



Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Lehrstuhl für Pflanzenernährung

Tröpfchenbewässerung im Hopfenbau - Feldversuche, Physiologie und Rhizosphäre

Tobias M. Graf

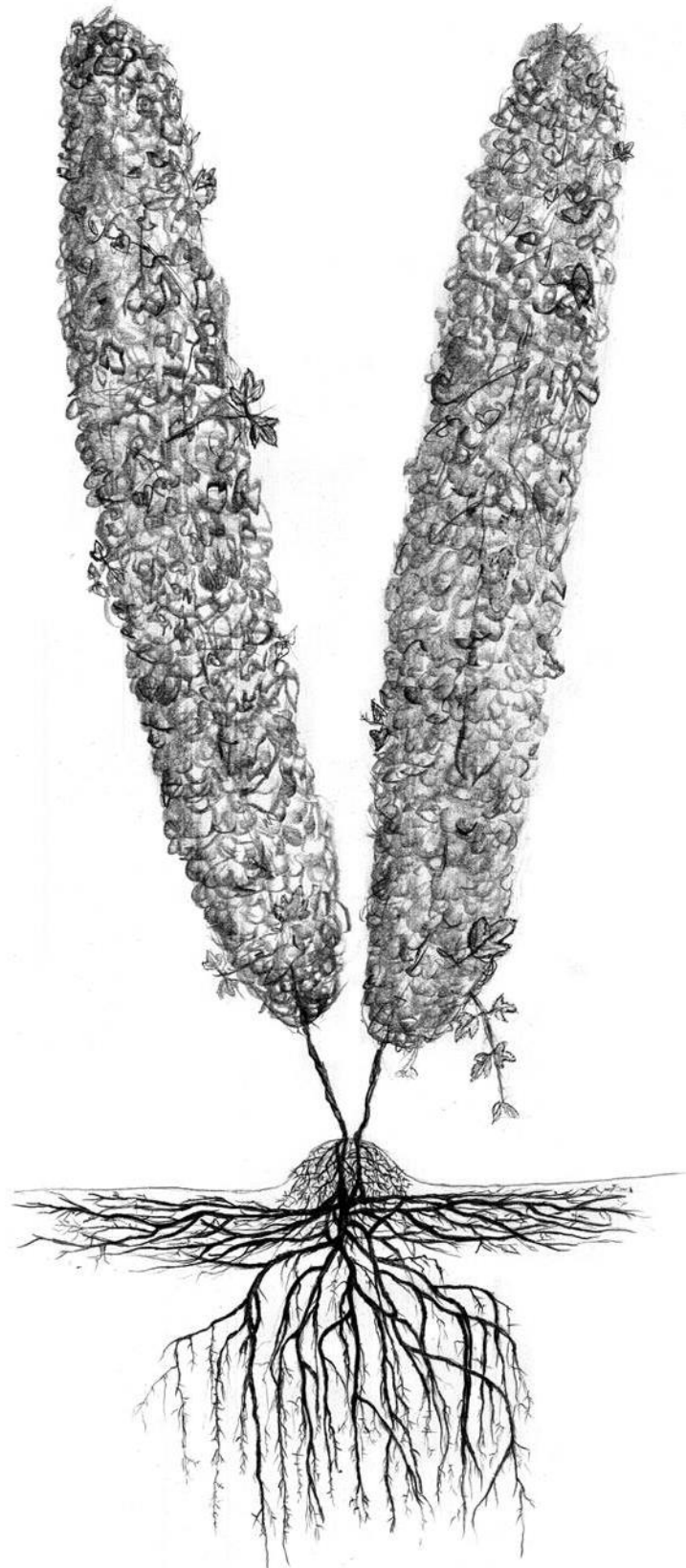
Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Rainer Matyssek
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Urs Schmidhalter
2. apl. Prof. Dr. Eckart Priesack

Die Dissertation wurde am 09.06.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 14.09.2016 angenommen.



Für Ok

Teile dieser Arbeit wurden in folgenden Beiträgen publiziert:

Graf, T., Beck, M., Mauermeier, M., Ismann, D., Portner, J., Doleschel, P., Schmidhalter, U. (2014). *Humulus lupulus* – The Hidden Half. *Brewing Science* 67, 161–166.

Graf, T., Beck, M., Portner, J., Baumgartner, A., Mauermeier, M., Ismann, D., Maier, M., Schmidhalter, U. (2016): A new approach for predicting the water balance of hops, *Acta Hort.*, Proceedings of the 4th International Humulus Symposium. (eingereicht am 15.09.15)

Sobotik, M., **Graf, T.**, Himmelbauer, M., Bodner, G., Loiskandl W. (2016): Wurzelfreilegungen von Hopfen und Mais in Wolnzach, Hallertau, *Mitteilungen Agrarwissenschaften* 31 (2016). (eingereicht am 13.01.16)

Graf, T., Beck, M. (2016): Abschlussbericht des DBU-Projektes Az 27866 „Optimierung des Bewässerungsmanagements im Hopfenbau“

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Bachelorarbeiten betreut:

Stampfl, J. (2013): Auswirkungen eines Wasserdefizits am Ende der generativen Phase auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen (*Humulus lupulus*), Bachelorarbeit an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät Land- und Ernährungswirtschaft, Studiengang Landwirtschaft

Fuß, E. (2014): Evaluierung von verschiedenen Methoden zur Erfassung von Trockenstress bei Hopfen in der Hallertau, Bachelorarbeit an der Technischen Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Lehrstuhl für Pflanzenernährung

Thies, N. (2015) Evaluierung verschiedener Messmethoden von Trockenstress bei Hopfen (*Humulus lupulus*) in einem Gefäßversuch, Bachelorarbeit an der Technischen Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Lehrstuhl für Pflanzenernährung

Diese Arbeit wurde gefördert von der
Deutschen Bundestiftung Umwelt.

gefördert durch



Deutsche
Bundestiftung Umwelt

www.dbu.de

DANKE AN...

