\_17 und V1\_HS\_17, im Vergleich zu nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen, bei Perle zu keiner und bei Herkules zu einer geringfügigen, jedoch nicht signifikanten Steigerung des Doldenertrags (Tab. 5.1). Da die mit 170 kg N ha<sup>-1</sup> (PE) bzw. 190 kg N ha<sup>-1</sup> (HS) gedüngten Varianten im Vergleich zur Kontrolle (N1) im Herbst nach der Ernte deutlich erhöhte N<sub>min</sub>-Gehalte aufwiesen, ist von einem nicht limitierendem N-Angebot als Ursache für die fehlende Differenzierung auszugehen (Tab. 5.11). Dabei weisen speziell am Standort der Sorte Perle die hohen N<sub>t</sub>-Gehalte auf ein erhöhtes Mineralisationspotenzial organischer N-Verbindungen hin (Tab. 4.3). Die These eines nicht limitierten N-Angebots wird zudem durch das Niveau des im Frühjahr gemessenen N<sub>min</sub>-Gehalts gestützt (Tab. 5.11). Des Weiteren herrschte im Juli des Jahres 2017 eine ausgeprägte Trockenheit (vgl. 4.3), die vor allem am Standort der Sorte Perle mit geringer Bodenbonität (Tab. 4.3) zu einer sichtbaren Einschränkung der Pflanzenentwicklung führte (vgl. 5.1.1), wodurch sich die für die Biomassebildung benötigte N-Menge mit hoher Wahrscheinlichkeit zusätzlich verringerte. Dass die Auswirkungen der Höhe der N-Düngung vom Vorrat an mineralischem Stickstoff im Boden abhängig sind, zeigte sich im Versuchsjahr 2017 auch in den Feldversuchen der Versuchsserie 2 am lehmigen Standort. Im Vergleich zu nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen führte die Ausbringung von 100 kg N ha<sup>-1</sup> dort weder bei Herkules noch bei Perle zu einer Steigerung des Doldenertrags (Tab. 5.17). Als Ursache für diesen Effekt sind die erhöhten N<sub>min</sub>-Gehalte im Frühjahr mit 149 kg N ha<sup>-1</sup> bei Herkules und 121 kg N ha<sup>-1</sup> bei Perle anzusehen (Tab. 5.29). Somit kann die Aussage getroffen werden, dass bei einem sehr hohen Niveau der N<sub>min</sub>-Gehalte im Frühjahr eine erhebliche Reduktion der N-Düngung erfolgen kann, ohne dass Ertragseinbußen zu erwarten sind.

Nach der Neuanlage der Feldversuche des Versuchsansatzes 1 führte in den Versuchsjahren 2018 und 2019 eine Steigerung der N-Düngung bei der Sorte Herkules von 0 (N1) auf 60 (N2) und 120 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) jeweils zu einem signifikanten Anstieg des Doldenertrags, wohingegen bei einer weiteren Erhöhung auf 180 kg N ha<sup>-1</sup> (N6) in beiden Jahren keine Ertragswirkung mehr festgestellt werden konnte (Tab. 5.2). Obwohl zwischen N5 und N6 keine Ertragsunterschiede erfasst wurden, reagierten die mit 120 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) gedüngten Pflanzen im Verlauf des Monats Juli in beiden Jahren mit, im Vergleich zur Variante N6, reduzierten Chlorophyllwerten (Abb. 5.6, Abb. 5.8). Die höheren Chlorophyllwerte der Pflanzen von N6 weisen darauf hin, dass ein Anteil des Anfang Juli applizierten Stickstoffs von den Pflanzen aufgenommen wurde. Die Aufhellung der reduziert gedüngten Pflanzen (N5) verstärkte sich im Verlauf des Augusts während der Reifephase in beiden Versuchsjahren, sodass die Unterschiede bis zum Erreichen der Erntereife auch optisch deutlich zu erkennen waren (vgl. 5.1.1). Eine geringe N-Versorgung der Pflanze führt auch bei Hopfen zu einer beschleunigten Reife, dies zeigte sich im Rahmen der Feldversuche vor allem bei nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen (vgl. 5.1.1, 5.2.1). Dabei wurde auch eine reduzierte Widerstandsfähigkeit gegen die Pilzkrankheit Mehltau (*Podosphaera macularis*) beobachtet. Hopfen wird im Gegensatz zu anderen Pflanzen jedoch nicht im Zustand der physiologischen Reife geerntet, sondern bereits zuvor (vgl. 2.1). Da im Zuge der natürlichen Reife der Dolden eine Braunverfärbung der Doldenblätter eintritt und dies eine Qualitätsminderung darstellt (Lutz et al., 2009), ist eine zu geringe N-Versorgung und beschleunigte Reife im Zeitraum vor der Ernte als kritisch im Hinblick auf die äußere Doldenqualität anzusehen.

Auch bei der Sorte Tradition führte eine Steigerung der N-Düngung von 0 (N1) auf 50 kg N ha<sup>-1</sup> (N2) in beiden Versuchsjahren (2018, 2019) zu einer Zunahme des Doldenertrags (Tab. 5.2). Keine Ertragseffekte wurden hingegen bei einer Erhöhung der N-Düngung von 50 (N2) auf 100 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) gemessen, jedoch bei einer weiteren Steigerung auf 150 kg N ha<sup>-1</sup> (N6). Vergleichbare N-Düngeeffekte zeigten sich auch an der Restpflanzenbiomasse (Tab. 5.4). Im Gegensatz zur Sorte Herkules reagierte die Sorte Tradition auf eine Reduktion der N-Düngung von 3/3 (N6) auf 2/3 (N5) mit einer verringerten Biomasse- und Ertragsbildung (Tab. 5.2, Tab. 5.4). Grundsätzlich wurde bei den Aromasorten Tradition und Perle im Vergleich zu Herkules sowohl in der Restpflanze, als auch den Dolden ein höheres Niveau der N-Gehalte gemessen (vgl. 5.1.4, 5.2.4). Diese Erkenntnis spricht dafür, dass die untersuchten Aromasorten auf höhere N-Gehalte in der Biomasse angewiesen sind, um eine sortenspezifisch maximale Wachstumsrate und Ertragsbildung zu

erreichen. Die zusätzliche Applikation einer zweiten N-Gabe Ende Mai (N5), ohne Ausbringung einer dritten Gabe Anfang Juli, hatte am Standort der Sorte Tradition im Vergleich zu N2 in beiden Jahren keine Effekte auf die Biomasse- und Ertragsbildung (Tab. 5.2, Tab. 5.4). Unstrittig ist, dass im Zeitraum zwischen Ende Mai und Anfang Juli, unabhängig von der Höhe der N-Düngung (N2, N5) zusätzlicher Stickstoff in der Biomasse akkumuliert wurde (Abb. 5.5). Somit kann die Aussage getroffen werden, dass der Stickstoffbedarf der Pflanzen im Zeitraum zwischen Ende Mai und Anfang Juli durch die Mineralisation organischer N-Verbindungen kompensiert werden konnte, zumal hohe mineralische Bodenvorräte aufgrund der niedrigen N<sub>min</sub>-Gehalte im Frühjahr ausgeschlossen werden können (Tab. 5.11). Der vergleichbare Verlauf der Chlorophyllwerte der Varianten N2 und N5 stützt diese These (Abb. 5.7, Abb. 5.9). Daraus resultiert jedoch, dass in zukünftigen Untersuchungen auch betrachtet werden sollte, welche Effekte sich durch die Kombination einer N-Gabe Ende April und Anfang Juli ergeben.

Wie bereits in Kapitel 6.1 thematisiert, fördert Stickstoff, in Abhängigkeit des Zeitpunkts der Ausbringung, die Ausbildung und das Wachstum der Seitentriebe. Die Seitentriebe sind grundsätzlich von entscheidender Bedeutung für die Ertragsbildung, da ein Großteil der Dolden an den Verzweigungen dieser Triebe gebildet wird (vgl. 5.2.10). Vor allem nicht mit Stickstoff gedüngte Pflanzen zeigten eine deutliche Reduktion des Seitentriebwachstums, wohingegen eine zunehmende Steigerung der N-Düngung zu stärkerem Wachstum führte (vgl. 5.1.1, 5.2.1). Da ein sortenspezifisch optimaler Habitus jedoch von entscheidender Bedeutung für die Höhe der Ertragsbildung ist (vgl. 2.3.1), kann ein veränderter Habitus als Ursache für die durch die Höhe der N-Düngung verursachten Ertragsunterschiede benannt werden. Zwei- bzw. dreijährig nicht mit Stickstoff gedüngte Pflanzen reagierten in jedem der durchgeführten Düngeversuche mit einer zunehmenden Einschränkung des Seitentriebwachstums sowie Verringerung des Ertragsniveaus, wodurch sich die relative Ertragssteigerung durch die Applikation von Stickstoff verstärkte (vgl. 5.1.2, 5.2.2). Diese Entwicklung war jedoch zu erwarten, da sich zum einen der im Frühjahr erfasste N<sub>min</sub>-Gehalt verringerte (Tab. 5.11, Tab. 5.29) und zum anderen Hopfen aufgrund der perennierenden Eigenschaften (vgl. 2.1), im Gegensatz zu einjährigen Kulturpflanzen, zunächst wahrscheinlich ein bestimmtes Kompensationspotenzial aufweist. Im Hinblick auf die Festlegung einer ertragsoptimalen Höhe der N-Düngung resultiert daraus jedoch, dass mehrjährige statische Stickstoffsteigerungsversuche nötig sind.

Abschließende Aussagen zu einer ertragsoptimalen Höhe der N-Düngung sind aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsstandorten und -jahren sowie N-Steigerungsstufen nicht möglich. Es zeigte sich, dass Hopfensorten unterschiedlich auf eine Steigerung der N-Düngung reagieren und ein sortenspezifisch optimaler Habitus entscheidend für die Ertragsbildung ist, weshalb eine sortenindividuelle Betrachtung der Höhe der N-Düngung erforderlich ist. Den stärksten Einfluss auf die optimale Höhe der N-Düngung haben, wie auch bei anderen Kulturen, spezifische Standorteigenschaften, darunter der **Vorrat an mineralischem Stickstoff** im Boden, das **N-Nachlieferungspotenzial** sowie der durch die Witterung beeinflusste Wachstumsverlauf und damit die **N-Aufnahme des Pflanzenbestands**. Weiterhin konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass eine Steigerung der N-Düngung zwar nur bis zu einem bestimmten N-Düngeniveau zu einem Anstieg des Doldenertrags führt, eine darüber hinausgehende N-Menge jedoch von Bedeutung für die äußere Qualität der Dolden sein kann. Zukünftig könnten Sensorsysteme einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung der Höhe der N-Düngung leisten.

#### ***Auswirkungen des Zeitpunkts der N-Düngung auf den Doldenertrag:***

Im Rahmen des Versuchsansatzes 1 wurden die Effekte einzelner N-Gaben untersucht (vgl. 4.4.2.1). Bei der Sorte Herkules führte der Düngetermin Ende Mai (N3) in den beiden Anbaujahren 2018 und 2019 zu einer stärkeren Steigerung des Doldenertrags als die Ausbringung derselben N-Menge zum Zeitpunkt Ende April (N2) (Tab. 5.2). Erfolgte die Applikation des Stickstoffs hingegen erst Anfang Juli (N4), bildeten die Pflanzen im Vergleich zur Kontrolle N1 einen wesentlich geringeren Mehrertrag. Im Jahr 2019 (nach zweijähriger Versuchsdurchführung) zeigten sich, unabhängig von der untersuchten Sorte, deutlichere Ertragsunterschiede zwischen den Düngeterminen. Als Ursache für die Verstärkung der Differenzierung in 2019 kann bei beiden Sorten ein im Vergleich zu 2018 geringeres N-Versorgungsniveau der Pflanzen angeführt werden, wenn bis zur Ausbringung der N-Gabe Anfang Juli kein Stickstoff gedüngt wurde (vgl. 5.1.1). Das geringere N-Versorgungsniveau wird auch am niedrigeren Verlauf der Chlorophyllwerte ersichtlich (Abb. 5.6 bis Abb. 5.9). Bei der Sorte Tradition konnte im Anbaujahr 2018 keine Beeinflussung des Doldenertrags in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der N-Ausbringung festgestellt werden (Tab. 5.2). Im Versuchsjahr 2019 führte der Düngetermin Ende April (N2) zur stärksten Ertragssteigerung, wohingegen sich der gebildete Mehrertrag durch die Verschiebung des Ausbringzeitpunkts auf Ende Mai (N3) bzw. Anfang Juli (N4) verringerte. Neben dem Doldenertrag reduzierte sich im Jahr 2019 auch die Restpflanzenbiomasse

zunehmend, je später der Stickstoff ausgebracht wurde (Tab. 5.4). Da sich die Unterschiede in der Restpflanzenbiomasse auch im Anbaujahr 2018 zeigten (Tab. 5.4) und die Untersuchung der Biomassebildung im Wachstumsverlauf ein vergleichbares Ergebnis liefert (vgl. 0), muss die fehlende Reaktion des Doldenertrags im Anbaujahr 2018 auf weitere Einflussfaktoren zurückzuführen sein. Ursächlich dafür könnte die im Jahr 2018 stark ausgeprägte Trockenheit mit hohen Temperaturen sein (vgl. 4.3), wodurch die ab Ende Juli stattfindende Doldenausbildung (Abb. 4.4) limitiert war und somit zu einer Überlagerung von N-Düngeeffekten führte. Zukünftig sollte bei N-Düngeversuchen deshalb darauf geachtet werden, dass die Wasserversorgung, z.B. durch Bewässerung sichergestellt ist. Ein Vergleich der untersuchten Sorten zeigt auf, dass eine Verschiebung des Ausbringzeitpunkts einer einzelnen N-Gabe von Ende April (N2) auf Ende Mai (N3) bei Herkules zu einem Mehr-, bei Tradition jedoch zu einem Minderertrag führte. Ursächlich für diese Sortenunterschiede ist mit hoher Wahrscheinlichkeit, dass die Sorte Tradition aufgrund der früheren Reife (LfL, 2020b) im Vergleich zu Herkules eine kürzere Wachstumsperiode aufweist, wodurch die Kompensation einer N-Unterversorgung in frühen Phasen im weiteren Wachstumsverlauf nicht mehr möglich ist.

Wie bereits im Kapitel 6.1 diskutiert, beeinflusst der Zeitpunkt der N-Düngung das Seitentriebwachstum und damit auch den Habitus sowie die Biomassebildung der Pflanzen. Da ein Großteil des Doldenertrags jedoch an den Seitentrieben der Pflanzen gebildet wird, ist deren Entwicklung für die Ertragsbildung von entscheidender Bedeutung (Engelhard et al., 2011a; Kohlmann und Kastner, 1975; Zattler, 1965). Die eigenen Untersuchungen zum Ertragsaufbau einer Hopfenpflanze bestätigten dies (vgl. 5.2.10). An den Pflanzen der Sorte Tradition wurde eine zunehmende Verlagerung des Seitentriebwachstums in höher liegende Pflanzenabschnitte beobachtet, je später der Stickstoff appliziert wurde (vgl. 5.1.1). Daraus resultierte eine Verringerung der Gesamtseitentrieglänge, wodurch sich nicht nur die Biomasse, sondern auch die Ertragsbildung reduzierte. Für die Sorte Herkules trifft diese Aussage nur für den Vergleich der Düngezeitpunkte Ende Mai (N3) und Anfang Juli (N4) zu. Erfolgte die Ausbringung des Stickstoffs hingegen Ende April (N2), bildeten die Pflanzen zwar die Seitentriebe im unteren Rebenabschnitt aus, in höher liegenden Abschnitten war das Wachstum allerdings sichtbar eingeschränkt (vgl. 5.1.1). Da die oberen Seitentriebe einer Hopfenpflanze aber eine höhere Bedeutung für die Ertragsbildung haben (vgl. 5.2.10), erreichten bei der Sorte Herkules die Ende Mai gedüngten Pflanzen (N3) tendenziell höhere Doldenerträge als die Ende April (N2) gedüngten.

Weitere Erkenntnisse im Hinblick auf eine ertragsorientierte Optimierung des Zeitpunkts der N-Düngung konnten durch die Feldversuche des Versuchsansatzes 2 erlangt werden. Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die Konzentration des über Fertigation auszubringenden N-Anteils auf einen 6-wöchigen Zeitraum (F4, F6) im Vergleich zur Verteilung auf 10 (Perle) bzw. 11 Wochen (Herkules) (F3, F5) unabhängig von der Sorte zu einer Steigerung des Doldenertrags führte (Tab. 5.17). Dabei ist zu berücksichtigen, dass in den Feldversuchen am lehmigen Standort im Versuchsjahr 2017 keine Ertragsunterschiede ermittelt werden konnten, da aufgrund der erhöhten Nmin-Gehalte im Frühjahr (Tab. 5.29) ein übermäßiges N-Angebot vorlag. Ursächlich hierfür ist wahrscheinlich ein infolge der langjährig erfolgten organischen N-Düngung (vgl. 4.2) erhöhtes N-Nachlieferungspotenzial. Erfolgte eine Konzentration des Stickstoffs auf einen Zeitraum von 6 Wochen ab KW25 (F6) wurde ein höherer Anteil der N-Düngung während der Phase der Hauptbiomassebildung appliziert (vgl. 6.1). Da in diesem Zeitraum neben dem intensiven Wachstum der Seitentriebe des oberen Pflanzenabschnitts, welche eine hohe Ertragsrelevanz aufweisen (vgl. 5.2.10), auch die Ausbildung von Verzweigungen und Blütenansätzen erfolgt (Abb. 4.4), wurde deren Entwicklung durch die gezielten Stickstoffgaben wahrscheinlich gefördert und dadurch der Doldenertrag gesteigert. Eine späte Applikation von Stickstoff, während der Reifephase der Dolden, scheint auch deshalb nicht sinnvoll zu sein, da wie im Kapitel 6.1 diskutiert, ein wesentlicher Teil der in der Doldenmasse enthaltenen N-Menge aus Verlagerungsprozessen innerhalb der Pflanze stammen muss. Eine Ausnahme bei den Ergebnissen stellt die Sorte Herkules am sandigen Standort dar, wo im zweiten Versuchsjahr (2018) durch die Verteilung des Stickstoffs über einen Zeitraum von 10 Wochen (F5) im Vergleich zur 6-wöchigen Applikation (F6) höhere Doldenerträge erzielt wurden (Tab. 5.18). Dabei ist anzuführen, dass der Pflanzenbestand dort grundsätzlich sehr wüchsig war (vgl. 5.2.1). Zusätzlich wurde eine hohe N-Menge gedüngt (Tab. 4.7). Diese Faktoren könnten dazu geführt haben, dass die Verteilung des Stickstoffs über einen längeren Zeitraum (F5) ein übermäßiges Wachstum der Seitentriebe während der Hauptbiomassebildung verhinderte und deshalb im Vergleich zu F6 ein höherer Doldenertrag gebildet wurde. Nach Kohlmann und Kastner (1975) sowie Zattler (1965) kann eine Überversorgung der Hopfenpflanze mit Stickstoff zu langen Seitentrieben sowie stark ausgeprägtem vegetativem Wachstum mit hoher Biomassebildung führen, wodurch ein Lichtmangel im Pflanzenbestand entstehen kann. Zum anderen kann an den Seitentrieben eine verstärkte Streckung der Internodien eintreten, wodurch sich

der Blüten- bzw. Doldenansatz im Verhältnis zum starken vegetativen Wachstum verringert.

Neben der Beeinflussung des Doldenertrags durch die Länge des Ausbringzeitraums zeigen die Ergebnisse des Versuchsansatzes 2 weiterhin, dass auch durch eine Verschiebung des Beginns des 6-wöchigen Ausbringfensters Ertragseffekte zu erwarten sind (vgl. 5.2.2). Bei der Sorte Perle konnte am sandigen Standort in den Versuchsjahren 2018 und 2019 festgestellt werden, dass eine frühere N-Ausbringung ab KW23 (F6b) zu höheren Doldenerträgen führte als die Applikation ab KW25 (F6) (Tab. 5.18, Tab. 5.19). Am lehmigen Standort hingegen wurde im Jahr 2018 sowohl bei Perle als auch Herkules durch die Ausbringung ab KW25 (F6) ein höheres Ertragsniveau erreicht (Tab. 5.18). Dabei ist anzuführen, dass am sandigen Standort im Vergleich zum lehmigen eine fortgeschrittene Pflanzenentwicklung beobachtet wurde (vgl. 5.2.1), weshalb die N-Ausbringung ab KW25 (F6) dort wahrscheinlich zu spät war, um die Ertragsbildung positiv zu beeinflussen. Dass die N-Applikation bei knapper N-Versorgung auch zu spät erfolgen kann und sich der Doldenertrag dadurch reduziert, zeigte sich im Versuchsjahr 2019 bei Herkules am lehmigen Standort an den ab KW26 (F6d) gedüngten Pflanzen (Tab. 5.19). Bei der Einordnung der Ergebnisse des Versuchsansatzes 2 ist zu berücksichtigen, dass die absolute Höhe der N-Düngung je nach Versuchsstandort und Anbaujahr variierte (Tab. 4.7). Am lehmigeren Standort führte das niedrige N-Düngeniveau bereits ab dem zweiten Versuchsjahr 2018 zu einem stark limitierten N-Angebot. Somit ist der Einfluss des Zeitpunkts der N-Applikation über Fertigation auch vom grundsätzlichen N-Versorgungsniveau der Pflanze abhängig.

Übereinstimmend mit den Erkenntnissen des Versuchsansatzes 1 und 2 kann die Aussage abgeleitet werden, dass sich der Zeitpunkt der N-Applikation vor allem bei einem niedrigen N-Versorgungsniveau der Pflanze auf den Doldenertrag auswirkt und eine zu späte N-Applikation zu Ertragseinbußen führt. Weiterhin zeigte sich, dass der Einfluss des Zeitpunkts der N-Düngung auf den Doldenertrag sortenabhängig ist und Sorten mit früherer Reife ein geringeres Kompensationspotenzial aufweisen, weshalb diese sensibler auf eine zu späte N-Ausbringung reagieren. Auch Seiffert (1995) konnte an der frühreifen Sorte Tettlinger bereits zeigen, dass durch eine frühzeitige N-Düngung der Doldenertrag tendenziell gefördert wird. Um eine rechtzeitige N-Versorgung der Hopfenpflanze zu garantieren ist weiterhin zu berücksichtigen, dass auftretende Trockenperioden im Frühjahr vor allem auf schwereren Böden zu einer verzögerten Aufnahme des

gedüngten Stickstoffs führen können. Schließlich wirkte sich bei Düngesystemen mit Fertigation die Konzentration des Stickstoffs auf einen 6-wöchigen Zeitraum positiv aus, wobei im Hinblick auf einen ertragsoptimalen Beginn des 6-wöchigen Ausbringfensters die sorten- und standortspezifische Pflanzenentwicklung von Bedeutung ist. Hinsichtlich der Optimierung der N-Ernährung kann somit die Aussage getroffen werden, dass die N-Ausbringung auch bei Hopfen unter Berücksichtigung des Entwicklungsstadiums der Pflanze erfolgen sollte. Die Datenbasis dieser Arbeit reicht jedoch nicht aus, um konkrete Empfehlungen zu geben. Wichtig wäre in dieser Hinsicht zunächst auch die Etablierung der unter 4.4.5 genannten Einteilung der Entwicklungsstadien.

### ***Einfluss von Höhe und Zeitpunkt der N-Düngung auf den Alphasäuregehalt:***

Wie die Ergebnisse des Versuchsansatzes 1 zeigen, führte eine Steigerung der N-Düngung von 63 (N2) auf 126 (N5) und 190 (N6) kg N ha<sup>-1</sup> bei der Sorte Herkules im Versuchsjahr 2017 jeweils zu einer Reduktion des Alphasäuregehalts (Tab. 5.1). Hingegen reduzierte im Versuchsjahr 2019 eine Steigerung der N-Düngemenge von 60 (N2) auf 120 kg N ha<sup>-1</sup> (N5) den Gehalt an Alphasäure nicht, jedoch die weitere Erhöhung auf 180 kg N ha<sup>-1</sup> (N6). Im Versuchsjahr 2018 lagen die Alphasäuregehalte von Herkules auf einem für die Sorte niedrigen Niveau, weshalb wahrscheinlich keine Unterschiede in Abhängigkeit der Höhe und des Zeitpunkts der N-Düngung beobachtet werden konnten (Tab. 5.2). Dabei werden die Witterungsbedingungen mit hohen Temperaturen während des Zeitraums der Alphasäuresynthese als Ursache angesehen, denn wie im Kapitel 2.3.3 auf Basis der Untersuchungen verschiedener Autoren erläutert, führen vor allem hohe Temperaturen und fehlende Niederschläge, wie im August 2018 vorherrschend (Tab. 4.5), zu einer Limitierung der Inhaltsstoffsynthese. Erfolgte im Jahr 2017 eine Verschiebung des Ausbringzeitpunkts einer einzelnen N-Gabe in Höhe von 1/3 der gesamt auszubringenden N-Menge von Ende April (N2) auf Ende Mai (N3) reduzierte sich der Alphasäuregehalt signifikant (Tab. 5.1). Hingegen wirkte sich im Jahr 2019 der Ausbringzeitpunkt Ende Mai (N3) im Vergleich zur Applikation Ende April (N2) nicht negativ aus, jedoch die Verschiebung der N-Gabe auf Anfang Juli (N4) (Tab. 5.2). Am Standort des Jahres 2017 ist jedoch aufgrund der erhöhten Nmin-Gehalte von einem höheren N-Versorgungsniveau auszugehen (Tab. 5.11).

Weitere Erkenntnisse im Hinblick auf den Einfluss des Zeitpunkts der N-Düngung auf den Alphasäuregehalt wurden im Rahmen des Versuchsansatzes 2 erlangt. Erfolgte die Applikation des über Fertigation auszubringenden N-Anteils über einen 6-wöchigen

Zeitraum von KW25 bis KW30 (F4, F6) im Vergleich zur Verteilung derselben N-Menge auf 11 Wochen von KW25 bis KW35 (F3, F5), führte dies bei der Sorte Herkules im Versuchsjahr 2017 an beiden Standorten zu höheren Alphasäuregehalten, wohingegen im Jahr 2018 keine eindeutigen Effekte nachweisbar waren (Tab. 5.17, Tab. 5.18). Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Höhe der N-Düngung am lehmigen Standort im Versuchsjahr 2017 nur bei 100 kg N ha<sup>-1</sup> lag (Tab. 4.7), im Frühjahr jedoch ein Nmin-Gehalt von 149 kg N ha<sup>-1</sup> gemessen wurde (Tab. 5.29). Somit ist der Einfluss auch vom Bodenvorrat an mineralischem Stickstoff sowie dem standortspezifischen N-Nachlieferungspotenzial abhängig. Durch eine Verschiebung des 6-wöchigen Ausbringfensters von KW25 (F6) auf KW23 (F6b) erhöhte sich der Alphasäuregehalt der Sorte Herkules in den Jahren 2018 und 2019 am lehmigen, nicht, jedoch am sandigen Standort. An den Aromasorten Perle und Tradition konnten im dreijährigen Versuchszeitraum keine eindeutigen Effekte eines in Zeit und Höhe variierten N-Angebots auf den Alphasäuregehalt nachgewiesen werden (vgl. 5.1.2, 5.2.2).

Auch in früheren Untersuchungen von Zattler (1949), Zattler et al. (1960), Zattler und Jehl (1951), beschrieben in Zattler (1965), sowie von Kohlmann und Kastner (1975) wurde bereits ein negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der N-Düngung und dem Bitterstoffgehalt festgestellt. Des Weiteren bestätigen aktuelle Ergebnisse von Iskra et al. (2019) die Erkenntnisse der eigenen Untersuchungen vor allem dahingehend, dass sowohl hohe N-Düngemengen als auch eine späte N-Applikation zu einer Reduktion des Alphasäuregehalts führen können. Zusammenfassend ist somit anzuführen, dass die Höhe des N-Versorgungsniveaus ab Anfang August, während des Zeitraums der Alphasäuresynthese, neben den im Kapitel 2.3.3 genannten Aspekten einen weiteren Einflussfaktor für die Alphasäurebildung darstellt. Dabei ist weiterhin zu berücksichtigen, dass auch der Bodenvorrat an mineralischem Stickstoff sowie das standortspezifische N-Nachlieferungspotenzial zur N-Versorgung der Pflanze beitragen. Da an den Aromasorten Perle und Tradition der Einfluss der N-Versorgung auf den Alphasäuregehalt bisher nicht nachgewiesen wurde, kann zudem abgeleitet werden, dass die Reaktion sortenspezifisch ist, zu welchem Schluss auch bereits Keller und Magee (1954) kamen.

Ein negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der N-Versorgung und der Synthese von sekundären Inhaltsstoffen wurde auch bei anderen Pflanzenarten nachgewiesen (Heimler et al., 2017), darunter Weintrauben (*Vitis vinifera* L.), Kulturapfel (*Malus domestica*) und Zuckerahorn (*Acer saccharum*). An Basilikum (*Ocimum basilicum* L.) zeigten

Nguyen und Niemeyer (2008) eine Verringerung des Gesamtgehalts phenolischer Verbindungen bei steigender N-Versorgung auf. Der Effekt einer Reduktion sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe unter Bedingungen eines erhöhten N-Versorgungsniveaus wird von verschiedenen Autoren auf Basis der Kohlenstoff-Stickstoff-Bilanz Hypothese (Bryant et al., 1983) begründet. Nach dieser Hypothese nimmt der Gehalt an sekundären Inhaltsstoffen auf Kohlenstoffbasis mit zunehmender N-Versorgung ab (Heimler et al., 2017; Nguyen und Niemeyer, 2008). Neben sekundären Pflanzeninhaltsstoffen kann das N-Versorgungsniveau auch den Gehalt primärer Inhaltsstoffe beeinflussen. Hao et al. (2004) sowie Rathke et al. (2005) zeigten an Raps (*Brassica napus L.*), dass eine Steigerung der N-Düngung zu einer Erhöhung des Proteingehalts und Verringerung des Ölgehalts der Körner führt, wobei ein linearer Zusammenhang bestand. Rathke et al. (2005) begründen diesen Effekte mit einer Konkurrenz um Kohlenstoff-Gerüste (C-Gerüste) zwischen der Fettsäure- und Aminosäure-Synthese, da unter einem erhöhten N-Versorgungsniveau aufgrund des geringeren C-Gehalts der Aminosäuren die Synthese dieser intensiviert wird. Aus pflanzenphysiologischer Sicht besteht unter Bedingungen einer hohen N-Versorgung im Rahmen der Assimilation von Stickstoff im GS GOGAT-Zyklus grundsätzlich ein zusätzlicher Bedarf an C-Gerüsten (Hawkesford et al., 2012). Daraus kann eine geringere Verfügbarkeit von C-Gerüsten zur Bildung weiterer Inhaltsstoffe resultieren.

Auf Basis der erläuterten Zusammenhänge kann folgender Erklärungsansatz für die Reduktion des Alphasäuregehalts von Hopfen unter Bedingungen einer hohen N-Versorgung abgeleitet werden: Die Gruppe der Alphasäuren stellen Derivate des Phloroglucins dar (Biendl et al., 2012), für deren Synthese ebenfalls C-Gerüste benötigt werden. Während der Synthese der Alphasäuren besteht somit die Möglichkeit, dass aufgrund eines erhöhten Bedarfs an C-Gerüsten für die N-Assimilation nicht ausreichend Kohlenstoffverbindungen zur Verfügung stehen, wodurch eine Limitierung der Alphasäuresynthese stattfindet und damit eine Verringerung des Alphasäuregehalts eintritt. Ein weiterer Erklärungsansatz kann auf der Grundlage abgeleitet werden, dass die essenziellen Aminosäuren Leucin, Isoleucin und Valin Bausteine für die Synthese der Hauptbestandteile n-, Co- und Ad-Humulon der Alphasäuren des Hopfens liefern (vgl. 2.2). Nach Wiesler (2012) kann eine erhöhte N-Versorgung einer Pflanze zu einer Veränderung der Aminosäuren-Zusammensetzung und Verringerung des Gehalts essenzieller Aminosäuren führen. Als Beispiele werden dabei Getreide (Bulman et al., 1994) und Gemüse (Brunsgaard et al., 1997) genannt. Unter den Bedingungen einer erhöhten N-Versorgung des Hopfens

könnte somit auch eine Reduktion des Gehalts der essenziellen Aminosäuren Leucin, Isoleucin und Valin zur Verringerung der Synthese von Alphasäuren geführt haben.

Auf Basis der erlangten Erkenntnisse kann die Aussage abgeleitet werden, dass ein hohes N-Versorgungsniveau ab Anfang August, während der Phase der Alphasäuresynthese, zu einer Reduktion des Alphasäuregehalts führen kann, wobei der Einfluss sortenspezifisch ist. Wahrscheinlich sind davon vor allem Sorten mit einem höheren Alphasäuregehalt, wie zum Beispiel Herkules, betroffen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein hohes N-Versorgungsniveau 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.

**Einfluss von *Höhe und Zeitpunkt* der N-Düngung auf den *Stickstoffentzug*, die *apparente Stickstoffausnutzung* und *Stickstoffeffizienz*:**

Eine Steigerung der N-Düngung führt, wie sich im Rahmen der Düngeversuche unabhängig von der Sorte zeigte, zu einer höheren N-Aufnahme der Hopfenpflanze und damit zu einer Erhöhung des N-Entzugs. Die prozentuale Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs variierte dabei vor allem in Abhängigkeit des Standortes. Über mehrere Jahre nicht mit Stickstoff gedüngte Hopfenpflanzen zeigten eine zunehmende Einschränkung der Biomassebildung und Reduktion des N-Entzugs (vgl. 5.1.3, 5.1.5, 5.2.3, 5.2.5). Aufgrund dieser Verringerung des N-Entzugs änderte sich auch die Bezugsbasis für die Berechnung der apparenten N-Ausnutzung und N-Effizienz jährlich, weshalb ein Vergleich der Parameter unterschiedlicher Versuchsjahre nicht korrekt ist und zu Fehleinschätzungen führen würde.

Die Geschwindigkeit der Reduktion des N-Entzugs nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen unterschied sich jedoch in Abhängigkeit des Versuchsstandortes. Einjährig nicht gedüngte Pflanzen entzogen im Feldversuch V1\_PE\_17 nur um  $24 \text{ kg ha}^{-1}$  weniger Stickstoff als die mit  $170 \text{ kg N ha}^{-1}$  gedüngten, woraus eine apparente N-Ausnutzung von 14 % resultierte (Tab. 5.7, Tab. 5.9). Die zusätzlich aufgenommene N-Menge führte zwar zu höheren N-Gehalten in der Biomasse, jedoch erhöhte dies weder die Dolden- noch die Restpflanzenbiomasse (Tab. 5.5, Tab. 5.3). Ursächlich hierfür ist, wie bereits im Verlauf dieses Kapitels thematisiert, ein erhöhtes N-Nachlieferungspotenzial am Standort und dadurch nicht limitiertes N-Angebot. Für diese These sprechen die erhöhten N<sub>min</sub>-Gehalte im Herbst nach der Ernte sowie das Niveau der N<sub>t</sub>-Gehalte (Tab. 5.11, Tab. 4.3).