...meinen Doktorvater **Prof. Dr. Urs Schmidhalter** für die Betreuung dieser Doktorarbeit, verbunden mit unzähligen angenehmen und konstruktiven Gesprächen sowie für die kompetente Hilfe in fachlichen Fragen, **Prof. Dr. Eckart Priesack** für die freundliche Übernahme der Zweitkorrektur, **Prof. Dr. Rainer Matyssek** für die Hilfe bei den Gaswechsellauswertungen und den Prüfungsvorsitz, **Dr. Michael Beck**, mein „Doktoronkel“ und Projektleiter, für die vielen netten und hilfreichen Philosophiestunden, für die tatkräftige Unterstützung in der Planung und Durchsetzung des Projektes, **IPZ 5** von der LfL, insbesondere **Michael Mauermeier, Margret Meier, Daniel Ismann, Anna, Sonja und Theresa Baumgartner, Marina Jereb, Jakob Münsterer, Johann Schätzl, Elke Fischer, Birgit Krenauer, Alexandra Hertwig, Maria Lutz, Erich Niedermeier, Stefan Fuß, Dr. Florian Weihrauch, Anton Lutz, Dr. Stefan Seefelder, Dr. Elisabeth Seigner, Jutta Kneidl, Johann Portner, Wolfgang Sichelstiel, Sebastian Grünberger, Monika Pichlmeyer, Felix König** und **Dr. Peter Doleschel**, für eure tatkräftige Hilfe und die Tatsache, dass ich mit euch eine tolle Zeit in der schönen Halledau hatte, die Abteilung **Pflanzenernährung** der TUM, insbesondere **Dr. Sebastian Kipp, Friederike Gnädinger, Gero Barmeier, Elisabeth Becker, Dr. Manuela Gaßner, Dr. Sabine v. Tucher, Jürgen Plass, Claudia Buchhart, Wolfgang Heer, Erika Schmid, Erna Look**, und **den Dürnastern**, für eure Hilfe, die Aufzucht und Pflege meiner Hopfenpflanzen und für die nette Aufnahme in euer Team, **Dr. Erich Lehmailr** für dein freundschaftliches Mentoring dieser Arbeit, für deine gute, kritische Auseinandersetzung mit meinen Gedanken und Ideen und deine Offenheit bei allen Fragen, die **Deutsche Bundesstiftung Umwelt** für die finanzielle Unterstützung, die **Hopfenverwertungsgenossenschaft HVG** um **Dr. Johann Pichlmaier**, nicht nur für die finanzielle Unterstützung des Projektes, sondern auch für unzählige aufheiternde Events rund um das Thema Hopfen, inklusive **Hopfenpflanzerverband** um **Ottmar Weingarten** und **Werner Brunner** und dem **Hopfenring** um **Ludwig Hörmannsperger** mit seinem gesamten **Team**, euch auch für eine tolle Zeit während den GV, **Silke Krehbiel** von LfL-AZV für Sorgenlösungen in Finanz- und Verwaltungsfragen, **Johann Hainzinger** von der HSWT für Elektrizität im Hopfengarten, **Angela Werner** von der TLL für die zuvorkommende Unterstützung im Gebiet Elbe-Saale, **Robert Brandhuber, Jürgen Kler** und **Melanie Treisch (LfL-IAB)** für die Hilfe in Sachen Bodenkunde, die Abteilung für Obstbau TUM, **Prof. Dr. Dieter Treutter**, insbesondere **Ina Tittel**, für die freundliche Unterstützung bei der Erforschung der Anatomie von Hopfen, meine Bachelorstudenten **Elisabeth Fuß, Johannes Stampfl** und **Nicolas Thies**, die Familien **Stefan Wöhrmann, Eduard Huber, Korbinian Stampfl** und **Florian Bogensberger**, die **Wasserzweckverbände** Au in der Hallertau, Paunzhausen und Biburg, meine Freunde (und Leidensgenossen) **Diana Perkins, Maike Cremer, Nils Kern, Dr. Carolin Bimüller, Martin Schaaf, Dr. Johannes Stelzer, Dr. Jörg Stephan, Dr. Niklas Fricke, Kelvin Autenrieth** meine **Familie**, insbesondere an meinen Bruder **Swen Wittich**, für dein unbändiges „an mich glauben“ und meine Schwester **Sabine Graf** für die Begeisterung an der Natur sowie meine Eltern **Ursula Graf** und **Georg Wittich** für eure bedingungslose Unterstützung in allen Lebenslagen, meine Freundin **Dr. Jennifer Junker** für deine Liebe, dein Verständnis und deine Geduld, und Danke an meinen **Hoschi** und besten Freund **Matthias Baß (PhD. in spe)** - we ride together, we die together! TTFL!

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|-----|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | iii |
| TABELLENVERZEICHNIS | vi |
| ABKÜRZUNGS- UND SYNONYMVERZEICHNIS | vii |
| ZUSAMMENFASSUNG | 1 |
| ABSTRACT | 3 |
| | |
| 1. EINLEITUNG | 5 |
| 1.1. Hopfen (<i>Humulus lupulus</i>) | 6 |
| 1.1.1. Biologie | 6 |
| 1.1.2. Hopfenproduktion | 9 |
| 1.2. Bewässerung | 14 |
| 1.2.1. Wasser in der Pflanze | 14 |
| 1.2.2. Bewässerung in der Landwirtschaft | 15 |
| 1.2.3. Bewässerungsformen und objektive Steuerung | 16 |
| 1.2.4. Einfluss unterschiedlicher Bodenarten | 19 |
| 1.2.5. Bewässerung von Hopfen | 21 |
| 1.3. Fragestellung und Zielsetzung | 24 |
| 1.3.1. Feldversuche zur Tröpfchenbewässerung | 24 |
| 1.3.2. Physiologische Untersuchungen an Hopfen | 25 |
| 1.3.3. Rhizosphäre von Hopfen | 26 |
| 1.3.4. Retrospektiv erstellte Wasserbilanzen der Hallertau | 26 |
| | |
| 2. MATERIAL UND METHODEN | 27 |
| 2.1. Feldversuche zur Tröpfchenbewässerung | 27 |
| 2.1.1. Bewässerung mit Steuerung nach Saugspannungen | 27 |
| 2.1.2. Bewässerung unter Berücksichtigung einer klimatischen Wasserbilanz | 38 |
| 2.1.3. Bewässerungsversuche mit induzierter Trockenheit | 41 |
| 2.1.4. Bewässerung mit unterschiedlicher Applikation gleicher Wassermengen | 45 |
| 2.2. Physiologische Untersuchungen an Hopfen | 48 |
| 2.2.1. Lichtkurven | 49 |
| 2.2.2. Potentielle Nettophotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung | 50 |
| 2.2.3. Tagesgang | 52 |
| 2.2.4. Nettophotosynthese und Transpiration bei gegebenen Lichtverhältnissen | 53 |
| 2.3. Rhizosphäre von Hopfen | 58 |
| 2.3.1. Wurzelgrabungen | 58 |
| 2.3.2. Berechnungen des durchwurzelten Bodenvolumens | 60 |
| 2.4. Retrospektiv erstellte Wasserbilanzen der Hallertau | 61 |
| 2.4.1. Verdunstungswerte ET_0 und ET_{Hopfen} | 61 |
| 2.4.2. Pflanzenverfügbares Wasser bei unterschiedlichen Bodenarten | 62 |
| 2.4.3. Simulation einer optimalen Bewässerung | 63 |
| 2.5. Untersuchungsgebiet Hallertau | 64 |
| 2.6. Statistische Auswertung | 66 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3. | ERGEBNISSE | 70 |
| 3.1. | Feldversuche zur Tröpfchenbewässerung | 70 |
| 3.1.1. | Bewässerung mit Steuerung nach Saugspannungen | 70 |
| 3.1.2. | Bewässerung unter Berücksichtigung einer klimatischen Wasserbilanz | 82 |
| 3.1.3. | Bewässerungsversuche mit induzierter Trockenheit..... | 85 |
| 3.1.4. | Bewässerung mit unterschiedlicher Applikation gleicher Wassermengen ... | 88 |
| 3.2. | Physiologische Untersuchungen an Hopfen | 91 |
| 3.2.1. | Lichtkurven | 91 |
| 3.2.2. | Potentielle Nettphotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung | 92 |
| 3.2.3. | Tagesgang..... | 98 |
| 3.2.4. | Nettphotosynthese und Transpiration bei gegebenen Lichtverhältnissen ... | 99 |
| 3.3. | Rhizosphäre von Hopfen | 108 |
| 3.3.1. | Wurzeltypen | 108 |
| 3.3.2. | Herkules | 109 |
| 3.3.3. | Perle..... | 112 |
| 3.4. | Retrospektiv erstellte Wasserbilanzen der Hallertau | 117 |
| 3.4.1. | Verdunstungsraten ET_0 | 117 |
| 3.4.2. | Verdunstungsraten für Hopfen ET_{Hopfen} | 118 |
| 3.4.3. | Pflanzenverfügbares Wasser bei unterschiedlichen Bodenarten..... | 119 |
| 3.4.4. | Simulation einer optimalen Bewässerung | 121 |
| 4. | DISKUSSION..... | 124 |
| 4.1. | Feldversuche zur Tröpfchenbewässerung..... | 125 |
| 4.1.1. | Einfluss auf den Ertrag und die Qualität von Hopfen | 125 |
| 4.1.2. | Positionierung der Tropfschläuche..... | 127 |
| 4.1.3. | Nachteile durch Tröpfchenbewässerung | 129 |
| 4.1.4. | Bewässerungssteuerung | 131 |
| 4.1.5. | Limitierungen der Feldversuche..... | 133 |
| 4.2. | Physiologische Untersuchungen an Hopfen | 135 |
| 4.2.1. | Lichtkurven | 135 |
| 4.2.2. | Potentielle Nettphotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung | 135 |
| 4.2.3. | Tagesgang..... | 137 |
| 4.2.4. | Nettphotosynthese und Transpiration bei gegebenen Lichtverhältnissen . | 138 |
| 4.2.5. | Hochrechnung des Wasserverbrauchs..... | 139 |
| 4.3. | Rhizosphäre von Hopfen | 141 |
| 4.3.1. | Wasserreserven..... | 141 |
| 4.3.2. | Konsequenzen auf produktionstechnische Schritte..... | 142 |
| 4.4. | Retrospektiv erstellte Wasserbilanzen der Hallertau | 144 |
| 4.4.1. | Verdunstungsraten ET_0 in der Hallertau | 144 |
| 4.4.2. | Wasserbilanzen für Hopfen in der Hallertau..... | 144 |
| 4.4.3. | Simulation einer optimalen Bewässerung | 146 |
| 4.5. | Abschliessende Beurteilung und Konsequenz für die Praxis | 147 |
| 5. | LITERATURVERZEICHNIS | 149 |
| 6. | ANHANG | 157 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Botanische Merkmale von Hopfen 6

Abbildung 2: Strukturformel der Alphasäure Humulon 7

Abbildung 3: Natürliches Vorkommen von *Humulus lupulus* L. 8

Abbildung 4: Hopfenproduktion im Laufe der Vegetationsperiode an der Sorte Herkules..... 11