Im Gegensatz dazu reagierten nicht gedüngte Pflanzen in den Versuchen V1\_HS\_18 und V1\_HT\_18 bereits im ersten Jahr mit einer deutlichen Reduktion des N-Entzugs (Tab. 5.8). Die mit 180 (HS) bzw. 150 kg N ha<sup>-1</sup> (HT) gedüngten Varianten erreichten deshalb eine höhere apparente N-Ausnutzung sowie Ertragsbildung je Kilogramm Dünger-N (Tab. 5.9). Ein Vergleich der gemessenen Nmin-Gehalte zeigt, dass diese nicht nur im Frühjahr, sondern auch im Herbst nach der Ernte auf einem niedrigeren Niveau lagen (Tab. 5.11). Einen weiteren Beleg für den Einfluss des Standortes liefern die Ergebnisse der Feldversuche V2\_L\_HS\_17 und V2\_S\_HS\_17. Während einjährig nicht gedüngte Pflanzen am lehmigen Standort noch einen N-Entzug von 211 kg N ha<sup>-1</sup> erreichten, reduzierte sich der Entzug am sandigen Standort bereits auf 144 kg N ha<sup>-1</sup> (Tab. 5.26). Als Ursache hierfür kann ein höherer Vorrat an mineralisiertem Stickstoff im Boden des lehmigen Standortes angesehen werden, worauf die erhöhten Nmin-Gehalte im Frühjahr 2017 hinweisen (Tab. 5.29). In den darauffolgenden Versuchsjahren 2018 und 2019 verringerte sich der N-Entzug der zwei- bzw. dreijährig nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen an beiden Standorten zunehmend, wobei sich die Höhe des N-Entzugs zwischen den Standorten nicht mehr unterschied (Tab. 5.27, Tab. 5.28).

Im Hinblick auf den Einfluss der Höhe der N-Düngung zeigte sich im Rahmen des Versuchsansatzes 1 an der Sorte Herkules in den Jahren 2018 und 2019, dass sich durch eine Steigerung der N-Düngemenge von 0 auf 60 bzw. 120 kg N ha<sup>-1</sup> jeweils der N-Gehalt sowie die absolute Biomassebildung erhöhten (Tab. 5.4, Tab. 5.6). Wurden hingegen 180 kg N ha<sup>-1</sup> gedüngt, stieg der N-Entzug zwar weiter an, die zusätzlich aufgenommene N-Menge bewirkte jedoch keine Steigerung der Biomasse- und Ertragsbildung mehr (Tab. 5.8). Weiterhin zeigte sich, dass sich die Ertragsbildung je Kilogramm Dünger-N (N-Effizienz) mit steigender Höhe der N-Düngung zunehmend verringerte und die apparente N-Ausnutzung bei Ausbringung von 120 kg N ha<sup>-1</sup> tendenziell am höchsten lag (Tab. 5.10). Im Gegensatz dazu führte eine Steigerung der N-Düngung von 100 auf 150 kg N ha<sup>-1</sup> am Standort der Sorte Tradition in beiden Jahren neben einer Steigerung des N-Entzugs auch zu einer Verbesserung der apparenten N-Ausnutzung und Ertragsbildung je Kilogramm Dünger-N (Tab. 5.8, Tab. 5.10). An beiden Standorten ist aufgrund der deutlichen Reaktion nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen sowie dem Niveau der Nmin-Gehalte (Tab. 5.11) davon auszugehen, dass ein knappes N-Angebot vorlag. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass sich unter Bedingungen eines limitierten N-Angebots durch eine Steigerung der N-Düngung bis zu einem bestimmten Düngenniveau infolge einer

höheren N-Aufnahme auch die Biomassebildung erhöht, wohingegen eine weitere Steigerung nur noch einen Anstieg des N-Gehalts bewirkt.

Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses des Zeitpunkts der N-Düngung wurden sowohl im Rahmen der ersten, als auch der zweiten Versuchsserie erlangt. Dabei zeigte sich, dass die Ausbringung eines höheren Anteils der N-Düngung während der Hauptbiomassebildung auch zu höheren N-Aufnahmen führt, weshalb der sortenspezifische Entwicklungsverlauf und somit das Entwicklungsstadium der Pflanze von Bedeutung ist.

Erfolgte bei Düngesystemen mit Fertigation eine Konzentration des Stickstoffs auf einen 6-wöchigen Zeitraum ab KW25 (F6), führte dies im Versuchsjahr 2018 am lehmigen Standort im Vergleich zur Verteilung derselben N-Menge über 11 Wochen (F5) zu einer Steigerung der Ausnutzung und Effizienz des eingesetzten Stickstoffs (Tab. 5.31). Des Weiteren erhöhten sich durch eine Verschiebung des 6-wöchigen Ausbringfensters von KW23 (F6b) auf KW25 (F6) im Anbaujahr 2018 am lehmigen Standort sowohl bei Perle als auch bei Herkules die apparente N-Ausnutzung sowie die N-Effizienz. Diese Effekte zeigen, dass sich die Ausbringung eines höheren Anteils der gesamten N-Menge während der Hauptbiomassebildung positiv auf die apparente N-Ausnutzung und N-Effizienz auswirken. Im Gegensatz zu 2018 wurden im Anbaujahr 2017 keine Effekte durch den Zeitpunkt der N-Düngung erfasst (Tab. 5.30). Da im Frühjahr zugleich hohe N<sub>min</sub>-Gehalte gemessen wurden (Tab. 5.29), kann die Aussage dahingehend erweitert werden, dass der Einfluss des Zeitpunkts der N-Düngung auch vom N-Niveau abhängig ist. Im Rahmen des ersten Versuchsansatzes zeigte sich an der Sorte Herkules, dass eine N-Düngung in Höhe von 63 kg N ha<sup>-1</sup> (2017) bzw. 60 kg N ha<sup>-1</sup> (2018, 2019), ausgebracht zum Zeitpunkt Ende Mai (N3), im Vergleich zu den Applikationszeitpunkten Ende April (N2) bzw. Anfang Juli (N4) zur höchsten apparenten N-Ausnutzung und N-Effizienz führt (Tab. 5.9, Tab. 5.10). Hingegen reagierte die Sorte Tradition (2018, 2019) auf die Verschiebung des Ausbringzeitpunkts von 50 kg N ha<sup>-1</sup> von Ende April (N2) auf Ende Mai (N3) bzw. Anfang Juli (N4) mit einer verringerten apparenten N-Ausnutzung und N-Effizienz (Tab. 5.10). Diese Ergebnisse bestätigen zum einen, dass der Einfluss des Zeitpunkts der N-Düngung bei einem niedrigen N-Versorgungsniveau zu beobachten ist, zum anderen wird dadurch aber auch deutlich, dass der sortenspezifische Entwicklungsverlauf von Bedeutung ist.

Hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Sorten ist weiterhin anzuführen, dass bei Herkules 55 bis 60 % der gesamt entzogenen N-Menge in den Dolden enthalten waren,

während der Anteil bei den Aromasorten Perle und Tradition nur 35 bis 45 % betrug (vgl. 5.1.5). Diese Beobachtung wird durch die Ergebnisse der  $^{15}\text{N}$ -Tracer-Technik bestätigt (Abb. 5.24). Daraus resultiert, dass im Falle einer Rückführung des Rebenhäcksels (Restpflanze) im Herbst nach der Ernte die Sorte Herkules eine niedrigere N-Bilanz erreicht. Ein Vergleich der absoluten N-Entzüge zeigt auf, dass Herkules im Vergleich zu den Aromasorten Perle oder Tradition bei nicht limitierter N-Düngung eine höhere N-Menge entziehen kann. Während die Sorte Perle über die oberirdisch gebildete Biomasse maximal  $203 \text{ kg N ha}^{-1}$  entzog (Tab. 5.42), erreichte die Sorte Herkules bis zu  $273 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Tab. 5.27). Neben einem höheren N-Entzug erzielte Herkules im Vergleich zu den Aromasorten eine höhere Ertragsbildung je ausgebrachtem Kilogramm Stickstoff (N-Effizienz) (vgl. 0, 5.2.6). Wie die Ergebnisse der eingesetzten  $^{15}\text{N}$ -Tracer-Technik zeigen, lag die  $^{15}\text{N}$ -Recovery und damit die apparente N-Ausnutzung einer einzelnen über Fertigation applizierten N-Gabe, gemessen in der gesamten oberirdischen Biomasse, sowohl bei Perle, als auch Herkules bei 65 bis 67 % (Abb. 5.24).

### **Einfluss von Höhe und Zeitpunkt der N-Düngung auf die Stickstoffeinlagerung und den Wiederaustrieb:**

Der Wiederaustrieb einer Hopfenpflanze erfolgt über durch Reservestoffe ernährte Knospen (Kohlmann und Kastner, 1975). Dabei beschreibt Eckel (1993) Kohlenhydrate als mengenmäßig wichtigste Gruppe. Nach Schäufele (1966), Seiffert (1995), und Zattler (1936, 1956b, 1956a) werden in den Speicherwurzeln von Hopfen jedoch auch N-Reserven angelegt, wovon den Pflanzen ein Teil für den Wiederaustrieb zur Verfügung steht. Die Bedeutung von N-Reserven für den Wiederaustrieb einer Pflanze wurde von unterschiedlichen Autoren bei verschiedenen Pflanzenarten aufgezeigt. Darunter Thornton et al. (1993) bei deutschem Weidelgras (*Lolium perenne* L.), Millard und Neilson (1989) bei Kulturapfel (*Malus domestica* Borkh.) sowie Wiesler et al. (1997) bei Chinaschilf (*Miscanthus sinensis*). Weiterhin ermittelten Mackie-Dawson et al. (1994) an Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.), dass die N-Versorgung des Vorjahres neben der Einlagerung von N-Reserven, auch die Menge an mobilisiertem Stickstoff im Folgejahr und dadurch die Wachstumsrate zu Vegetationsbeginn beeinflusst. Für Hopfen wurde hingegen bisher nicht untersucht, inwieweit ein in Zeit und Höhe variiertes N-Angebot die N-Einlagerung der Pflanze beeinflusst. In ausgewählten Feldversuchen erfolgte deshalb eine Untersuchung der Speicherwurzeln sowie der Triebe des Wiederaustriebs (vgl. 4.5.5).

Dabei konnte im Rahmen des Versuchsansatzes 1 an der Sorte Herkules gezeigt werden, dass eine Reduktion der N-Düngung von 180 (N6) auf 120 (N5) kg N ha<sup>-1</sup> (2018, 2019) im darauffolgenden Frühjahr (2019, 2020) jeweils zu einer signifikanten Verringerung des N-Gehalts in den Speicherwurzeln auf das Niveau nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (N1) führte (Tab. 5.12). Somit kann unter der Annahme, dass sich die Biomasse der Speicherwurzeln nicht veränderte, die Aussage getroffen werden, dass durch die Reduktion der N-Düngung eine Verringerung der N-Einlagerung stattfand. Weiterhin reduzierte sich auch der N-Gehalt der analysierten Triebe des Wiederaustriebs (Tab. 5.12). Zudem wurde an den Pflanzen der Varianten N1 bis N5 mit verringerten N-Gehalten in den Trieben, während der Phase des Austriebs eine geringere Triebanzahl, Vitalität sowie hellere Grünfärbung der Blätter beobachtet (vgl. 5.1.1). Eine vergleichbare Beobachtung wurde im Frühjahr 2019 im Rahmen des Versuchsansatzes 2 an beiden Sorten des lehmigen Standortes gemacht, wo sich im weiteren Wachstumsverlauf auch eine eingeschränkte Pflanzenentwicklung zeigte (vgl. 5.2.1). Dabei ergab die Untersuchung der Triebe des Wiederaustriebs, dass die N-Gehalte beider Sorten des lehmigen Standortes deutlich unter dem Niveau des sandigeren Standortes lagen (Tab. 5.34). Aufgrund der erlangten Erkenntnisse kann die Aussage abgeleitet werden, dass der Hopfenpflanze ein Teil des in den Speicherwurzeln enthaltenen Stickstoffs für den Wiederaustrieb zur Verfügung steht und über die N-Einlagerung ein Zusammenhang zwischen der Höhe der N-Düngung des Vorjahres sowie dem Wiederaustrieb im darauffolgenden Anbaujahr besteht. Auch die Ergebnisse der eingesetzten <sup>15</sup>N-Tracer-Technik bestätigen aufgrund signifikant erhöhter Delta <sup>15</sup>N-Gehalte in den Speicherwurzeln, dass ein Teil des im Vorjahr gedüngten Stickstoffs in diese Wurzeln eingelagert wird (Abb. 5.25). Die reduzierten N-Gehalte in der Restpflanze bzw. den Dolden zum Zeitpunkt der Ernte lieferten sowohl in Versuchsserie 1, als auch 2 bereits einen Hinweis auf eine verringerte N-Einlagerung in die Speicherwurzeln (Tab. 5.6, Tab. 5.24).

Weitere Erkenntnisse wurden im Hinblick auf den Einfluss des Zeitpunkts der N-Düngung auf die N-Einlagerung erlangt. Wie die Ergebnisse der N-Gehalte der Speicherwurzeln im Frühjahr 2020 zeigen (Tab. 5.35), beeinflusste bei gleicher Höhe der N-Düngung eine Verschiebung des Ausbringfensters um zwei Wochen von KW23 (F6b) auf KW25 (F6) die N-Einlagerung nicht. Weiterhin wiesen vorzeitig geerntete Pflanzen im Vergleich zu den zum regulären, auf Basis der Reife der jeweiligen Sorte festgelegten Erntetermin geernteten, keine verringerten N-Gehalte in den Speicherwurzeln auf (Tab. 5.35). Daraus könnte abgeleitet werden, dass im Zeitraum kurz vor der Ernte keine wesentlichen N-

Mengen mehr in die Speicherwurzeln eingelagert werden. Jedoch weist das niedrige Niveau der Nmin-Gehalte im Herbst nach der Ernte (Tab. 5.29) auf ein limitiertes N-Angebot hin, weshalb diese Frage auf Basis der vorliegenden Daten nicht endgültig beantwortet werden kann. Da jedoch bekannt ist, dass bei einer zu frühen Ernte der Hopfenpflanze nicht ausreichend Reservestoffe in die Speicherwurzeln eingelagert werden (Lutz et al., 2009; Zattler, 1965), ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass im Zeitraum kurz vor der Ernte auch eine weitere Einlagerung von Stickstoff erfolgt. Dabei kann eine starke Reduktion des Chlorophyllwertes im Zeitraum vor der Ernte, während der Reifephase bereits auf eine zu geringe N-Versorgung und dadurch verringerte N-Einlagerung, verursacht durch eine nicht ausreichende Höhe der N-Düngung, hinweisen (Abb. 5.17, Abb. 5.18).

Auf Basis der Erkenntnisse kann die Aussage getroffen werden, dass Hopfen wie von Schäufele (1966), Seiffert (1995) und Zattler (1936, 1956b, 1956a) angeführt, Stickstoffreserven in den Speicherwurzeln anlegt, wovon den Pflanzen ein Teil für den Wiederaustritt zur Verfügung steht. Dabei beeinflusst die Höhe der N-Düngung in einem Anbaujahr die N-Einlagerung und damit den Wiederaustritt der Pflanzen im Folgejahr. Folglich spiegelt auch die im Rahmen der  $^{15}\text{N}$ -Tracer-Technik ermittelte  $^{15}\text{N}$ -Recovery in Höhe von 65 bis 67 % (Abb. 5.24) nicht die tatsächliche Ausnutzung des ausgebrachten Stickstoffs wider. Somit kann eine ausschließlich auf Basis des in der oberirdischen Biomasse enthaltenen Stickstoffs erfolgte Beurteilung der N-Düngung zu Fehleinschätzungen führen. Daraus resultiert weiterhin, dass vor allem bei einjährig nicht mit Stickstoff gedüngten Pflanzen eine Verringerung der N-Einlagerung nicht oder niedrig mit Stickstoff gedüngter Pflanzen zu einer Überbewertung der tatsächlich aus dem Boden aufgenommenen N-Menge führt. Letztendlich kann die Aussage abgeleitet werden, dass im Hinblick auf eine bedarfsgerechte Stickstoffernährung der Hopfenpflanze auch die Notwendigkeit besteht die Speicherwurzeln ausreichend mit Stickstoff zu ernähren. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass eine Hopfenpflanze in den ersten Jahren nach der Neuanpflanzung bis zur vollständigen Ausbildung des Wurzelstocks mit hoher Wahrscheinlichkeit einen erhöhten Bedarf an Stickstoff aufweist. Erfolgt hingegen eine Mangelernährung der Pflanze mit Stickstoff, besteht die Gefahr, dass sich der Ertrag und die Qualität aufgrund der geringeren Vitalität langfristig verringern.

## 6.4 Bewertung von N-Düngesystemen mit Fertigation

Um die Frage zu analysieren, ob durch N-Düngesysteme mit Fertigation im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Applikation eine optimierte und bedarfsgerechtere Stickstoffernährung der Hopfenpflanze möglich ist, erfolgte in den Kapiteln 5.2 und 5.3 eine detaillierte Gegenüberstellung der Systeme. Auf Basis der dargestellten Ergebnisse kann die Aussage getroffen werden, dass durch die Nutzung von Düngesystemen mit Fertigation sowohl agronomisch bedeutende Parameter wie der Doldenertrag oder Alphasäuregehalt, als auch umweltökologisch relevante Faktoren wie der Stickstoffentzug und die apparente Stickstoffausnutzung gezielt optimiert werden können und somit eine bedarfsgerechte Stickstoffernährung der Hopfenpflanze ermöglicht wird (vgl. 5.2, 5.3). Dabei zeigte sich im dreijährigen Versuchszeitraum von 2017 bis 2019, dass die Ausbringung eines Anteils der gesamten N-Düngung über das Bewässerungswasser vor allem unter Bedingungen eines limitierten N-Angebots zu einer höheren Effektivität führt, wobei der im Kapitel 6.3 diskutierte Zusammenhang zum Zeitpunkt der N-Applikation zu berücksichtigen ist. Weiterhin wurde beobachtet, dass die Nutzung von Düngesystemen mit Fertigation im Vergleich zu einer ausschließlich granulierten N-Düngung ohne Bewässerung zu einer Verringerung des Niveaus der Nmin-Gehalte im Boden führt, wodurch letztendlich das Risiko einer Nitrat-Auswaschung ins Grundwasser reduziert wird (Abb. 5.26).

Nachfolgend wird an unterschiedlichen Beispielen aufgezeigt, **welche Vorteile** sich durch die Nutzung von Düngesystemen mit Fertigation ergeben und diskutiert **welche Erklärungsansätze** zugrunde liegen könnten. Im Rahmen der untersuchten Systeme wurde in einem definierten Zeitraum einmal wöchentlich eine bestimmte Menge an Stickstoff direkt in die durch die Tropfbewässerung durchfeuchteten Zonen des intensiv durchwurzelten Damms appliziert (vgl. 4.4.2.2). Somit stand der Pflanze, wie bereits in Kapitel 6.3 thematisiert, vor allem bei einem 6-wöchigen Ausbringfenster im Zeitraum der Hauptbiomassebildung wahrscheinlich ein hoher Anteil der gesamten N-Menge unmittelbar zur Verfügung, wodurch Wachstum und Entwicklung der Seitentriebe gefördert werden konnten. Dabei bestätigen die im Rahmen der  $^{15}\text{N}$ -Tracer-Technik ermittelten Ergebnisse, dass über das Bewässerungswasser ausgebrachter Stickstoff von den Hopfenpflanzen mit einer hohen Geschwindigkeit aufgenommen wird, da bereits 24 Stunden nach der Applikation in allen untersuchten oberirdischen Pflanzenteilen signifikant erhöhte Delta  $^{15}\text{N}$ -Gehalte erfasst wurden (Abb. 5.22 b). Auch Neilsen et al. (1998) beschreiben, dass durch die direkte Nährstoffapplikation in die aktive Wurzelzone verbesserte

Wachstumsbedingungen geschaffen werden und zugleich die Effizienz des eingesetzten Düngemittels optimiert wird. Weiterhin wird in der Literatur angeführt, dass durch die gezielte und regelmäßige Nährstoffausbringung eine Reduktion des Gesamtbedarfs und der Auswaschungsverluste von Nährstoffen (Ayars et al., 1999) sowie eine Verbesserung von Ertrag und Qualität (Alva et al., 2008) möglich ist. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zeigen, dass durch Düngesysteme mit Fertigation, im Vergleich zu einer Bewirtschaftung mit ausschließlich granulierter N-Ausbringung und ohne zusätzliche Bewässerung, aufgrund höherer N-Entzüge das Niveau der Nmin-Gehalte im Boden gesenkt werden kann (Tab. 5.42, Abb. 5.26). Daraus resultiert ein reduziertes Risiko für eine Verlagerung von Nitrat ins Grundwasser. Positive Effekte durch die Nutzung von Düngesystemen mit Fertigation wurden auch von Delahunty und Johnston (2014) an Hopfen, Asokaraja (2016) an verschiedenen ein- und mehrjährigen Kulturen, Boman (1995) an Grapefruit-Bäumen und Ng Kee Kwong et al. (1999) an Zuckerrohr aufgezeigt (vgl. 2.3.3).

Erfolgte die Applikation des Stickstoffs hingegen ausschließlich in granulierter Form, wurde zu den Zeitpunkten Ende April, Ende Mai und Anfang Juli jeweils ein Drittel der gesamten N-Menge ausgebracht (vgl. 4.4.2.2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ablage der Düngerkörner technisch bedingt auf einem etwa ein Meter breiten Band stattfand, wodurch der Stickstoff auf eine größere Fläche verteilt wurde (vgl. 4.4.2.1). Dem gegenüber steht, dass Tropfbewässerungssysteme aufgrund der Anordnung der Emitter nur Teilbereiche der gedüngten Fläche durchfeuchten (vgl. 4.4.4, Abb. 2.4). Somit muss trotz der Zusatzbewässerung davon ausgegangen werden, dass sich die unregelmäßige Niederschlagsverteilung (Tab. 4.5) auf den Zeitpunkt und den Anteil der Pflanzenverfügbarkeit des ausgebrachten Stickstoffs auswirkte. 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 (vgl. 6.1) zur Verfügung stand. Einen weiteren Einflussfaktor auf die Pflanzenverfügbarkeit des ausgebrachten Stickstoffs stellt die von Graf (2016) ermittelte, in Abhängigkeit des Standortes und der Sorte stark unterschiedliche Morphologie des Wurzelsystems dar. Des Weiteren konzentrierten sich die Wasser- und Stickstoffaufnahme der Hopfenpflanze vor allem in Trockenphasen bei hohen Transpirationsraten, aufgrund der Platzierung des Bewässerungswassers im intensiv durchwurzelteten und aufgeschütteten Damm (Tab. 5.44), vermutlich auf die durchfeuchteten Zonen. Einen Beleg für diese Theorie liefern die im Rahmen des Versuchsansatzes 3 ermittelten Ergebnisse. Dabei zeigte sich im Verlauf der drei

Versuchsjahre, dass eine zusätzliche ober- oder unterirdische Bewässerung mehrjährig nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen zu einer schnelleren Reduktion des Doldenertrags und N-Entzugs führte (Tab. 5.39, Tab. 5.42). Als Ursache für diesen Effekt wird angesehen, dass die Wasser- und Stickstoffaufnahme nicht bewässerter Pflanzen aus einem größeren Bodenvolumen erfolgte. Somit ist davon auszugehen, dass ausschließlich in granulierter Form gedüngten Pflanzen, aufgrund der räumlichen Trennung von Wasser und Stickstoff, zeitweilen nur ein Anteil der gesamten applizierten N-Menge zur Verfügung stand. Daraus resultiert eine inhomogene und bei niedrigem N-Angebot unzureichende Stickstoffversorgung, vor allem während der Phase der Hauptbiomassebildung, wohingegen bei Düngesystemen mit Fertigation die Möglichkeit zur gleichzeitigen Aufnahme von Wasser und Stickstoff gegeben war. Der erläuterte Erklärungsansatz wird durch die Beobachtung gestützt, dass ausschließlich in granulierter Form gedüngte Pflanzenbestände unabhängig von der Sorte oder dem Standort durch eine ungleichmäßigere Grünfärbung und Biomasseentwicklung eine deutlich höhere Einzelpflanzenvariabilität aufwiesen (vgl. 5.2.1). Einen weiteren Beweis für diese These liefern die im Rahmen des Feldversuchs V2\_L\_PE in den Versuchsjahren 2018 und 2019 ermittelten Ergebnisse. Im Vergleich zur 6-wöchigen N-Applikation ab KW25 über Fertigation zeigte sich bei ausschließlicher N-Ausbringung in granulierter Form, dass neben einer Reduktion des Doldenertrags und der Restpflanzenbiomasse vor allem eine Verringerung des N-Entzugs und somit der apparenten N-Ausnutzung eintrat (Tab. 5.21, Tab. 5.27, Tab. 5.22, Tab. 5.28). Dabei wies der Verlauf der Chlorophyllwerte ab Mitte Juni in beiden Anbaujahren bereits auf einen geringeren N-Versorgungszustand der nur in granulierter Form gedüngten Pflanzen hin (Abb. 5.18, Abb. 5.20). Die abgeleiteten Erkenntnisse der eigenen Untersuchungen stimmen auch mit Aussagen von Evans und Waller (2006), Hagin et al. (2003), Kafkafi und Tarchitzky (2011) sowie Magen (1995) überein, nach welchen vor allem bei Mikrobewässerungssystemen wie der Tropfbewässerung, die nur einen Teil der Fläche befeuchten, konventionelle Düngesysteme mit breitflächiger Düngeausbringung ineffizient sind.

Für den erläuterten Erklärungsansatz sprechen weiterhin die im Feldversuch V2\_L\_HS im Jahr 2017 gewonnenen Erkenntnisse. Dort wurden durch Düngesysteme mit Fertigation (F3 bis F6) im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Applikation (F2) neben einem höheren Doldenertrag vor allem signifikant höhere Alphasäuregehalte erzielt (Tab. 5.17). Dabei wurden die höchsten Gehalte bei Systemen mit Konzentration des Stickstoffs auf einen 6-wöchigen Zeitraum (F4, F6) erfasst, bei welchen ab Anfang August im

Zeitraum der Alphasäuresynthese keine Stickstoffausbringung mehr erfolgte. Aufgrund des im Kapitel 6.3 diskutierten Zusammenhangs zwischen der Höhe des Alphasäuregehalts und dem N-Versorgungszustand der Pflanze während des Zeitraums der Inhaltsstoffsynthese, ist die Reduktion des Alphasäuregehalts bei ausschließlich granuliert gedüngten Pflanzen (F2) mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine überhöhte N-Versorgung zurückzuführen. Für eine hohe N-Versorgung der Pflanzen sprechen die erhöhten N-Gehalte in den Dolden und im Restpflanzenmaterial zum Zeitpunkt der Ernte (Tab. 5.23). Grundsätzlich ist an diesem Versuchsstandort davon auszugehen, dass im Jahr 2017 aufgrund des Niveaus des Nmin-Gehaltes im Frühjahr (Tab. 5.29) sowie der in den Vorjahren erfolgten organischen N-Düngung (vgl. 4.2), trotz des niedrigen N-Düngeniveaus in Höhe von  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$ , während der Vegetationsperiode eine hohe Verfügbarkeit an mineralischem Stickstoff vorlag. Eine Begründung dafür, dass vor allem die granuliert gedüngte N-Düngung (F2) zu einer signifikanten Reduktion des Alphasäuregehalts führte, kann auf Basis des Witterungsverlaufs im Versuchsjahr 2017 (vgl. 4.3) erfolgen. Die bis Ende Juli herrschende Trockenheit (Tab. 4.5) führte dazu, dass ein Teil des granuliert gedüngten Stickstoffs erst mit den ab Anfang August einsetzenden Niederschlägen und somit im Zeitraum der Alphasäuresynthese pflanzenverfügbar wurde. Ursächlich für diesen Effekt ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die bereits diskutierte Wasserverteilung bei Tropfbewässerungssystemen, wodurch Anteile des granuliert applizierten Stickstoffs zunächst nicht pflanzenverfügbar waren. Wurde hingegen ein Teil des Stickstoffs über Fertigation appliziert (F3 bis F6), reduzierte sich der Anteil an Stickstoff, der ab Ende Juli mit den eintretenden Niederschlägen kurzfristig pflanzenverfügbar wurde. Aufgrund dieser Erkenntnis kann weiterhin abgeleitet werden, dass die apparente N-Ausnutzung nicht ausschließlich über die N-Aufnahme während der Phase der Hauptbiomassebildung (Anfang Juni bis Ende Juli) bestimmt wird, sondern auch die Witterung im Zeitraum vor der Ernte, während der Ausbildung und Reife der Dolden, über den N-Gehalt in der Pflanzenmasse Einfluss nimmt. Jedoch ist vor allem bei längeren Trockenperioden davon auszugehen, dass durch Düngesysteme mit Fertigation stets eine höhere Ausnutzung des eingesetzten Stickstoffs erreicht wird, da bei ausschließlich granulierter N-Applikation Anteile nicht pflanzenverfügbar sind.

Im Hinblick auf die Konzeption von N-Düngesystemen mit Fertigation für eine möglichst bedarfsgerechte Stickstoffernährung der Hopfenpflanze stellt sich zunächst die Frage der Höhe und des Zeitraums der N-Applikation. Dabei ist der Einfluss des Zeitpunkts der N-Ausbringung, wie im Kapitel 6.3 diskutiert, sowohl vom N-Versorgungsniveau der

Pflanze, als auch der sortenspezifischen Entwicklung abhängig. Im Rahmen der Feldversuche wurden schwerpunktmäßig Systeme geprüft, bei welchen im Frühjahr ein Drittel der gesamten N-Menge in granulierter Form und anschließend zwei Drittel über das Bewässerungswasser gedüngt wurden. Dabei zeigte sich grundsätzlich, dass ein zu später Beginn der Applikation vor allem bei einem niedrigen N-Düngeniveau zu einer Einschränkung des Seitentriebwachstums und damit zu einer Reduktion des Ertragspotenzials führen kann. Als problematisch wird dies vor allem bei Sorten gesehen, welche wie die Aromasorten Perle und Tradition frühzeitig Stickstoff benötigen, damit ein sortenspezifisch optimales Wachstum der Seitentriebe stattfindet (vgl. 6.3). Im Gegensatz dazu weist Herkules aufgrund einer verlängerten Wachstumsphase ein höheres Kompensationspotenzial auf (vgl. 6.3). Wie sich an der Sorte Perle im Feldversuch V2\_S\_PE zeigte, führte dort in zwei Versuchsjahren das Düngesystem mit Fertigation ab KW23 zur höchsten Ertragsbildung sowie apparenten N-Ausnutzung (vgl. 5.2.2, 5.2.7). Aus technischer Sicht wird eine Ausbringung von Stickstoff über Fertigation zum Zeitpunkt Anfang Juni (KW23) in der Praxis jedoch kaum umsetzbar sein, da verschiedene andere Kulturmaßnahmen zunächst abgeschlossen sein müssen, bevor das Auslegen des Tropfschlauches erfolgen kann. Das Risiko einer zu späten N-Applikation könnte reduziert werden, indem eine Verringerung des über Fertigation auszubringenden N-Anteils erfolgt. Hierbei wäre auch eine Differenzierung zwischen den Sorten denkbar, sodass bei spätreiferen Sorten wie Herkules ein höherer Anteil als bei frühreiferen über Fertigation ausgebracht wird. Welcher Anteil der Gesamt-N-Menge überhaupt über Fertigation appliziert werden kann, wird auch davon bestimmt, ob ein Betrieb organische Düngemittel einsetzt und ob für das Hopfenputzen stickstoffhaltige Nährstofflösungen eingesetzt werden. Im Hinblick auf die Verteilung des über Fertigation auszubringenden N-Anteils wurde die Erkenntnis erlangt, dass sich die Konzentration auf einen 6-wöchigen Zeitraum im Vergleich zur Verteilung auf 10 (Perle) bzw. 11 Wochen (Herkules) bei einem limitiertem N-Angebot unabhängig von der Sorte positiv auswirkt, da ein höherer N-Anteil während der Hauptbiomassebildung und Phase des Seitentriebwachstums appliziert wurde (vgl. 6.3). Bei Herkules wird dadurch zusätzlich das Risiko einer Reduktion des Alphasäuregehalts verringert (vgl. 6.3). Wurden zwei Drittel des Stickstoffs über Fertigation über einen 6-wöchigen Zeitraum ausgebracht, haben sich hinsichtlich des Beginns der Applikation je nach Standort, Sorte und Anbaujahr unterschiedliche Termine als optimal erwiesen (vgl. 6.3). Erfolgt jedoch eine Reduktion des über Fertigation auszubringenden N-Anteils, ist davon auszugehen, dass die Bedeutung des Zeitpunkts, vor allem einer frühzeitigen Applikation abnimmt. Auf

Basis der Ergebnisse dieser Arbeit kann die Aussage getroffen werden, dass die Ausbringung während der Hauptbiomassebildung, ab Beginn der Seitentriebeausbildung in den oberen 2/3 der Pflanze kurz vor dem Erreichen der Gerüsthöhe der Pflanze erfolgen sollte (etwa KW25).

Ein wesentlicher Vorteil von Düngesystemen mit Fertigation wird darin gesehen, dass über das Bewässerungswasser ausgebrachter Stickstoff von der Hopfenpflanze unmittelbar aufgenommen wird, wodurch ein kurzfristiges Eingreifen in die Stickstoffernährung der Hopfenpflanze möglich ist. Somit wäre auf Basis einer zuverlässigen Erfassung des aktuellen N-Versorgungszustands der Pflanze während der Hauptwachstumsphase durch Fertigation eine Korrektur der N-Düngung und damit eine Berücksichtigung des witterungsabhängigen Entwicklungsverlaufs der Pflanze, als auch der standortspezifischen N-Nachlieferung möglich. Folglich ermöglichen N-Düngesysteme mit Fertigation eine bedarfsgerechte Stickstoffernährung der Hopfenpflanze.

## **6.5 Effekte durch ober- und unterirdische Bewässerung**

Die Auswirkungen ober- und unterirdischer Tropfbewässerung wurden im Rahmen des Versuchsansatzes 3 an der Aromasorte Perle auf einem sandigen Boden untersucht. Dabei erfolgte auch eine Analyse des Einflusses unterschiedlicher N-Düngesysteme (vgl. 4.4.2.3). Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, führte eine zusätzliche Bewässerung der Pflanzen im dreijährigen Versuchszeitraum von 2017 bis 2019 zu einer Steigerung des Doldenertrags sowie Alphasäuregehalts (Tab. 5.39, Tab. 5.40). Die prozentuale Steigerungsrate wurde dabei sowohl von der Positionierung des Tropfschlauches, als auch vom N-Düngesystem beeinflusst. Eine Erhöhung des N-Entzugs durch Bewässerung wurde im Vergleich zu nicht bewässerten Pflanzen vor allem durch Düngesysteme mit Fertigation erreicht (Tab. 5.42). Anzuführen ist, dass in jedem der drei Versuchsjahre aufgrund niedriger Niederschlagsmengen oder ungleichmäßiger Verteilung des Niederschlags längere Trockenperioden mit negativen klimatischen Wasserbilanzen auftraten (Tab. 4.4, Tab. 4.5). Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen somit, wie auch von Delahunty und Johnston (2011), Fandiño et al. (2015; 2019) Graf (2016), Kopecký et al. (1998), Kopecký und Slašík (1997), Nakawuka (2013), Nakawuka et al. (2017), Slašík (2000), Svoboda et al. (2008) und Wample und Farrar (1983) angeführt, dass durch eine zusätzliche Bewässerung von Hopfen bei Trockenheit eine Stabilisierung agronomischer Kennzahlen erreicht wird.

Im Vergleich zur unterirdischen Ausbringung des Wassers führte die oberirdische Tropfbewässerung sowohl bei ausschließlich granulierter N-Düngung, als auch bei N-Düngesystemen mit Fertigation zu einer stärkeren Steigerung des Doldenertrags, des Alpha-säuregehalts sowie der Restpflanzenmasse (Tab. 5.39, Tab. 5.40, Tab. 5.41). Wurde ein Anteil der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser appliziert (B5, B8), konnte bei beiden Bewässerungsverfahren eine Optimierung erzielt werden. Sowohl Graf (2016), als auch Stampfl (2017) zeigten, im Rahmen von in der Hallertau an den Sorten Perle und Herkules durchgeführten Feldversuchen, bereits tendenzielle Vorteile von oberirdischer gegenüber unterirdischer Tropfbewässerung auf.