Abbildung 5: Prozentuale Häufigkeit von Bewässerung auf der Welt im Jahr 2000..... 15

Abbildung 6: Prozentuale Häufigkeit von Bewässerung in Europa im Jahr 2000 16

Abbildung 7: Zweidimensionale Ausbreitung von Wasser ausgehend von einem Tropfemitter mit einem Wasserauslass von 2 l/h nach 5 Stunden Bewässerung 18

Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wasserspannung..... 19

Abbildung 9: Relative Änderung des Gebietsniederschlags in Bayern im hydrologischen Sommerhalbjahr 21

Abbildung 10: Prozentualer Anteil der Korngrößen im Boden der Versuchsstandorte Attenhofen und Karpfenstein 29

Abbildung 11: Verwendeter Tropfschlauch „multibar“ 30

Abbildung 12: Versuchsaufbau Bewässerung nach Saugspannungen mit den Varianten AB150, Kontrolle, AB300, NB300, AB600 und ZB300 31

Abbildung 13: Sensoranordnung in den Versuchsvarianten (Querschnitt und Aufsicht) 32

Abbildung 14: Watermarkensensor zur Messung der Saugspannung..... 33

Abbildung 15: Steuerungseinheit ICA 60 und Wetterstation imetos 35

Abbildung 16: Versuchsfelder der Versuche mit induzierter Trockenheit 42

Abbildung 17: Versuchsaufbau der Versuche mit induzierter Trockenheit..... 43

Abbildung 18: Abdeckung der Versuchspartellen zum Ausschließen natürlicher Niederschläge..... 43

Abbildung 19: Versuchsaufbau des Versuchs unterschiedliche Applikation gleicher Wassermengen 46

Abbildung 20: Voruntersuchungen im Gewächshaus mittels Lichtkurven..... 49

Abbildung 21: Gaswechsellmessungen zum Vergleich der potentiellen Transpirations- und Nettphotosyntheseleistung im Feld..... 50

Abbildung 22: Messung der Transpiration und Nettphotosynthese verschiedener Höhenstufen unter natürlichen Lichtbedingungen 54

Abbildung 23: Ablauf der morphologischen Wurzeluntersuchung 58

Abbildung 24: Wasserspannung in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2012 in Attenhofen.. 73

Abbildung 25: Wasserspannung in den Varianten NB300 und ZB300 sowie Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2012 in Attenhofen.. 75

Abbildung 26: Wasserspannung in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2012 in Karpfenstein 76

Abbildung 27: Wasserspannung in den Varianten NB300 und ZB300 sowie Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2012 in Karpfenstein 77

Abbildung 28: Mittlerer Ertrag und Alphasäuregehalt der einzelnen Behandlungen der Jahre 2012 bis 2014 am Lehmbodenstandort Attenhofen 79

Abbildung 29: Mittlerer Ertrag und Alphasäuregehalt der einzelnen Behandlungen der Jahre 2012 bis 2014 am Sandbodenstandort Karpfenstein 80

Abbildung 30: Pflanzenverfügbares Wasser der intensiv bewässerten Varianten (AB, NB und ZB) sowie der unbewässerten Kontrolle in der Wachstumsperiode 01.Mai bis 15. September 2015 in Karpfenstein..... 83