Bei dem in der Hallertau vorherrschenden Anbausystem werden im Verlauf der Vegetation durch das Aufschütten der humus- und nährstoffreichen oberen Bodenschicht des gesamten Zwischendambereichs Dämme entlang der Pflanzreihen geformt (vgl. 2.1). Ausgehend von den unteren Abschnitten der verschütteten Haupttriebe bildet die Hopfenpflanze sogenannte sekundäre Sommerwurzeln aus, durch welche grundsätzlich das gesamte Dammvolumen erschlossen werden kann. Die Intensität der Durchwurzelung variiert jedoch in Abhängigkeit von der Sorte, den Witterungsbedingungen und der Bewirtschaftung (Graf et al., 2014; Kohlmann und Kastner, 1975). Diese Wurzeln können zusätzliches Wasser sowie Nährstoffe aufnehmen und haben dabei laut Graf (2016) den Vorteil, dass aufgenommenes Wasser und darin gelöste Nährstoffe aufgrund der sprossbürtigen Entstehung der Wurzeln unmittelbar zu den Pflanzenorganen transportiert werden, ohne den Weg durch das gesamte Wurzelsystem passieren zu müssen. Wie die Ergebnisse der Untersuchung der Feinwurzelverteilung zeigen, liegt die Wurzelichte im aufgeschütteten Damm um ein Vielfaches höher als in tiefer gelegenen Bodenschichten (Tab. 5.44). Die Bedeutung des Wurzelwachstums im aufgeschütteten Damm wird auch daran deutlich, dass dort 40 bis 58 % der ermittelten Wurzelspitzen gezählt wurden (Tab. 5.45). Anzumerken ist dabei jedoch, dass es sich bei den im Dammbereich ermittelten Feinwurzeln nicht ausschließlich um sprossbürtige Sommerwurzeln handelte, da eine Differenzierung dieser nicht möglich war.

Erfolgt die Bewässerung oberirdisch wird der Tropfschlauch im Anschluss an die Formung des Damms auf die Dammoberfläche ausgelegt (vgl. 2.3.3). In Folge dessen, dass sich das ausgebrachte Wasser sowohl horizontal, als auch vertikal in Richtung der Schwerkraft verteilt (Kafkafi und Tarchitzky, 2011; Schütze et al., 2013), wird die nährstoff- und humusreiche Erde des aufgeschütteten Damms bei oberirdischer Bewässerung

regelmäßig durchfeuchtet. Dadurch könnte die Durchwurzelung des Damms gefördert worden sein. Da im Rahmen der Untersuchung der Feinwurzelverteilung bei ausschließlich granuliert gedüngten aber nicht bewässerten Pflanzen (B2) jedoch eine vergleichbare Wurzeldichte im Damm erfasst wurde, ist dies auszuschließen (Tab. 5.44). Ein weiterer Erklärungsansatz für die positiven Effekte auf das Wachstum und die Entwicklung der Hopfenpflanze lautet, dass Wasser und Nährstoffe über die direkt am Spross gelegenen Sommerwurzeln wahrscheinlich schneller zu den Pflanzenorganen transportiert werden. Am wahrscheinlichsten ist jedoch, dass die regelmäßige Durchfeuchtung der nährstoff- und humusreichen Erde des aufgeschütteten Damms, aufgrund der hohen Wurzeldichte dort, sowohl die Wasser- als auch die Nährstoffversorgung der Pflanze begünstigen. Erfolgte bei oberirdischer Bewässerung die Ausbringung eines Anteils der gesamten N-Menge über Fertigation (B5), verstärkte dies die positive Wirkung. Als Ursache hierfür ist anzuführen, dass bei ausschließlich granulierter N-Düngung (B4), wie bereits im Kapitel 6.4 diskutiert, aufgrund der Wasserverteilung nicht die gesamte N-Menge pflanzenverfügbar war, da sich die Wasseraufnahme in Trockenphasen auf die durchfeuchteten Zonen konzentrierte. Die Wasserverteilung wird auch von Evans und Waller (2006), Hagin et al. (2003), Kafkafi und Tarchitzky (2011) sowie Magen (1995) als grundsätzliches Problem im Zusammenhang mit Tropfbewässerungssystemen angeführt.

Im Gegensatz zur oberirdischen Bewässerung befindet sich der Tropfschlauch bei unterirdischer Installation im Hopfenbau in einer Tiefe von 30 cm und liegt etwa ebenso weit von der Mitte der Pflanzreihen entfernt, etwa im Bereich der Fahrspuren (vgl. 2.3.3). Bei unterirdischer Bewässerung unterscheidet sich das Verteilungsmuster des Wassers grundsätzlich, da auch eine Ausbreitung in vertikaler Richtung entgegen der Schwerkraft erfolgt (Sne, 2006). Camp et al. (2000), Lamm (2002) und Raine und Foley (2001) beschreiben jedoch für verschiedene Kulturen, dass die Durchfeuchtung der obersten Bodenschichten häufig nicht ausreichend ist. Auch für Hopfen kann auf Basis der durchgeführten Feldversuche die Aussage getroffen werden, dass das Wasser bei unterirdischer Tropfbewässerung aufgrund der Lage des Tropfschlauches die obersten Bodenschichten, vor allem aber den aufgeschütteten Damm nicht erreicht. Nach Devasirvatham (2009) verringert sich bei unterirdischer Tropfbewässerung durch die Austrocknung der oberen Bodenschichten die Pflanzenverfügbarkeit oberflächlich ausgebrachter Nährstoffe. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zeigen, dass sich bei unterirdischer Bewässerung durch die Ausbringung eines Anteils der gesamten N-Menge über Fertigation (B8) im Vergleich zur ausschließlich granulierten N-Applikation (B7) neben dem Doldenertrag

auch die Biomassebildung und der N-Entzug der Pflanzen erhöhen (Tab. 5.39, Tab. 5.41, Tab. 5.42). Daraus resultiert, dass das Pflanzenwachstum bei unterirdischer Bewässerung und ausschließlich granulierter N-Applikation aufgrund der räumlichen Trennung von Stickstoff und Wasser eingeschränkt wird. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Bodenschichten im Bereich des unterirdischen Tropfschlauches aufgrund der Tiefe der Verlegung (30 cm) geringere Nährstoffgehalte aufweisen. Die Untersuchung der Feinwurzelverteilung zeigt auf, dass sich die Wurzeldichte bei unterirdischer Bewässerung im aufgeschütteten Damm reduziert (Tab. 5.44). Eine Zunahme der Wurzeldichte in tieferen Bodenschichten, im Bereich des unterirdischen Tropfschlauches, wurde hingegen nicht erfasst, weshalb unterirdisch bewässerte Pflanzen scheinbar insgesamt eine geringere Wurzeldichte erreichten. Weiterhin ist bekannt, dass die Wurzelverteilung einer Pflanze unter Tropfbewässerung durch die Wasser- und Nährstoffverteilung beeinflusst wird (Kafkafi und Tarchitzky, 2011). In der wassergesättigten Zone direkt unter der Tropfstelle sterben Wurzeln aufgrund von Sauerstoffmangel in der Regel ab (Huck und Hillel, 1983). Die Ausbreitung der Pflanzenwurzeln erfolgt hingegen vor allem dort, wo Wasser, Sauerstoff und Nährstoffe gleichzeitig zur Verfügung stehen. Speziell der Sauerstoffgehalt könnte in den eigenen Untersuchungen bei unterirdischer Bewässerung ein limitierender Faktor gewesen sein, da der Tropfschlauch bei Hopfen im Bereich der Fahrspuren verlegt wird, wo der Boden im Vergleich zum aufgeschütteten Damm eine deutlich höhere Lagerungsdichte aufweist (Abb. 5.28).

Aufgrund des Unterschieds in der Bodenbonität innerhalb der Versuchsfläche, verursacht durch langjährige Erosion und Kolluviumbildung, wird eine differenzierte Betrachtung der Effekte an der Hangober- und Hangunterseite als sinnvoll erachtet (vgl. 4.2). Während an der Hangoberseite ausschließlich die oberirdische Tropfschlauchpositionierung zu einer Steigerung der Parameter Doldenertrag und Restpflanzenmasse führte, ergaben sich an der Hangunterseite auch durch unterirdische Bewässerung positive Effekte (Tab. 5.39, Tab. 5.41). Aufgrund der langjährigen Erosion am Standort weist der Boden an der Hangoberseite einen deutlich höheren Sand- und Kiesanteil auf (vgl. 4.2). Wie Schütze et al. (2013) aufzeigten, ist die horizontale Wasserverteilung vor allem auf sandigem Boden stark eingeschränkt, wodurch die geringere Effektivität der unterirdischen Bewässerung an der Hangoberseite erklärt werden kann (Abb. 2.4). Auf Basis dieser Erkenntnis kann die Aussage abgeleitet werden, dass unterirdische Tropfbewässerungssysteme vor allem an Standorten, deren hydraulische Bodeneigenschaften eine ausreichende horizontale Verteilung des Wassers verhindern, ineffizient sind.

In den durchgeführten Versuchen unterschied sich die Steuerung der ober- und unterirdischen Systeme nicht, d. h. die Wasserlaufzeit und die Intervalle zwischen den Wassergaben variierten nicht (vgl. 4.4.4.2). Aus Praxiserfahrungen der vergangenen Jahre ist jedoch bekannt, dass bei unterirdischen Systemen längere Intervalle und höhere Einzelgaben einen positiven Effekt haben können. Dabei ist zu beachten, dass auf stark sandigen oder kiesigen Standorten die Höhe der Einzelgaben limitiert ist, um eine Versickerung des Wassers außerhalb des effektiven Wurzelraums zu vermeiden. Auch Graf (2016) wies bereits darauf hin, dass höhere Wassergaben bei geringerer Frequenz tendenziell vorteilhaft sind. Nach Schütze et al. (2013) nimmt die horizontale und vertikale Verteilung des Wassers entgegen der Schwerkraft mit der Höhe der Wassergabe zu. Ursächlich für die positive Wirkung höherer Einzelgaben bei der unterirdischen Tropfschlauchpositionierung ist somit wahrscheinlich ein größeres durchfeuchtetes Bodenvolumen. Inwieweit die Effizienz unterirdischer Tropfbewässerungssysteme durch eine standortspezifische Anpassung der Höhe der Wassergaben verbessert werden kann, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden, sollte jedoch Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

## 7 Zusammenfassung

Stickstoff stellt bei Hopfen (*Humulus lupulus L.*) den mengenmäßig wichtigsten und am stärksten ertragslimitierenden Pflanzennährstoff dar, wobei überschüssiger nicht von der Hopfenpflanze aufgenommener Stickstoff unterschiedlichen Verlustprozessen unterliegt. Trotzdem ist für die aktuell in der Hallertau, dem weltweit bedeutendsten Hopfenanbaugebiet, kultivierten Hopfensorten und genutzten Anbausysteme nur wenig über die exakten Auswirkungen eines in Zeit und Höhe variierten N-Angebots bekannt. Die auszubringende Menge an Stickstoff wird in der Hallertau zum Großteil durch oberflächiges Streuen granulierter N-Düngemittel zugeführt, wohingegen in semiariden Anbauregionen der Welt hohe Anteile über das Bewässerungswasser (Fertigation) appliziert werden.

Ziel dieser Arbeit war es N-Düngesysteme mit Fertigation unter den Bedingungen in der Hallertau im Hinblick auf eine bedarfsgerechtere Stickstoffernährung der Hopfenpflanze zu untersuchen. Hierzu wurden **vier Forschungsfragen** mit jeweils verschiedenen Teilaspekten formuliert, die nachfolgend erläutert werden. Die experimentelle Prüfung und Gewinnung empirischer Daten erfolgte im Zeitraum von 2017 bis 2019 in unterschiedlich konzeptionierten Feldversuchen in drei Versuchsserien auf verschiedenen Standorten mit den wichtigsten Hopfensorten. Dabei wurde sowohl der Zeitpunkt und die Höhe der N-Düngung variiert, als auch die Düngerapplikationsform (Oberflächige Applikation granulierter Dünger und ober- bzw. unterirdische Fertigation). Neben der Ermittlung von Ertrag, Qualität und N-Aufnahme zum Zeitpunkt der Ernte, wurden in einzelnen Feldversuchen weiterführende Untersuchungsmethoden wie die  $^{15}\text{N}$ -Tracer-Technik, Chlorophyllwertmessungen (SPAD-Meter) oder passive Reflexionsmessungen eingesetzt, um die N-Aufnahme und N-Verteilung in unterschiedliche Pflanzenorgane zu charakterisieren.

### a) Wie wirkt sich ein in Zeit und Höhe variiertes N-Angebot aus?

Es wurde ermittelt, dass eine Hopfenpflanze mehr als zwei Drittel des gesamten Stickstoffs in einem 7- bis 8-wöchigen Zeitraum zwischen Anfang Juni und Ende Juli, während der Phase der Hauptbiomassebildung, aufnimmt. Obwohl vor dieser Phase relativ geringe Mengen an Stickstoff in der Pflanze akkumuliert werden, zeigte sich bei den Aromasorten Perle und Tradition, dass eine N-Unterversorgung in frühen Wachstumsphasen bis Ende Mai bereits zu einer Verringerung des Ertragspotenzials führt. Ursächlich hierfür war eine Veränderung des Habitus der Pflanzen, denn je später eine definierte Menge

an Stickstoff ausgebracht wurde, desto stärker reduzierte sich die Ausbildung der Seitentriebe von unten beginnend bis in höhere Pflanzenabschnitte. Eine ausschließliche Ausrichtung des Zeitpunkts der N-Applikation an der N-Aufnahmekurve der Hopfenpflanze ist somit weder im Hinblick auf die Ertragsbildung noch die Stickstoffverwertung als sinnvoll anzusehen. Stattdessen ist bei frühreiferen Sorten wie Perle und Tradition die frühzeitige Applikation einer ersten N-Gabe bereits im April von entscheidender Bedeutung. Spätreifere Sorten wie Herkules weisen durch die verlängerte Wachstumsphase hingegen ein höheres Kompensationspotenzial auf, wodurch eine stärkere Anpassung der N-Düngung an die N-Aufnahmekurve möglich ist.

Die ertragsoptimale Höhe der N-Düngung wurde vom sorten-, witterungs- und standortabhängigen Wachstumsverlauf und damit der N-Aufnahme des Pflanzenbestands sowie dem Vorrat an mineralischem Stickstoff im Boden und dem standortspezifischen N-Nachlieferungspotenzial bestimmt. Erfolgte eine Reduktion der N-Düngung auf ein Niveau deutlich unter dem N-Entzug der Pflanze, führte dies im selben Anbaujahr nicht zwingend zu einer Einschränkung der Biomasse- und Ertragsbildung, jedoch zu einer beschleunigten Reife und einer Verschlechterung der äußeren Doldenqualität. Darüber hinaus zeigte sich bei einem stark reduzierten N-Düngeniveau, dass die N-Einlagerung in die Speicherwurzeln abnimmt, wodurch die Pflanzen im Frühjahr des Folgejahres eine geringere Vitalität aufwiesen und die Entwicklung wie auch Ertragsbildung limitiert waren. Hinsichtlich der perennierenden Eigenschaften einer Hopfenpflanze und dem Ziel einer möglichst bedarfsgerechten Stickstoffernährung des Hopfens besteht somit die Notwendigkeit auch die Speicherwurzeln ausreichend mit Stickstoff zu ernähren.

Im Hinblick auf den wertgebenden Inhaltsstoff Alphasäure wurde ermittelt, dass ein hohes N-Versorgungsniveau während der Phase der Alphasäuresynthese (ab Anfang August) bei der Sorte Herkules zu einer Reduktion des Alphasäuregehalts führen kann. Dazu führen kann sowohl eine späte und übermäßige N-Düngung, als auch ein hoher Vorrat an mineralischem Stickstoff im Boden und ein erhöhtes N-Nachlieferungspotenzial. Bei den untersuchten Aromasorten Perle und Tradition wurde dieser Effekt hingegen nicht beobachtet.

### **b) Kann der aktuelle N-Ernährungszustandes nicht-invasiv erfasst werden?**

Die Messung des Chlorophyllwertes mit einem SPAD-Meter an den unteren Blättern des Haupttriebs bildete den N-Gehalt und N-Versorgungszustand der Hopfenpflanze grundsätzlich ab. Kurzfristige Änderungen des N-Ernährungszustandes konnten jedoch, vor

allem während der Phase der Hauptbiomassebildung, an diesem Messpunkt nicht hinreichend genau erfasst werden, da erhöhte Anteile des ausgebrachten Stickstoffs in höher liegende Pflanzenabschnitte transportiert wurden, wie sich im Rahmen des  $^{15}\text{N}$ -Einsatzes zeigte. Hinsichtlich der Festlegung von Schwellenwerten wird unabhängig vom Messpunkt eine Unterteilung der Pflanzenentwicklung in vor, während und nach der Hauptbiomassebildung als sinnvoll erachtet, da eine Abhängigkeit des Chlorophyllwertes vom Entwicklungszustand der Pflanze besteht.

Vegetationsindices, berechnet auf Basis von Reflexionsspektren, bilden neben dem N-Gehalt auch die tatsächliche N-Aufnahme des Pflanzenbestands ab, weshalb passive Reflexionsmessungen im Vergleich zu Chlorophyllwertmessungen eine höhere Aussagekraft hinsichtlich des aktuellen N-Versorgungszustandes der Pflanze haben. Diese Technologie könnte deshalb zukünftig genutzt werden, um eine standortspezifische Optimierung von Höhe und Zeitpunkt der N-Düngung und dadurch eine bedarfsgerechtere Stickstoffernährung der Hopfenpflanze zu erreichen.