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 31: | Mittlerer Ertrag und Alphasäuregehalt der intensiv bewässerten und unbewässerten Varianten am Sandbodenstandort Karpfenstein im Jahr 2015..... | 84 |
| Abbildung 32: | Mittlerer Ertrag und Alphasäuregehalt der einzelnen Behandlungen in den Jahren 2012 und 2013 an der Sorte Herkules..... | 86 |
| Abbildung 33: | Mittlerer Ertrag und Alphasäuregehalt der einzelnen Behandlungen in den Jahren 2012 und 2013 an der Sorte Perle | 87 |
| Abbildung 34: | Mittlerer Ertrag und Alphasäuregehalt der einzelnen Behandlungen im Versuch unterschiedliche Applikation gleicher Wassermengen an der Sorte Herkules in den Jahren 2014 und 2015..... | 90 |
| Abbildung 35: | Lichtkurven an Jungpflanzen von <i>Humulus lupulus</i> cv. Herkules | 91 |
| Abbildung 36: | Potentielle Nettphotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung im Jahr 2012..... | 94 |
| Abbildung 37: | Potentielle Nettphotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung im Jahr 2013..... | 96 |
| Abbildung 38: | Tagesgang von <i>Humulus lupulus</i> cv. Herkules gemessen am 17.07.14 | 98 |
| Abbildung 39: | Blattflächenentwicklung der Sorte Herkules in den drei unterteilten Bereichen (unten, Mitte, oben) zur Extrapolation der tatsächlichen Transpiration..... | 100 |
| Abbildung 40: | Nettphotosynthese- und Transpirationsleistung von Hopfen am 08.07., 16.07., 23.07., 31.07. und 05.08. bis 07.08.14 | 103 |
| Abbildung 41: | Zusammenhang von VPD zu Transpiration und Assimilation bei gegebener Lichtstärke über die Höhenstufen unten, Mitte und oben der Behandlungen bewässert und unbewässert | 105 |
| Abbildung 42: | Morphologie des Wurzelsystems von <i>Humulus lupulus</i> cv. Herkules auf Sandboden..... | 110 |
| Abbildung 43: | Morphologie des Wurzelsystems von <i>Humulus lupulus</i> cv. Herkules auf Lehmboden | 111 |
| Abbildung 44: | Morphologie des Wurzelsystems von <i>Humulus lupulus</i> cv. Perle auf Sandboden..... | 113 |
| Abbildung 45: | Morphologie des Wurzelsystems von <i>Humulus lupulus</i> cv. Perle auf Lehmboden | 115 |
| Abbildung 46: | Verdunstungsrate ET_0 über Gras nach Penman-Monteith ausgegeben an den Wetterstationen Eschenhart, Hüll, Dietrichsdorf, Stadelhof, Sandharlanden und Baumannshof für die Jahre 2003 und 2012 bis 2015 | 117 |
| Abbildung 47: | Pflanzenverfügbares Wasser der einzelnen Standorte für die Jahre 2003 und 2012 bis 2015 ermittelt nach ET_{Hopfen} und angepasst an die jeweilige Bodenart bei 1 m Wurzeltiefe | 120 |
| Abbildung 48: | Simulation einer optimalen Bewässerung mit Auffüllen der Bodenschicht von 60 % auf 90 % nFK an den Standorten Hüll und Baumannshof | 122 |
| Abbildung 49: | Satellitenbild des Versuchsstandorts Attenhofen..... | 157 |
| Abbildung 50: | Satellitenbild des Versuchsstandorts Karpfenstein | 157 |
| Abbildung 51: | Verschaltung des Wasserkreislaufs der Varianten AB150, AB300, AB600, NB300 und ZB300 der Versuche in Karpfenstein und Attenhofen | 158 |
| Abbildung 52: | Lage der Wetterstationen Eschenhart, Hüll, Dietrichsdorf, Sandharlanden, Baumannshof und Stadelhof in der Hallertau | 159 |
| Abbildung 53: | Wasserspannung in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2013 in Attenhofen..... | 163 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 54: | Wasserspannung in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2013 in Attenhofen | 164 |
| Abbildung 55: | Wasserspannung in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2014 in Attenhofen | 165 |
| Abbildung 56: | Wasserspannung in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2014 in Attenhofen | 166 |
| Abbildung 57: | Wasserspannung in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2013 in Karpfenstein..... | 167 |
| Abbildung 58: | Wasserspannung in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2013 in Karpfenstein..... | 168 |
| Abbildung 59: | Wasserspannung in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2014 in Karpfenstein..... | 169 |
| Abbildung 60: | Wasserspannung in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben und Niederschläge im Jahr 2014 in Karpfenstein..... | 170 |
| Abbildung 61: | Gesamtblattfläche der Sorte Herkules im Laufe der Vegetationsperiode | 173 |
| Abbildung 62: | Verteilung des Wassers im Hopfengarten bei oberirdischer Installation des Tropfschlauches im Gerüst | 173 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 1: | Arbeitsschritte in einem Hopfenjahr..... | 12 |
| Tabelle 2: | Praxisrelevante Tropfschlauchpositionierungen im Hopfenanbau | 22 |
| Tabelle 3: | Vergleich der Versuchsstandorte zur Bewässerung mit Steuerung nach Saugspannungen | 28 |
| Tabelle 4: | Veränderungen der Varianten aus den Versuchen 2012 - 2014 für den Versuch Berücksichtigung einer klimatischen Wasserbilanz | 39 |
| Tabelle 5: | Lage und geometrische Form der aufgefundenen Wurzelbereiche und Formeln zur Volumenberechnung | 60 |
| Tabelle 6: | Verwendete Bodenarten zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz | 62 |
| Tabelle 7: | Monatliche Witterungsdaten der Jahre 2012 bis 2015 für die Hallertau | 65 |
| Tabelle 8: | Verabreichte Bewässerungsmengen der einzelnen Varianten am Versuchsstandort Attenhofen..... | 78 |
| Tabelle 9: | Verabreichte Bewässerungsmengen der einzelnen Varianten am Versuchsstandort Karpfenstein..... | 78 |
| Tabelle 10: | Multiple Regressionen mit den Werten der potentiellen Nettophotosynthese und Transpirationmessungen der Jahre 2012 und 2013..... | 97 |
| Tabelle 11: | Ergebnisse der statistischen Untersuchungen der gemessenen Parameter PAR, Assimilation und Transpiration zwischen den Behandlungen mittels Mann- Whitney U Tests | 104 |
| Tabelle 12: | Wassernutzungseffizienz der bewässerten und unbewässerten Hopfenpflanzen . | 105 |
| Tabelle 13: | Extrapolation des Wasserverbrauchs von Herkules an den gemessenen Tagen... | 107 |
| Tabelle 14: | Kumulierte Verdunstung von Hopfen ET_{Hopfen} in der Hallertau | 119 |
| Tabelle 15: | Simulierte Bewässerungsmengen ausgehend von der vorherrschenden Witterung und davon ausgehenden Wasserbilanzen in den Jahren 2003 und 2012 - 2015 an den Wetterstationen der Hallertau | 123 |
| Tabelle 16: | Kriterien zur Standortfindung für die Bewässerungsversuche auf Sand- und Lehmboden | 158 |
| Tabelle 17: | Meteorologische Parameter mit den jeweiligen Einheiten | 159 |
| Tabelle 18: | Ergebnisse der Standorte Karpfenstein (Sandboden) und Attenhofen (Lehmboden) im Jahr 2012..... | 160 |
| Tabelle 19: | Ergebnisse der Standorte Karpfenstein (Sandboden) und Attenhofen (Lehmboden) im Jahr 2013..... | 161 |
| Tabelle 20: | Ergebnisse der Standorte Karpfenstein (Sandboden) und Attenhofen (Lehmboden) im Jahr 2014..... | 162 |
| Tabelle 21: | Mittelwerte der in den Varianten 28, 21, 14 und Kontrolle erzielten Erträge und Alphasäuregehalte von Herkules der Jahre 2012/13 am Standort Hirnkirchen.... | 171 |
| Tabelle 22: | Mittelwerte der in den Varianten 28, 21, 14 und Kontrolle erzielten Erträge und Alphasäuregehalte von Perle der Jahre 2012/13 am Standort Hirnkirchen | 171 |
| Tabelle 23: | Mittelwerte der in den Varianten Kontrolle, AB3, AB12, NB3 und NB12 erzielten Erträge und Alphasäuregehalte von Herkules der Jahre 2014/15 am Standort Hirnkirchen | 171 |
| Tabelle 24: | Ergebnisse der Mittelwertvergleiche von Assimilation A und Transpiration E aus dem Jahr 2012 | 172 |
| Tabelle 25: | Ergebnisse der Mittelwertvergleiche von Assimilation A und Transpiration E aus dem Jahr 2013 | 172 |
| Tabelle 26: | Korrelationsmatrix zur Voruntersuchung auf Multikollinearität | 172 |

ABKÜRZUNGS- UND SYNONYMVERZEICHNIS

| | |
|------------------------|---|
| A: | Attenhofen |
| A: | Assimilation |
| AB: | auf dem Bifang (bezogen auf die Positionierung der Tropfschläuche) |
| ABA: | Abcisinsäure |
| Abb: | Abbildung |
| Akh: | Arbeitskraftstunden |
| ANOVA: | Varianzanalyse |
| ASRR: | Austrian Society for Root Research |
| B: | Bifang |
| BayRS V: | Bayerische Rechtssammlung Verordnungen |
| Bf: | Bodenfeuchte |
| BBCH: | Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und chemische Industrie, gibt mittels Skala Auskunft über das morphologische Entwicklungsstadium einer Pflanze |
| bew: | bewässert |
| Bew: | Bewässerung |
| BFI: | Blattflächenindex |
| Bifang: | umgangssprachlich in der Hopfenlandwirtschaft für Pflanzreihe/Dammkrone |
| CSV: | Comma seperated values |
| <i>cv.</i> | Cultivar, bezogen auf eine Sorte von Pflanzenarten |
| DBU: | Deutsche Bundesstiftung Umwelt |
| DSN: | Düngeberatungssystem Stickstoff |
| e: | Wasserdampfpartialdruck |
| e^0 : | Wasserdampfsättigungsdruck |
| E: | Transpiration |
| ET ₀ : | Verdunstungswerte über Gras nach Penman-Monteith |
| ET _{Hopfen} : | Verdunstungswerte von Hopfen, mit k_c -Werten der FAO |
| F: | Fahrgasse |
| FAO: | Food and Agriculture Organization |
| FK: | Feldkapazität |
| fS: | Feinsand |
| fU: | Feinschluff |
| GBIF: | Global Biodiversity Information Facility |
| GKB: | Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung |
| gS: | Grobsand |
| GS: | Globalstrahlung |
| gU: | Grobschluff |
| ha: | Hektar (10.000 m ²) |
| HM: | Hallertauer Magnum |
| hPa: | Hektopascal |
| HS: | Herkules |
| HSWT: | Hochschule Weihenstephan-Triesdorf |
| HT: | Hallertauer Tradition |
| IPCC: | International Panel on Climate Change |
| IRGA: | Infrarotgasanalysator |
| K: | Kelvin |
| k_c : | Korrekturfaktor |
| l: | Liter |
| L: | Lehmboden |
| LBP: | Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau |
| LfL: | Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft |
| Lu: | Schluffiger Lehm |
| M: | Mitte |
| Mio: | Millionen |
| Mrd: | Milliarden |

| | |
|--------|--|
| mS: | Mittelsand |
| mU: | Mittelschluff |
| MW: | Mittelwert |
| MWU: | Mann-Whitney U Test |
| n: | Stichprobenanzahl |
| N: | Niederschlag |
| n.b.: | nicht beerntet |
| NB: | neben dem Bifang vergraben (bezogen auf die Positionierung der Tropfschläuche) |
| nFK: | nutzbare Feldkapazität, Wasserspeichervermögen eines Bodens für Pflanzen |
| NIR: | Nahinfrarotspektroskopie |
| NP: | Nettophotosynthese/Assimilation |
| o: | oben |
| PAR: | Photosynthetic Active Radiation |
| PE: | Perle |
| pF: | natürlicher Logarithmus der Saugspannung, dimensionslose Einheit die angibt, wie stark Wasser an der Bodenmatrix festgehalten wird |
| PPFD: | Photonenflussdichte |
| PVW: | Pflanzenverfügbares Wasser, errechnet aus der nutzbaren Feldkapazität und dem effektiven Wurzelraum |
| PWP: | Permanenter Welkepunkt |
| rL: | relative Luftfeuchte |
| sL: | sandiger Lehm Boden |
| SNK: | Student-Newman-Keuls Test |
| SPAC: | Soil Plant Atmosphere Continuum |
| St: | toniger Sand |
| STABW: | Standardabweichung |
| T: | Temperatur |
| T: | Ton |
| Tab.: | Tabelle |
| TB: | Tropfbewässerungsgabe |
| Tsd: | Tausend |
| TUM: | Technische Universität München |
| u: | unten |
| UK: | United Kingdom |
| unbew: | unbewässert |
| vgl: | vergleiche |
| VPD: | vapour pressure deficit |
| W: | Windgeschwindigkeit |
| WG: | Wassergehalt |
| WS: | Wasserspannung/ Saugspannung |
| WUE: | Wasserausnutzungskoeffizient der Photosynthese |
| ZB: | zwischen den Bifängen in der Fahrgassenmitte vergraben (bezogen auf die Positionierung der Tropfschläuche) |

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Vermeidung potentieller Ertragseinbußen bei Hopfen wird in Deutschland häufig Tröpfchenbewässerung eingesetzt. Deren quantitative und qualitative Beeinflussung auf den Ertrag und die Qualität sind jedoch unzureichend bekannt. Fehlende Kenntnisse der Rhizosphäre erschweren darüber hinaus Empfehlungen zu einer objektiven Steuerung und zur optimalen Positionierung der Tropfschläuche. In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Tröpfchenbewässerung auf den Ertrag, die Qualität und die Physiologie von Hopfen sowie dessen Wurzelphänotyp untersucht.