### **c) Welche Effekte hat eine ober- bzw. einer unterirdischer Tropfbewässerung?**

Im Untersuchungszeitraum von 2017 bis 2019 führte die zusätzliche Bewässerung der Aromasorte Perle auf einem sandigen Boden in jedem Anbaujahr zu einer Stabilisierung der agronomischen Kennzahlen Doldenertrag und Alphasäuregehalt. Darüber hinaus wurde durch Bewässerung auch die Stickstoffverwertung verbessert. Bei einer aufgrund hydraulischer Bodeneigenschaften limitierten horizontalen Verteilung des ausgebrachten Wassers erreichte die oberirdische Tropfbewässerung eine höhere Effizienz als die unterirdische. Ursächlich hierfür ist, dass sich das Feinwurzelwerk einer Hopfenpflanze zu hohen Anteilen im aufgeschütteten Bifang und in den darunter liegenden Bodenschichten befindet.

### **d) Welche Auswirkungen hat eine Stickstoffernährung über das Bewässerungswasser?**

Es wurde ein Systemvergleich zwischen N-Düngesystemen mit Fertigation und abschließlicher N-Applikation in granulierter Form angestellt. Dabei führte die Nutzung von Fertigation nicht nur zu einer Verbesserung des Doldenertrags und Alphasäuregehalts, sondern auch zu einer Steigerung des Stickstoffentzugs und Reduktion des Nmin-Gehalts im Boden, wodurch auch eine Verringerung des Risikos einer Nitrat-Auswaschung ins Grundwasser einhergeht. Düngesysteme mit Fertigation erreichten vor allem bei

einem niedrigen N-Düngeniveau eine höhere Stickstoffverwertung. Bei Applikation von zwei Drittel der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser erwies sich unter Bedingungen eines limitierten N-Angebots die Konzentration des über Fertigation auszubringenden N-Anteils auf einen 6-wöchigen Zeitraum sortenunabhängig als positiv, da ein höherer N-Anteil während der Hauptbiomassebildung und der Phase des Seitentriebwachstums appliziert wurde. Für eine effiziente Düngung mit Fertigation sollte die Applikation zwischen Mitte Juni und Ende Juli stattfinden und ab Anfang August keine wesentlichen Mengen an Stickstoff mehr ausgebracht werden. Bei frühreiferen Sorten wie Perle und Tradition besteht die Gefahr einer nicht rechtzeitigen N-Applikation, da eine Verlegung des Tropfschlauches vor KW25 kaum zu realisieren ist. Deshalb sollte bei diesen Sorten ein höherer N-Anteil in früheren Wachstumsphasen ausgebracht werden und die über Fertigation ausgebrachte N-Menge kleiner zwei Drittel der Gesamt-N-Dünger Menge sein. Als wesentlicher Vorteil von Düngesystemen mit Fertigation konnte belegt werden, dass über das Bewässerungswasser ausgebrachter Stickstoff von den Pflanzen unmittelbar aufgenommen wird, wodurch kurzfristig und effektiv in die Stickstoffernährung der Hopfenpflanze eingegriffen werden kann. Auf Basis einer zuverlässigen Erfassung des aktuellen N-Versorgungszustands während der Hauptwachstumsphase könnte durch Fertigation eine Korrektur der N-Düngung erfolgen und somit eine standortangepasste bedarfsgerechte Stickstoffernährung des Hopfens erreicht werden.

## 8 Summary

In terms of quantity, nitrogen is the most important and most yield limiting plant nutrient in hops (*Humulus lupulus L.*), whereby excess nitrogen not taken up by the hop plant is subject to various loss processes. Despite that, little is known about the exact effects of an N supply varying in rate and timing for the hop varieties and cultivation systems currently used in the Hallertau, the world's most important hop-growing region. In the Hallertau, the required amount of nitrogen is largely supplied by surface spreading of granulated N fertilizers, whereas in semi-arid growing regions, high proportions are applied via irrigation water (fertigation).

The aim of this thesis was to examine nitrogen fertilization systems with fertigation under the conditions in the Hallertau region with regard to a nitrogen nutrition that is based on the hop plant's needs. Therefore, **four research questions** with different sub-aspects have been formulated, as explained below. From 2017 to 2019 the experimental research and the acquisition of empirical data has been conducted in various field trials consisting of three trial series examining the most important hop varieties at different locations. Apart from a variation in rate and timing of N fertilization, different fertilizer application forms (surface application of granulated fertilizer and above- or below-ground fertigation) have also been examined. In addition to the determination of yield, quality and N-uptake at the time of harvest, further analysis methods such as the <sup>15</sup>N-Tracer-Technique, chlorophyll value measurements (SPAD-Meter) or passive reflection measurements were used in individual field trials to depict the N-uptake and N-distribution in different parts of the plant.

### **a) Which effects have different nitrogen treatments varied in rate and timing?**

These studies found that the hop plant absorbs more than two thirds of the total amount of nitrogen over a period of 7 to 8 weeks between early June and end of July - during formation of main biomass. Despite the fact that only a low amount of nitrogen is accumulated in the plant prior to this stage, the varieties Perle and Tradition showed that a nitrogen deficit in early growth stages until end of May already leads to a decrease of yield potential. This is due to a change in the variety-characteristic formation of lateral shoots (side arms) - the later the application of nitrogen, the greater the formation of side arms was reduced, starting from the bottom to higher plant sections. Consequently, a nitrogen fertilization solely based on the hop plant's N uptake curve cannot be recommended, neither regarding yield formation nor nitrogen utilization. Instead, an early application of the first nitrogen treatment in April is of vital importance for early maturing varieties such as Perle and Tradition. Late maturing varieties like Herkules show a higher

potential of compensation due to prolonged growth phases which enables a higher adaptation of N-Fertilization to the plant's N uptake curve.

The ideal amount of nitrogen fertilization with regard to yield optimization has been determined by the growth pattern - depending on variety, weather conditions and location - and therefore by the N uptake, the supply of mineral nitrogen in the soil as well as the location-specific N mineralization potential. A reduction of the nitrogen fertilization to a level significantly below the plant's N uptake not necessarily led to a limitation of biomass and yield formation in the same year, however, it resulted in an accelerated ripening and a negative impact on external cone quality. Furthermore, it showed that the storage of nitrogen in specific storage roots declines if N levels are significantly reduced, leading to lower vitality as well as limited plant development and yield formation in the following year. With regard to the hop plant's perennial properties as well as the goal to achieve a demand-oriented nitrogen nutrition of the hop plant it is also necessary to supply the storage roots with enough nitrogen.

With respect to valuable contents of alpha acid it has been found that high N supply levels during the stage of alpha acid synthesis (starting from early August) can result in a reduction of alpha acid concentration in the variety Herkules. This decrease can be caused by late and excessive N fertilization as well as by high mineral N contents in the soil. However, this effect has not been observed in the aroma varieties Perle and Tradition.

**b) Is it possible to determine the current nitrogen nutritional status through non-invasive methods?**

The measurement of the chlorophyll value with a SPAD-Meter on the lower leaves of the main shoot generally reflected the N content and N supply status of the hop plant. However, short-term changes in the N nutritional status could not be recorded with sufficient accuracy at this measuring point, especially not during the stage of main biomass formation, since increased proportions of the applied nitrogen were transported to higher plant sections, as was shown by the use of  $^{15}\text{N}$ . Regarding the determination of threshold values a classification of the plant development into before, during and after main biomass formation independent of the measuring point, is considered appropriate, since the chlorophyll value correlates with the plant's development stage.

Vegetation indices, calculated on the basis of reflectance spectra, represent not only the N content but also the actual N uptake of the crop, which is why passive reflectance measurement methods have a higher informative value with regard to the current N supply status of the plant compared to chlorophyll value measurements. Therefore, this

technology could be used to achieve a site-specific optimization of rate and timing of N fertilization and thus a more demand-oriented nitrogen nutrition of the hop plant in the future.

### **c) What are the effects of surface and subsurface drip irrigation?**

In the period from 2017 to 2019, additional irrigation of the aroma variety Perle on sandy soil led to a stabilization of the agronomic parameters cone yield and alpha acid content every year. In addition, irrigation also achieved an improvement of nitrogen utilization. Compared to subsurface systems, surface drip irrigation achieved a higher efficiency if the horizontal water distribution was limited by hydraulic soil properties. It was shown that this is due to the fact that the majority of the hop plant's fine root system is located in the hill formed along the hop rows and the soil layers beneath it.

### **d) What are the effects of a nitrogen nutrition via irrigation water?**

A system comparison was made between N fertilization systems with fertigation and a solely granulated N application. The use of fertigation resulted not only in an improvement of cone yield and alpha acid content, but also in an increase of the plant's nitrogen uptake and a reduction of Nmin content in the soil, which is also associated with a reduction of the risk of nitrate leaching into the groundwater. Fertilization systems with fertigation achieved a higher nitrogen utilization especially at low N-fertilization rates. If two thirds of the total amount of nitrogen were applied via irrigation water, the concentration over a 6-week period proved to have a positive impact on all analyzed varieties, especially under conditions of a limited N supply, since a higher proportion of N has been applied during main biomass formation and the stage of lateral shoot growth. For an efficient N-fertilization with fertigation the application should take place between mid-June and late July while no significant amounts of nitrogen should be applied after early August. For early maturing varieties such as Perle and Tradition, there is a risk of a late N application as it is hardly possible to lay out the drip tubes before the 25<sup>th</sup> week of the year. Therefore, in early maturing varieties, a higher proportion of N should be applied in earlier growth stages while the amount of N applied via fertigation should be less than two-thirds of the total amount of N fertilizer. A substantial advantage of fertilization systems with fertigation is that nitrogen applied via the irrigation water is immediately absorbed by the plants, which allows an effective short-term intervention in the plant's nitrogen nutrition. On the basis of a reliable recording of the current N supply status with sensors during the main growth stage, fertigation could be used to adjust the N fertilization in order to achieve a site-specific and demand-oriented nitrogen nutrition of the hop plant.

## Literaturverzeichnis

- ALLB Tettngang (1993):** *Hopfenversuchsfeld Straß - Versuchsbericht 1992*. Amt für Landwirtschaft, Landschaft- und Bodenkultur Tettngang.
- Alva A. K., Mattos D., Quaggio J. A. (2008):** Advances in Nitrogen Fertigation of Citrus. *Journal of Crop Improvement*, vol. 22, no. 1, pp. 121–146.
- ASABE (2015):** *Soil and Water Terminology - ASAE S526.4*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. ASABE Standards.
- Asokaraja N. (2016):** Advances in Fertigation for Micro Irrigation: India. In: Goyal, M. R. (ed.) *Water and Fertigation Management in Micro Irrigation*, pp. 145–174. Apple Academic Press, Oakville.
- Ayars J. E., Bucks D. A., Lamm F. R., Nakayama F. S. (2006):** Introduction. In: Lamm, F. R., Ayars, J. E., Nakayama, F. S. (eds.) *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation, and Management*, pp. 1–26. Elsevier Science, Amsterdam.
- Ayars J. E., Phene C. J., Hutmacher R. B., Davis K. R., Schoneman R. A., Vail S. S., Mead R. M. (1999):** Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agricultural Water Management*, vol. 42, no. 1, pp. 1–27.
- Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. R. (1995):** A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, no. 1-2, pp. 95–120.
- Barth (2019):** *Der Barth-Bericht: Hopfen 2018/2019*. Joh. Barth & Sohn, Nürnberg. Available at: [https://www.barthhaas.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/barth-berichte-broschueren/barth-berichte/deutsch/2010-2020/barth-bericht-2018-2019.pdf](https://www.barthhaas.com/fileadmin/user_upload/downloads/barth-berichte-broschueren/barth-berichte/deutsch/2010-2020/barth-bericht-2018-2019.pdf) (Accessed 14.04.2020).
- Bar-Yosef B. (1991):** Fertilization under drip irrigation. In: Palgrave, D. A. (ed.) *Fluid Fertilizer Science and Technology*, pp. 285–329. Dekker, New York.
- Bavec F., Čeh Brežnik B., Brežnik M. (2003):** Hop yield evaluation depending on experimental plot area under different nitrogen management. *Plant, Soil and Environment*, vol. 49, no. 4, pp. 163–167.
- Behrens T., Kraft M., Wiesler F. (2004):** Influence of measuring angle, nitrogen fertilization, and variety on spectral reflectance of winter oilseed rape canopies. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 167, no. 1, pp. 99–105.

- Behrens T., Müller J., Diepenbrock W. (2006):** Utilization of canopy reflectance to predict properties of oilseed rape (*Brassica napus* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) during ontogenesis. *European Journal of Agronomy*, vol. 25, no. 4, pp. 345–355.
- Biendl M. (2006):** Polyphenole - Pflanzeninhaltsstoffe mit Vermarktungspotenzial. *Hopfenrundschau International*, vol. 2005/2006, pp. 22–27.
- Biendl M., Engelhard B., Forster A., Gahr A., Lutz A., Mitter W., Schmidt R., Schönberger C. (2012):** *Hopfen: Vom Anbau bis zum Bier*. Brauwelt Wissen. Hans Carl, Nürnberg.
- Böhm W. (1979):** *Methods of Studying Root Systems*. Ecological Studies, Analysis and Synthesis, 33. Springer, Berlin.
- Boman B., Obreza T. (2002):** *Fertigation Nutrient Sources and Application Considerations for Citrus*. Institute of Food and Agricultural Sciences. UF/IFAS Extension Circular 1410. Available at: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/CH/CH18500.pdf> (Accessed 05.05.2020).
- Boman B. J. (1995):** Fertigation versus conventional fertilization of flatwoods grapefruit. *Fertilizer Research*, vol. 44, no. 2, pp. 123–128.
- Borde K., Chwoika C., Petermann J., Schmidt U. (1989):** *Hopfen*. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- Bresler E. (1977):** Trickle-Drip Irrigation: Principles and Application to Soil-Water Management. In: Brady, N. C. (ed.) *Advances in Agronomy*, pp. 343–393. Academic Press, New York, London.
- Brunsgaard G., Sørensen J. N., Kaack K., Eggum B. O. (1997):** Protein Quality and Energy Density of Leek (*Allium porrum* L.) as Influenced by Water and Nitrogen Supply and Plant Age at Harvest. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 74, no. 2, pp. 237–243.
- Bryant J. P., Chapin F. S., Klein D. R. (1983):** Carbon/Nutrient Balance of Boreal Plants in Relation to Vertebrate Herbivory. *Oikos*, vol. 40, no. 3, pp. 357–368.
- Bulman P., Zarkadas C. G., Smith D. L. (1994):** Nitrogen Fertilizer Affects Amino Acid Composition and Quality of Spring Barley Grain. *Crop Science*, vol. 34, no. 5, pp. 1341–1346.
- Burt C. M. (1998):** *Chemicals for Fertigation: ITRC Paper 98-002*. Irrigation Training and Research Center. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/aa82/a8774baf806ff8a19e21b3343b85947c61be.pdf> (Accessed 24.04.2020).

- Buschmann C., Langsdorf G., Lichtenthaler H. K. (2000):** Imaging of the Blue, Green, and Red Fluorescence Emission of Plants: An Overview. *Photosynthetica*, vol. 38, no. 4, pp. 483–491.
- Cabrera M. L., Kissel D. E. (1989):** Review and simplification of calculations in <sup>15</sup>N tracer studies. *Fertilizer Research*, vol. 20, no. 1, pp. 11–15.
- Camp C. R., Lamm F. R. (2003):** Irrigation Systems, Subsurface Drip. In: Stewart, B. A., Howell, T. A. (eds.) *Encyclopedia of Water Science*, pp. 560–564. Marcel Dekker, New York.
- Camp C. R., Lamm F. R., Evans R. G., Phene C. J. (2000):** Subsurface Drip Irrigation - Past, Present and Future. *Proceedings of the 4th Decennial Irrigation Symposium*. Phoenix, 14.-16. November 2000, pp. 363–372.
- Čeh B., Kač M., Košir I. J., Abram V. (2007):** Relationships between Xanthohumol and Polyphenol Content in Hop Leaves and Hop Cones with Regard to Water Supply and Cultivar. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 8, pp. 989–1000.
- Cernea S. (2000):** Variability of characters and correlations at hop. *Buletinul Universității de Științe Agricole și Medicină Veterinară Cluj-Napoca. Seria Agricultura și Horticultură*, vol. 54, pp. 11–16.
- Cernea S. (2002):** Experimental results concerning variability of several quantitative characters in hop. *Buletinul Universității de Științe Agricole și Medicină Veterinară Cluj-Napoca. Seria Agricultura și Horticultură*, vol. 57, pp. 107–114.
- Cernea S., Muntean L. S., Salontai A., Morar G., Tofană M., Duda M. M., Vârban D. I., Muntean S., Oros S. (2008):** Studies Regarding the Quantitative Characters of the Cones at Several Hops Cultivars. *Hop and Medicinal Plants*, vol. 16, no. 1-2, pp. 37–41.
- Clark S. M., Vaitheeswaran V., Ambrose S. J., Purves R. W., Page J. E. (2013):** Transcriptome analysis of bitter acid biosynthesis and precursor pathways in hop (*Humulus lupulus*). *BMC plant biology*, vol. 13 (12).
- Cochran D. (2018):** Evaluating the Effects of Nitrogen Fertilization on Cascade Hop Yield. *Farm Progress Reports*, vol. 2017, no. 1 (41).
- Coolong T. (2016):** Weed Management in Crops with Micro Irrigation: A Review. In: Goyal, M. R. (ed.) *Water and Fertigation Management in Micro Irrigation*, pp. 107–128. Apple Academic Press, Oakville.