Im Rahmen von 12 Feldversuchen auf Sand- und Lehmböden in der Hallertau wurde in den Jahren 2012 bis 2015 die oberirdische (auf dem Bifang, AB) und die unterirdische Positionierung (neben dem Bifang, NB und zwischen zwei Bifängen in der Fahrgassenmitte, ZB) von Tropfschläuchen verglichen. Dabei wurden Saugspannungen und klimatische Wasserbilanzen als Steuerungsindikatoren bewertet. Maximal wurden je nach Witterung und Versuchsfrage 35 bis 210 mm an Wasser pro Saison verabreicht.

Mit Gaswechselformen wurden die Nettophotosynthese (NP), die Transpiration (E) und die Wassernutzungseffizienz (WUE) im unteren Bereich der Versuchspflanzen bei Lichtsättigung ($1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ermittelt. Multiple Regressionen dienten der Aufklärung von Zusammenhängen zwischen NP und E und der Witterung. Bei natürlichen Lichtverhältnissen wurde der Gaswechsel über die gesamte Höhe der Pflanze charakterisiert und in den Vergleich zum Wasserdampfdruckdefizit (VPD) gestellt. Mit den ermittelten Daten von E wurde der Wasserverbrauch einer Pflanze mithilfe der Blattfläche extrapoliert.

Umfassende Ausgrabungen des Gesamtwurzelsystems dienten der Beschreibung der Rhizosphäre und der Quantifizierung des durchwurzelt Bodenvolumens. Für verschiedene Bodenarten der Hallertau wurden retrospektiv Wasserbilanzierungen mit Korrekturfaktoren (k_c -Werte) der „Food and Agriculture Organization“ (FAO), bei einer effektiven Wurzeltiefe von 1 m, ermittelt.

Im trockensten Jahr (2015) ergab sich eine Erhöhung von ca. 35 % (bei AB und NB) und 30 % (bei ZB) des Ertrags. Die Alphasäure war in drei Fällen signifikant erhöht. In den übrigen Fällen zeigte die Bewässerung keine signifikanten Einflüsse auf den Ertrag und die Qualität. Tendenziell wurden die besten Erfolge bei AB erzielt.

Die bewässerten Pflanzen wiesen bei Lichtsättigung in 30 % der Fälle gesteigerte NP- und E-Werte, aber weder eine höhere WUE noch höhere Erträge auf. Die NP- und E-Werte konnten unabhängig von der Behandlung in fast allen Modellen der multiplen Regressionen am besten von den Parametern Globalstrahlung, relative Luftfeuchte und Temperatur erklärt werden (bei

maximalem $R^2=0,41$). Bei natürlichen Lichtverhältnissen konnten keine eindeutigen Unterschiede der NP und der E zwischen den Behandlungen aufgedeckt werden. Es zeigte sich eine zunehmende Abhängigkeit der E zum VPD im Verlauf der Pflanze von unten nach oben. Die Extrapolation des Wasserverbrauchs ergab eine Verdunstung von ca. 50 Litern pro Pflanze und Tag.

Das Wurzelwerk verfügt mit durchschnittlich 5,0 m³ Bodenvolumen über große Wasserreserven. Die größte Ausdehnung (7,4 m³) wurde an einer unbewässerten Pflanze festgestellt. Die Wasserbilanzierungen zeigten, dass vor allem in trockenen Jahren und auf Sandböden eine Bewässerung erforderlich ist.

Eine sensorbasierte Steuerung der Bewässerung ist bei Hopfen weniger gut geeignet, da aufgrund des großen Wurzelwerks eine einheitliche Interpretation erschwert ist. Empfohlen wird die Verwendung klimatischer Wasserbilanzierungen mit k_c -Werten der FAO. Allerdings stellt das System Tröpfchenbewässerung bei Hopfen, in gemäßigten Breiten, möglicherweise eine suboptimale Lösung dar. Durch die punktuelle Wasserverabreichung wird von einem reduzierten Wurzelwachstum und geminderter Nährstoffverfügbarkeit ausgegangen. Die Ergebnisse zeigten auch, dass höhere Pumpenleistungen benötigt werden, um die Pflanze bedarfsgerecht zu bewässern. Alternative Bewässerungsformen werden diskutiert.

ABSTRACT

Drip irrigation is often used in hop (*Humulus lupulus* L.) production in Germany to avoid potential decreases in yield. However, their quantitative and qualitative influence on yield and quality are poorly understood. Insufficient knowledge of the rhizosphere complicate recommendations for an objective control and the optimal positioning of the drip lines. Hence in this study the influence of drip irrigation on yield, quality and physiology of hops as well as its root rhizosphere were investigated.

Within the scope of 12 field trials in the years 2012 to 2015 on sandy and loamy soils in the Hallertau, aboveground (on the row, AB) and subsurface positioning (next to the row, NB and between two rows in the driving lane, ZB) of the drip lines were examined. Soil water tension and climatic water balance as irrigation management were evaluated. In maximum 35-210 mm of water was applied in the field trials during a crop season, depending on weather conditions and experimental design.