- Cote C. M., Bristow K. L., Charlesworth P. B., Cook F. J., Thorburn P. J. (2003):** Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*, vol. 22, no. 3, pp. 143–156.
- Craswell E. T., Godwin D. C. (1984):** The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals in different climates. In: Tinker, P. B., Läuchli, A. (eds.) *Advances in Plant Nutrition*, pp. 1–55. Praeger, New York.
- Delahunty K., Johnston J. (2011):** *An Experiment on the Effectiveness of Irrigation and Cover Cropping to Produce Sustainable Hops in Maine: USDA Northeast SARE Final Outreach Report*. Available at: [http://mysare.sare.org/sare\\_project/fne11-711/?page=final&view=print](http://mysare.sare.org/sare_project/fne11-711/?page=final&view=print) (Accessed 24.03.2020).
- Delahunty K., Johnston J. (2014):** *Investigating best practices for timing and amount of organic soluble nitrate fertigation of hops in the Northeast.: 2014 USDA Northeast SARE Final Report FNE 14-796-27806*. Available at: [http://mysare.sare.org/wp-content/uploads/998543FNE14\\_796\\_FinalReport.pdf](http://mysare.sare.org/wp-content/uploads/998543FNE14_796_FinalReport.pdf) (Accessed 28.04.2020).
- Devasirvatham V. (2009):** *A Review of Subsurface Drip Irrigation in Vegetable Production*. Irrigation Matters Series 03/09. Available at: <https://www.irrigationaustralia.com.au/documents/item/277> (Accessed 25.09.2020).
- Doerell E. G. (1927):** Der Einfluss des Kalis auf die wertbestimmenden Bestandteile des Hopfens. *Die Ernährung der Pflanze*, no. 23, pp. 69–71.
- Doerell E. G. (1931):** Die Düngung des Hopfens. In: Honcamp, F. (ed.) *Düngemittel und Düngung*, pp. 770–785. Springer, Berlin.
- Donner P., Ježek J. (2019):** Fertigation Experiment on Saaz Hops in 2017-2019. *Hop Bulletin*, no. 26, pp. 61–68.
- Donner P., Pokorný J., Ježek J., Krofta K., Patzak J., Pulkrábek J. (2020):** Influence of weather conditions, irrigation and plant age on yield and alpha-acids content of Czech hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars. *Plant, Soil and Environment*, vol. 66, no. 1, pp. 41–46.
- EBC (2020):** *Analytica EBC Methods*. European Brewery Convention. Available at: <https://brewup.eu/ebc-analytica/category/chemical-physical/hops-and-hop-products> (Accessed 02.06.2020).
- Eckel A. (1993):** *Untersuchung des Kohlenhydratstoffwechsels von Hopfen (Humulus lupulus L.) in Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Entwicklung der Pflanze*. Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.

- Engelhard B., Kammhuber K., Lutz A., Lachermeier U., Bergmeier M. (2011a):** *Blattflächenentwicklung und Ertragsaufbau wichtiger Hopfensorten*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. LfL-Schriftenreihe 11/2011.
- Engelhard B., Lutz A., Seigner E. (2011b):** *Hopfen für alle Biere der Welt*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. LfL-Information.
- Evans R. G. (1999):** *Microirrigation*. United States Department of Agriculture. Available at: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/21563/Microirrigation.pdf> (Accessed 25.08.2020).
- Evans R. G., Waller P. M. (2006):** Application of Chemical Materials. In: Lamm, F. R., Ayars, J. E., Nakayama, F. S. (eds.) *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation, and Management*, pp. 285–327. Elsevier Science, Amsterdam.
- Fandiño M., Martínez E. M., Rey B. J., Valladares J., Olmedo-Nadal J. L., Mirás-Avalos J. M., Cancela J. J. (2019):** Irrigation scheduling for *Humulus lupulus* (L.) cv. “Nugget”: climate and soil-plant relations. *Brewing Science*, vol. 72, pp. 188–195.
- Fandiño M., Olmedo J. L., Martínez E. M., Valladares J., Paredes P., Rey B. J., Mota M., Cancela J. J., Pereira L. S. (2015):** Assessing and modelling water use and the partition of evapotranspiration of irrigated hop (*Humulus Lupulus*), and relations of transpiration with hops yield and alpha-acids. *Industrial Crops and Products*, vol. 77, pp. 204–217.
- Fox R. H., Piekielek W. P., Macneal K. M. (1994):** Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 25, no. 3-4, pp. 171–181.
- Gärdenäs A. I., Hopmans J. W., Hanson B. R., Šimůnek J. (2005):** Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, vol. 74, no. 3, pp. 219–242.
- Gianquinto G., Goffart J. P., Olivier M., Guarda G., Colauzzi M., Dalla Costa L., Delle Vedove G., Vos J., Mackerron D. K. L. (2004):** The use of hand-held chlorophyll meters as a tool to assess the nitrogen status and to guide nitrogen fertilization of potato crop. *Potato Research*, vol. 47, no. 1-2, pp. 35–80.
- Gingrich C., Hart J., Christensen N. (1994):** *Hops: Fertilizer Guide*. Oregon State University Extension Service. Fertilizer Guide 79. Available at: <https://catalog.extension.oregonstate.edu/fg79> (Accessed 09.08.2020).

- Goese M., Kammhuber K., Bacher A., Zenk M. H., Eisenreich W. (1999):** Biosynthesis of bitter acids in hops. A  $^{13}\text{C}$ -NMR and  $^2\text{H}$ -NMR study on the building blocks of humulone. *European Journal of Biochemistry*, vol. 263, no. 2, pp. 447–454.
- Graf T., Beck M., Mauermeier M., Ismann D., Portner J., Doleschel P., Schmidhalter U. (2014):** Humulus lupulus - The Hidden Half. *Brewing Science*, vol. 67, pp. 161–166.
- 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).
- Hao X., Chang C., Travis G. J. (2004):** Effect of long-term cattle manure application on relations between nitrogen and oil content in canola seed. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 167, no. 2, pp. 214–215.
- Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Skrumsager Moller I., White P. (2012):** Functions of Macronutrients. In: Marschner, P. (ed.) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, 3rd edn., pp. 135–189. Academic Press, Amsterdam.
- Heimler D., Romani A., Ieri F. (2017):** Plant polyphenol content, soil fertilization and agricultural management: a review. *European Food Research and Technology*, vol. 243, no. 7, pp. 1107–1115.
- Heuwinkel H. (1999):** *N<sub>2</sub>-Fixierung von Körnerleguminosen: Aussagekraft und Weiterentwicklung vorhandener Meßmethoden am Beispiel Lupinus albus L.* Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- Huck M. G., Hillel D. (1983):** A Model of Root Growth and Water Uptake Accounting for Photosynthesis, Respiration, Transpiration and Soil Hydraulics. In: Hillel, D. (ed.) *Advances in Irrigation: Volume 2*, pp. 273–333. Academic Press, New York, London.
- IHB (2020):** Internationale Sortenliste des Internationalen Hopfenbaubüros. *Hopfenrundschau*, vol. 71, no. 1, pp. 18–27.
- Iskra A. E., Lafontaine S. R., Trippe K. M., Massie S. T., Phillips C. L., Twomey M. C., Shellhammer T. H., Gent D. H. (2019):** Influence of Nitrogen Fertility Practices

on Hop Cone Quality. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, vol. 77, no. 3, pp. 199–209.

**Janczyk M., Pfister R. (2019):** Varianzanalyse mit Messwiederholung. In: Janczyk, M., Pfister, R. (eds.) *Inferenzstatistik Verstehen: Von A wie Signifikanztest bis Z wie Konfidenzintervall*, 3rd edn., pp. 147–157. Springer, Berlin.

**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](http://www.haifa-group.com/files/Articles/ifa_fertigation-Kafkafi-511.pdf) (Accessed 24.08.2020).

**Kammhuber K. (2005):** Differenzierung des Welthopfensortiments nach Bitterstoffen und Polyphenolen. *Hopfenrundschau International*, vol. 2005/2006, pp. 42–46.

**Kammhuber K. (2008a):** Die antimikrobiellen und bakteriostatischen Eigenschaften des Hopfens. *Internationales Hopfensymposium: Hopfenanbau 2020*. Wolnzach, 5.-6. Mai 2008. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn, pp. 22–23.

**Kammhuber K. (2008b):** Entwicklung von Analysenmethoden für die Hopfenpolyphenole. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (ed.) *Jahresbericht 2007: Sonderkultur Hopfen*, pp. 79–81, Freising-Weihenstephan.

**Keller K. R., Magee R. A. (1952):** The Relationship of the Total Soft Resin, Alpha Acid, and Beta Fraction Percentages with Yield of Strobiles in Hops. *Agronomy Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 93–96.

**Keller K. R., Magee R. A. (1954):** The Effect of Application Rates of Nitrogen, Phosphorus, and Potash on Some Chemical Constituents in Two Varieties of Hops. *Agronomy Journal*, vol. 46, no. 8, pp. 388–391.

**Keukeleire J. de, Janssens I., Heyerick A., Ghekiere G., Cambie J., Roldan-Ruiz I., van Bockstaele E., Keukeleire D. de (2007):** Relevance of Organic Farming and Effect of Climatological Conditions on the Formation of Alpha-Acids, Beta-Acids, Desmethylxanthohumol, and Xanthohumol in Hop (*Humulus Lupulus L.*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 55, no. 1, pp. 61–66.

**Kindl H. (1991):** Katabolismus: Mobilisierung von Reservestoffen. In: Kindl, H. (ed.) *Biochemie der Pflanzen*, 3rd edn., pp. 284–321. Springer, Berlin, Heidelberg.

**Kohlmann H., Kastner A. (1975):** *Der Hopfen*. Hopfen-Verlag, Wolnzach.

**Konica Minolta (ed.) (2013):** *Chlorophyll Meter SPAD-502Plus: Instruction Manual*, Japan.

- Kopecký J., Slašík L. (1997):** Influence of trickle irrigation on the yield stability and quality of hops in Žatec hop region. *Rostlinna Vyroba*, vol. 43, no. 7, pp. 337–341.
- Kopecký J., Slašík L., Ježek P. (1998):** Production efficiency of trickle irrigation of hop. *Rostlinna Vyroba*, vol. 44, no. 7, pp. 299–303.
- Koren J. (2007):** Influence of plantation row spacing on quality and yield of hops. *Plant, Soil and Environment*, vol. 53, no. 6, pp. 276–282.
- Kučera J., Krofta K. (2009):** Mathematical Model for Prediction of Alpha Acid Contents from Meteorological Data for 'Saaz' Aroma Variety. *Acta Horticulturae*, no. 848, pp. 131–140.
- Lamm F. R. (2002):** *Advantages and Disadvantages of Subsurface Drip Irrigation*. Available at: <http://fyi.uwex.edu/cropirrigation/files/2015/12/Adv-Disadv-SDI-KS-2002-Lamm.pdf> (Accessed 18.07.2020).
- Lamm F. R., Camp C. R. (2006):** Subsurface Drip Irrigation. In: Lamm, F. R., Ayars, J. E., Nakayama, F. S. (eds.) *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation, and Management*, pp. 473–551. Elsevier Science, Amsterdam.
- LDBV (2020):** *BayernAtlas*. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, München. Available at: <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/?topic=ba&lang=de&bgLayer=atkis&catalogNodes=11,122> (Accessed 01.06.2020).
- LfL (2020a):** *Agrarmeteorologie Bayern*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan. Available at: <https://www.am.rlp.de/Internet/AM/NotesBAM.nsf/bamweb/4f5959ce877d0ba3c1257392004c64fc?OpenDocument> (Accessed 01.06.2020).
- LfL (2020b):** *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](https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/hopfen_gr%C3%BCnes_heft_2020.pdf) (Accessed 25.09.2020).
- LfU (2020):** *Umwelt-Atlas Bayern: Boden*. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg. Available at: <https://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/kartendienste/umweltatlas/index.htm> (Accessed 01.06.2020).
- Li F., Gnyp M. L., Jia L., Miao Y., Yu Z., Koppe W., Bareth G., Chen X., Zhang F. (2008):** Estimating N status of winter wheat using a handheld spectrometer in the North China Plain. *Field Crops Research*, vol. 106, no. 1, pp. 77–85.
- Li J., Jingping Y., Pinpin F., Junlan S., Dongsheng L., Changshui G., Wenyue C. (2009):** Responses of rice leaf thickness, SPAD readings and chlorophyll a/b ratios

to different nitrogen supply rates in paddy field. *Field Crops Research*, vol. 114, no. 3, pp. 426–432.

**Li J., Zhang J., Ren L. (2003):** Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. *Irrigation Science*, vol. 22, no. 1, pp. 19–30.

**Linke W., Rebl A. (1950):** *Der Hopfenbau: Eine Anleitung für Praxis und Unterricht über Anbau, Pflege, Schädlingsbekämpfung und Ernte*, 2nd edn. Hans Carl, Nürnberg.

**Lutz A. (2013):** Persönliche Mitteilung, 25 Februar.

**Lutz A., Kneidl J., Seigner E., Kammhuber K. (2009):** *Hopfenqualität - Ernte zum richtigen Zeitpunkt*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. LfL-Information.

**Lutz K. (2019):** *Wirkung letaler Hopfenwelke-Stämme (Verticillium nonalfalfae) und unterschiedlicher Stickstoff-Düngeniveaus auf die Zeigerpflanze Aubergine (Solanum melongena L.)*. Masterarbeit. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.

**Mackie-Dawson L. A., Pratt S. M., Millard P. (1994):** Root growth and nitrogen uptake in sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) seedlings in relation to nitrogen supply. *Plant and Soil*, vol. 158, no. 2, pp. 233–238.

**Magen H. (1995):** *Fertigation: An overview of some practical aspects*. ICL Fertilizers. Available at: [http://www.iclfertilizers.com/Fertilizers/Knowledge%20Center/Fertigation\\_overview\\_of\\_practical\\_aspects.pdf](http://www.iclfertilizers.com/Fertilizers/Knowledge%20Center/Fertigation_overview_of_practical_aspects.pdf) (Accessed 24.01.2020).

**Mahaffee W. F., Pethybridge S. J., Gent D. H., eds. (2009):** *Compendium of Hop Diseases and Pests*. APS Press, St. Paul.

**Mander L., Liu H., eds. (2010):** *Comprehensive Natural Products II: Chemistry and Biology*. Elsevier Science, Amsterdam.

**Markwell J., Osterman J. C., Mitchell J. L. (1995):** Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, vol. 46, no. 3, pp. 467–472.

**Michel R., Sourell H., eds. (2014):** *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Erling, Clenze.

**Millard P., Neilson G. H. (1989):** The Influence of Nitrogen Supply on the Uptake and Remobilization of Stored N for the Seasonal Growth of Apple Trees. *Annals of Botany*, vol. 63, no. 3, pp. 301–309.

**Moran J. A., Mitchell A. K., Goodmanson G., Stockburger K. A. (2000):** Differentiation Among Effects of Nitrogen Fertilization Treatments on Conifer Seedlings by Foliar

Reflectance: A Comparison of Methods. *Tree Physiology*, vol. 20, no. 16, pp. 1113–1120.

**Mozny M., Tolasz R., Nekovar J., Sparks T., Trnka M., Zalud Z. (2009):** The impact of climate change on the yield and quality of Saaz hops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 149, no. 6-7, pp. 913–919.

**Muñoz-Huerta R. F., Guevara-Gonzalez R. G., Contreras-Medina L. M., Torres-Pacheco I., Prado-Olivarez J., Ocampo-Velazquez R. V. (2013):** A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 10823–10843.

**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.

**Nakawuka P. (2013):** *Effect of Deficit Irrigation on Yield, Quality and Grower Returns of Native Spearmint and Hops in Washington State*. Dissertation. Washington State University, Pullman.

**Nakawuka P., Peters T. R., Kenny S., Walsh D. (2017):** Effect of deficit irrigation on yield quantity and quality, water productivity and economic returns of four cultivars of hops in the Yakima Valley, Washington State. *Industrial Crops and Products*, no. 98, pp. 82–92.

**Neilsen D., Hogue E. J., Neilson G. H., Parchomchuk P. (1995):** Using SPAD-502 Values to Assess the Nitrogen Status of Apple Trees. *HortScience*, vol. 30, no. 3, pp. 508–512.

**Neilsen D., Parchomchuk P., Neilson G. H., Hogue E. J. (1998):** Using Soil Solution Monitoring to Determine the Effects of Irrigation Management and Fertigation on Nitrogen Availability in High-density Apple Orchards. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 123, no. 4, pp. 706–713.

**Neve R. A. (1991):** *Hops*. Chapman and Hall, London.

**Ng Kee Kwong K. F., Paul J. P., Deville J. (1999):** Drip Fertigation - A Means for Reducing Fertilizer Nitrogen to Sugarcane. *Experimental Agriculture*, vol. 35, no. 1, pp. 31–37.

**Nguyen P. M., Niemeyer E. D. (2008):** Effects of Nitrogen Fertilization on the Phenolic Composition and Antioxidant Properties of Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 56, no. 18, pp. 8685–8691.

- Okada Y., Ito K. (2001):** Cloning and Analysis of Valerophenone Synthase Gene Expressed Specifically in Lupulin Gland of Hop (*Humulus lupulus* L.). *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, vol. 65, no. 1, pp. 150–155.
- Padilla F. M., Gallardo M., Peña-Fleitas M. T., Souza R. de, Thompson R. B. (2018):** Proximal Optical Sensors for Nitrogen Management of Vegetable Crops: A Review. *Sensors*, vol. 18, no. 7 (2018).
- Paschold P. J. (2010):** Steuern und Regeln der Bewässerung. In: Paschold, P. J. (ed.) *Bewässerung im Gartenbau*, pp. 81–115. Ulmer, Stuttgart.
- Pavlovic V., Pavlovic M., Cerenak A., Kosir I. J., Čeh B., Rozman C., Turk J., Pazek K., Krofta K., Gregoric G. (2012):** Environment and weather influence on quality and market value of hops. *Plant, Soil and Environment*, vol. 58, no. 4, pp. 155–160.
- Pavlovic V., Pavlovic M., Rozman C., Udovc A., Stajniko D., Wang D., Gavric M., Srecec S. (2013):** Market value assessment of hops by modeling of weather attributes. *Plant, Soil and Environment*, vol. 59, no. 6, pp. 267–272.
- 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).
- Potop V. (2014):** The impact of dry and wet events on the quality and yield of Saaz hops in the Czech hop growing regions. *Conference Proceedings: Mendel and Bioclimatology International Conference*. Brno, 3.-5. September 2014, pp. 329–342.
- R Core Team (2020):** *R: A language and environment for statistical computing* [Computer program].
- Raine S. R., Foley J. P. (2001):** Application Systems for Cotton Irrigation - Are You Asking the Right Questions and Getting the Answer Right? *Growing opportunities. Irrigation 2001 National Conference*. Toowoomba, 11.-12. July 2001, o. S.
- Rathke G. W., Christen O., Diepenbrock W. (2005):** Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations. *Field Crops Research*, vol. 94, no. 2-3, pp. 103–113.
- Ravier C., Quemada M., Jeuffroy M. H. (2017):** Use of a chlorophyll meter to assess nitrogen nutrition index during the growth cycle in winter wheat. *Field Crops Research*, vol. 214, pp. 73–82.

- Richardson A. D., Duigan S. P., Berlyn G. P. (2002):** An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*, vol. 153, no. 1, pp. 185–194.
- Roßbauer G. (1985):** *Anleitung Für die Anlage und Ertragsermittlung von Hopfenversuchen. Internes Dokument.* Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Roßbauer G. (1998):** Stickstoffdüngerversuche nach Nmin. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (ed.) *Jahresbericht 1997: Sonderkultur Hopfen*, pp. 66–67, Freising-Weihenstephan.
- Roßbauer G., Buhr L., Hack H., Hauptmann S., Klose R., Meier U., Stauss R., Weber E. (1995):** Phänologische Entwicklungsstadien von Kultur-Hopfen (*Humulus lupulus* L.): Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala mit Abbildungen. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, vol. 47, no. 10, pp. 249–253.
- Rostami M., Koocheki A. R., Mahallati M. N., Kafi M. (2008):** Evaluation of Chlorophyll Meter (SPAD) Data for Prediction of Nitrogen Status in Corn (*Zea mays* L.). *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 79–85.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. (1974):** Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resource Technology Satellite-1 Symposium: Volume 1: Technical Presentations Section A.* Washington D.C., 10.-14. December 1973. National Aeronautics and Space Administration, pp. 309–318.
- Rybacek V., ed. (1991):** *Hop Production.* Elsevier Science, Amsterdam.
- Samborski S. M., Fallon E., Tremblay N. (2009):** Strategies to Make Use of Plant Sensors-Based Diagnostic Information for Nitrogen Recommendations. *Agronomy Journal*, vol. 101, no. 4, pp. 800–816.
- Savva A. P., Frenken K. (2002):** *Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling: Irrigation Manual - Module 4.* Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: [www.fao.org/3/a-ai593e.pdf](http://www.fao.org/3/a-ai593e.pdf) (Accessed 25.01.2020).
- Schächtl J. (2004):** *Sensorgestützte Bonitur von Aufwuchs und Stickstoffversorgung bei Weizen- und Kartoffelbeständen.* Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.

- Schäufele W. R. (1966):** *Zur Frage der Nährstoffversorgung und Ernährung des Hopfens in den süddeutschen Anbaugebieten - unter besonderer Berücksichtigung des Magnesiums.* Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen.
- Schepers J. S., Blackmer T. M., Francis D. D. (1998):** Chlorophyll Meter Method for Estimating Nitrogen Content in Plant Tissue. In: Kalra, Y. P. (ed.) *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*, pp. 129–136. CRC Press, Boca Raton.
- Schepers J. S., Francis D. D., Vigil M., Below F. E. (1992):** Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 23, no. 17-20, pp. 2173–2187.
- Schlemmer M., Gitelson A., Schepers J., Ferguson R., Peng Y., Shanahan J., Rundquist D. (2013):** Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 25, no. December 2013, pp. 47–54.
- 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/ihm/hydrologie/ressourcen/dateien/forschung/Projekte/saphir/atlantefolder/atlas\\_tropfer.pdf?lang=de](https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/ihm/hydrologie/ressourcen/dateien/forschung/Projekte/saphir/atlantefolder/atlas_tropfer.pdf?lang=de) (Accessed 20.01.2020).
- Schwankl L. J., Hanson L. R. (2006):** Surface Drip Irrigation. In: Lamm, F. R., Ayars, J. E., Nakayama, F. S. (eds.) *Microirrigation for Crop Production: Design, Operation, and Management*, pp. 431–472. Elsevier Science, Amsterdam.
- Scotford I. M., Miller P. C. H. (2004a):** Combination of Spectral Reflectance and Ultrasonic Sensing to monitor the Growth of Winter Wheat. *Biosystems Engineering*, vol. 87, no. 1, pp. 27–38.
- Scotford I. M., Miller P. C. H. (2004b):** Estimating Tiller Density and Leaf Area Index of Winter Wheat using Spectral Reflectance and Ultrasonic Sensing Techniques. *Biosystems Engineering*, vol. 89, no. 4, pp. 395–408.
- Scotford I. M., Miller P. C. H. (2005):** Applications of Spectral Reflectance Techniques in Northern European Cereal Production: A Review. *Biosystems Engineering*, vol. 90, no. 3, pp. 235–250.
- Seiffert S. (1995):** *Stickstoffernährung von Hopfen (Humulus lupulus L.) und Stickstoffhaushalt im Tettlinger Hopfenanbau* (Dissertation). Ulrich Grauer, Stuttgart.

- Seiffert S., Claassen N. (1993):** Wurzelwachstum, N-Aufnahme und Ertrag von Hopfen. *Qualität und Hygiene von Lebensmitteln in Produktion und Verarbeitung: Vorträge zum Generalthema des 105. VDLUFA-Kongresses vom 20.-25.9.1993 in Hamburg und weitere Beiträge aus den Sitzungen der Fachgruppen*, Darmstadt, pp. 83–86.
- Shock C. C. (2013):** *Drip Irrigation: An Introduction*. Oregon State University, Sustainable Agriculture Techniques 8782. Available at: [http://extension.oregonstate.edu/sorec/sites/default/files/drip\\_irrigation\\_em8782.pdf](http://extension.oregonstate.edu/sorec/sites/default/files/drip_irrigation_em8782.pdf) (Accessed 28.08.2020).
- Skaggs T. H., Trout T. J., Rothfuss Y. (2010):** Drip Irrigation Water Distribution Patterns: Effects of Emitter Rate, Pulsing, and Antecedent Water. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 74, no. 6, pp. 1886–1896.
- Slašík L. (2000):** Utilization of trickle irrigation and microsprinkling in hop irrigation. *Roslinna Vyroba*, vol. 46, no. 10, pp. 457–463.
- Small E. (1978):** A Numerical and Nomenclatural Analysis of Morpho-Geographic Taxa of *Humulus*. *Systematic Botany*, vol. 3, no. 1, pp. 37–76.
- Sne M. (2006):** *Guidelines for planning and design of micro irrigation in arid and semi-arid regions*. International Commission on Irrigation and Drainage, Neu Delhi.
- Spicker A. B. (2017):** *Entwicklung von Verfahren der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winterraps (*Brassica napus* L.) auf Grundlage reflexionsoptischer Messungen*. Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- Srečec S., Čeh B., Ciler T. S., Rus A. F. (2013):** Empiric Mathematical Model for Predicting the Content of Alpha-Acids in Hop (*Humulus lupulus* L.) Cv. Aurora. *Springer-Plus*, vol. 2, no. 1 (59).
- Srečec S., Kvaternjak I., Kaučić D., Marić V. (2004):** Dynamics of Hop Growth and Accumulation of  $\alpha$ -acids in Normal and Extreme Climatic Conditions. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, vol. 69, no. 2-3, pp. 59–62.
- Srečec S., Kvaternjak I., Kaučić D., Špoljar A., Erhatic R. (2008):** Influence of Climatic Conditions on Accumulation of  $\alpha$ -acids in Hop Cones. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, vol. 73, no. 3, pp. 161–166.
- Stampfl J. (2013):** *Auswirkungen eines Wasserdefizits am Ende der generativen Phase auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen (*Humulus lupulus*)*. Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising-Weihenstephan.

- Stampfl J. (2017):** *Auswirkungen von Fertigation und Tropfschlauchpositionierung auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen (Humulus lupulus)*. Masterarbeit. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- Steenackers B., De Cooman L., De Vos D. (2015):** Chemical Transformations of Characteristic Hop Secondary Metabolites in Relation to Beer Properties and the Brewing Process: A Review. *Food Chemistry*, vol. 172, no. April 2015, pp. 742–756.
- Strasburger E., Sitte P. (1991):** *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*, 33rd edn. Fischer, Stuttgart.
- Svoboda P., Hniličková H., Hnilička F. (2008):** Changes in Yield and Quality of Hop Depending on the Irrigation: Supplement: Proceedings of the VII. Alps-Adria Scientific Workshop, 28 April-2 May 2008, Stara Lesna, Slovakia. *Cereal Research Communications*, vol. 36, pp. 891–894.
- Takebe M., Yoneyama T., Inada K., Murakami T. (1990):** Spectral reflectance ratio of rice canopy for estimating crop nitrogen status. *Plant and Soil*, vol. 122, no. 2, pp. 295–297.
- Takle B., Cochran D. (2017):** Evaluating the Effects of Nitrogen Fertilization on Hop Yield. *Farm Progress Reports*, vol. 2016, no. 1 (28).
- Thomas E. (2006):** *Feldversuchswesen*. Ulmer, Stuttgart.
- Thomas G. G. (1967):** Hop studies by the late I. H. Williams. In: Wye College (ed.) *Annual Report Department of Hop Research 1966*, pp. 63–67, Ashford.
- Thomas G. G. (1982):** Stages in the annual growth cycle of the perennial hop (*Humulus lupulus* L.) under English conditions. In: Wye College (ed.) *Annual Report Department of Hop Research 1981*, pp. 35–39, Ashford.
- Thomas G. G., Schwabe W. W. (1969):** Factors Controlling Flowering in the Hop (*Humulus lupulus* L.). *Annals of Botany*, vol. 33, no. 132, pp. 781–793.
- Thomas G. G., Schwabe W. W. (1970):** Apical Morphology in the Hop (*Humulus lupulus* L.) during Flower Initiation. *Annals of Botany*, vol. 34, no. 137, pp. 849–859.
- Thompson F. C., Burgess A. H. (1952):** Influence of Mineral Nutrition on the Resin Content of the Hop Cone. *Nature*, vol. 170, no. 4334, p. 890.
- Thornton B., Millard P., Galloway S. (1993):** The Effects of Temperature and Form of Nitrogen Supply on the Relative Contribution of Root Uptake and Remobilization in Supplying Nitrogen for Laminae Regrowth of *Lolium perenne* L. *Journal of Experimental Botany*, vol. 44, no. 10, pp. 1601–1606.

- Tsurumaru Y., Sasaki K., Miyawaki T., Uto Y., Momma T., Umemoto N., Momose M., Yazaki K. (2012):** HIPT-1, a membrane-bound prenyltransferase responsible for the biosynthesis of bitter acids in hops. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, vol. 417, no. 1, pp. 393–398.
- VDLUFA (2000):** *VDLUFA-Methodenbuch: Band II.2 Die Untersuchung von Sekundärrohstoffdüngern, Kultursubstraten und Bodenhilfsstoffen, 1. und 2. Ergänzungslieferung*, 4th edn., Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Hrsg. von Rolf Bassler ; Bd. 2.1. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (2012):** *VDLUFA-Methodenbuch: Band I Die Untersuchung von Böden, 1. - 6. Teillieferung*. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Vermeiren L., Jobling G. A. (1980):** *Localized Irrigation: Design, Installation, Operation, Evaluation*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 36. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom.
- Vogelmann T. C., Evans J. R. (2002):** Profiles of light absorption and chlorophyll within spinach leaves from chlorophyll fluorescence. *Plant, Cell and Environment*, vol. 25, no. 10, pp. 1313–1323.
- Wample R. L., Farrar S. L. (1983):** Yield and Quality of Furrow and Trickle Irrigated Hop (*Humulus lupulus* L.) in Washington State. *Agricultural Water Management*, vol. 7, no. 4, pp. 457–470.
- Wiesler F. (2012):** Nutrition and Quality. In: Marschner, P. (ed.) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, 3rd edn., pp. 271–282. Academic Press, Amsterdam.
- Wiesler F., Dickmann J., Horst W. J. (1997):** Effects of nitrogen supply on growth and nitrogen uptake by *Miscanthus sinensis* during establishment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 160, no. 1, pp. 25–31.
- Williams I. H. (1960):** Changes in the carbohydrate balance of the hop in relation to the annual growth cycle in young plants. In: Wye College (ed.) *Annual Report Department of Hop Research 1959*, pp. 98–106, Ashford.
- Wood C. W., Tracy P. W., Reeves D. W., Edmisten K. L. (1992):** Determination of cotton nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. *Journal of Plant Nutrition*, vol. 15, no. 9, pp. 1435–1448.
- Yang H., Yang J., Lv Y., He J. (2014):** SPAD Values and Nitrogen Nutrition Index for the Evaluation of Rice Nitrogen Status. *Plant Production Science*, vol. 17, no. 1, pp. 81–92.

- Yoneyama T., Ito O., Engelaar W. (2003):** Uptake, metabolism and distribution of nitrogen in crop plants traced by enriched and natural  $^{15}\text{N}$ : Progress over the last 30 years. *Phytochemistry Reviews*, vol. 2, no. 1-2, pp. 121–132.
- Zattler F. (1934):** *Beiträge zur Kenntnis der Nährstoffaufnahme der Pflanze: Wasserkulturversuche mit Hopfen bei zeitweiliger Darbietung und Entziehung von Kalium, Phosphor, Stickstoff und Kalcium.* Praktische Blätter für Pflanzenbau und Pflanzenschutz 12 Heft 4/5.
- Zattler F. (1936):** Neuere Untersuchungen über die Nährstoffaufnahme des Hopfens. *Allgemeine Brauer- und Hopfenzeitung*, vol. 76, pp. 669–671.
- Zattler F. (1949):** Querschnitt durch den gegenwärtigen Stand der Hopfenforschung. *Brauwissenschaft*, no. 12, pp. 177–184.
- Zattler F. (1954a):** Beiträge zur Kenntnis des Nährstoffhaushaltes der Hopfenpflanze: Untersuchungen über die herbstliche Nährstoffrückwanderung und die Wirkung des vorzeitigen Abschneidens der Hopfenreben. *Hopfenrundschau*, no. 5, pp. 228–230.
- Zattler F. (1954b):** Beiträge zur Kenntnis des Nährstoffhaushaltes der Hopfenpflanze: Untersuchungen über die herbstliche Nährstoffrückwanderung und die Wirkung des vorzeitigen Abschneidens der Hopfenreben. *Hopfenrundschau*, no. 5, pp. 193–200.
- Zattler F. (1956a):** Beiträge zur Kenntnis des Nährstoffhaushaltes der Hopfenpflanze II: Untersuchungen über die Ernährungsphysiologie des Hopfens unter neuzeitlichen Kulturverhältnissen. *Hopfenrundschau*, no. 7, pp. 54–56.
- Zattler F. (1956b):** Beiträge zur Kenntnis des Nährstoffhaushaltes der Hopfenpflanze II: Untersuchungen über die Ernährungsphysiologie des Hopfens unter neuzeitlichen Kulturverhältnissen. Teil 2: Die Nährstoffrückwanderung und der Verlust an Nährstoffen durch Auswaschung aus den oberirdischen Teilen des Hopfens in der Zeit von der Pflücke bis zum Spätherbst. *Hopfenrundschau*, no. 7, pp. 72–76.
- Zattler F. (1956c):** Beiträge zur Kenntnis des Nährstoffhaushaltes der Hopfenpflanze II: Untersuchungen über die Ernährungsphysiologie des Hopfens unter neuzeitlichen Kulturverhältnissen. Teil 4: Nährstoffverbrauch einer Hopfenernte Für die Sorte Halbertauer. *Hopfenrundschau*, no. 7, pp. 85–88.
- Zattler F. (1965):** Hopfen (*Humulus Lupulus L.*). In: Linser, H. (ed.) *Düngung der Kulturpflanzen*, pp. 1097–1133. Springer, Wien.
- Zattler F., Jehl J. (1951):** Bericht über die Versuchs- und Forschungstätigkeit auf dem Hopfenversuchsgut Hüll 1926-1951. In: Deutsche Gesellschaft für Hopfenforschung

e.V. (ed.) *25 Jahre im Dienste der Deutschen Hopfenforschung: Jubiläumsschrift der Deutschen Gesellschaft für Hopfenforschung (e.V.)*, München.

**Zattler F., Kleber W., Schmid P. (1960):** Untersuchungen über den Gehalt an Alpha-säuren während der Reifung des Hopfens. *Brauwissenschaft*, no. 13, pp. 72–74.

**Zebarth B. J., Drury C. F., Tremblay N., Cambouris A. N. (2009):** Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 89, no. 2, pp. 113–132.

**Zheng H., Liu Y., Qin Y., Chen Y., Fan M. (2015):** Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter. *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 14, no. 1, pp. 190–195.

# Curriculum Vitae

## PERSÖNLICHE DATEN

---

Geburtsdatum:	21.03.1991
Geburtsort:	Freising

## BERUFSERFAHRUNG

---

03/2017 - 12/2020	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Wolnzach Wissenschaftlicher Mitarbeiter / Doktorand
12/2013 - 10/2016	Landwirtschaftlicher Familienbetrieb (Hopfen) Mitarbeiter
04/2013 - 11/2013	Roy Farms Inc, Moxee, WA, USA Ohio International Agricultural & Horticultural Intern Program Praktikant
08/2012 - 08/2012	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Wolnzach Praktikant
04/2011 - 08/2011	Naderer S&M Natur GbR, Kirchdorf a.d. Amper Praktikant
09/2007 - 07/2008	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Hüll Praktikant

## STUDIUM & SCHULBILDUNG

---

04/2015 - 02/2017	Technische Universität München, Freising Studiengang Agrarmanagement (M. Sc.)
04/2014 - 03/2015	Technische Universität München, Freising Studiengang Agrarwissenschaften
10/2009 - 03/2013	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising Studiengang Landwirtschaft (B. Sc.)
09/2007 - 07/2009	Staatliche Fachoberschule Schönbrunn, Landshut Fachrichtung Agrarwirtschaft (Fachabitur)
09/2001 - 07/2007	Hallertau Gymnasium, Wolnzach