Gas exchange measurements were used to determine net photosynthesis (NP), transpiration (E) and water use efficiency (WUE) at the bottom of the experimental plants at light saturation ($1250 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Multiple regressions were performed to clarify relationships between the values of NP and E and weather conditions. At normal light conditions gas exchange was characterized over the entire height of the plant and compared to water vapor pressure deficit (VPD). With the collected data of E, water consumption was extrapolated using leaf area. Extensive excavations of the total root system served the description of the rhizosphere and the quantification of the rooted soil volume. For different soil types of the Hallertau and with an effective rooting depth of 1 m, water balances with crop coefficients (k_c -values) of the Food and Agriculture Organization (FAO) were calculated, retrospectively.

In the driest year (2015) an increase of about 35 % (at AB and NB) and 30 % (at ZB) of yield occurred. The alpha acid content was significantly increased in three cases. In the other cases, irrigation showed no significant effects on yield and quality. There is a trend observed in AB positioning, which achieved the best results.

The irrigated plants showed increased NP and E values, at light saturation, in 30 % of cases, but neither a higher WUE nor higher yields. The NP and E values were best explained by the parameters global radiation, relative humidity and temperature in nearly all models of the multiple regressions (at maximum $R^2 = 0.41$). At normal light conditions, no apparent differences of the NP and the E between treatments could be discovered. There was an increasing dependence of E to VPD in the height of the plant from the bottom up. Extrapolation of water consumption resulted in an evaporation of about 50 liters per plant per day. The root

system has with a soil volume of 5.0 m³ in average large water reserves. The greatest expansion (7.4 m³) was found at a non-irrigated plant. The water balances showed that irrigation is required, especially in dry years and on sandy soils.

A sensor-based irrigation scheduling is less suitable in hops, due to the large root system where a uniform interpretation is difficult. The use of climatic water balances with crop coefficients of the FAO are recommended. However, the system drip irrigation in hops, in temperate latitudes, is a potentially suboptimal solution. Because of the selective water application decreased root growth and reduced nutrient availability are assumed. The results also showed that higher pump performance are required for an adequate irrigation. Alternative forms of irrigation are discussed.

1. EINLEITUNG

Hopfen hat seit langem einen hohen Stellenwert in der bayerischen Landwirtschaft. Bereits seit dem Jahr 736 ist der Hopfenanbau in Bayern belegt. Ursprünglich zur Konservierung von Bier verwendet, wurde er zunächst hauptsächlich von Mönchen in Klöstern kultiviert. Nach knapp 1300 Jahren befindet sich in Deutschland das weltweit größte zusammenhängende Hopfenanbaugebiet mit einer Gesamtanbaufläche von knapp 15.000 ha, die sogenannte Hallertau, eine kleinen Region in Bayern, nördlich von München.

Im Jahre 2015 sicherten dort knapp 1000 Familienbetriebe die Produktion der im Brauereiwesen unerlässlichen Pflanze *Humulus lupulus*. Sowohl produktionstechnisch als auch betriebswirtschaftlich stellt Hopfen dabei Jahr für Jahr hohe Ansprüche an die Landwirtschaftsbetriebe.

In Jahren mit Trockenperioden in den Sommermonaten Juni, Juli und August, wurden bei Hopfen im Vergleich zu Jahren mit durchschnittlichen Niederschlagsverteilungen Ertrags- einbußen verzeichnet. Aufgrund der Klimaerwärmung werden immer wärmere und trockenere Sommermonate seitens der Landwirtschaft befürchtet. Deshalb installierten viele Hopfenbauern in Deutschland künstliche Zusatzbewässerungen, hauptsächlich in Form von Tropfbewässerungssystemen.

Da es bisher nur wenig Erkenntnisse über den Einfluss von Bewässerung und den Wasserbedarf von Hopfen in Deutschland gibt, wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) in einem Kooperationsprojekt mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), der Hochschule Weihenstephan Triesdorf (HSWT) und der Technischen Universität München (TUM) das Projekt „Optimierung des Bewässerungsmanagements im Hopfenbau“ gefördert, wovon Auszüge Teil dieser Arbeit sind.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, wie sich Zusatzbewässerung auf den Ertrag von Hopfen auswirkt und wie hoch sein Wasserbedarf in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen abgeschätzt werden kann.

Dazu dienten Feldversuche, die hinsichtlich Ertrag und Qualität ausgewertet wurden. Des Weiteren wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Bewässerung objektiv zu steuern. Um einen Einblick in den Wasserhaushalt der Pflanze zu bekommen, wurden Untersuchungen auf physiologischer und morphologischer Ebene durchgeführt.



Abbildung 1: Botanische Merkmale von Hopfen. A) Männlicher Blütenstand. B) junger weiblicher Blütenstand C) Reifer weiblicher Blütenstand mit gegenständiger Beblätterung und zapfenartigen Dolden. 8) Vorblatt der Dolde mit den Lupulindrüsen. Bildquelle: www.gbif.org, nach Thomé (1885).

1.1. HOPFEN (*Humulus lupulus*)

1.1.1. Biologie

Hopfen (*Humulus lupulus* L.) stammt aus der Familie der Cannabaceae und gilt botanisch als diözische Liane (Rothmaler und Jäger, 2005). Er bildet ein weit verzweigtes perennierendes Rhizom, aus welchem sich jährlich die nach oben gerichteten Sprossachsen mit apikalen Knospen entwickeln. Dabei suchen sich die rechtswindenden Triebe meist andere Pflanzen, um in lichtreichere Abschnitte zu wachsen. Es werden Wuchshöhen von 8 bis 9 m (Rybáček, 1991) bei Wachstumsgeschwindigkeiten von bis zu 30 cm am Tag beschrieben (Biendl *et al.*, 2012; Borde *et al.*, 1989).

Hopfenpflanzen wachsen aufgrund von lichtinduzierter Blühinduktion als Kurztagpflanzen (Thomas und Schwabe, 1969) nur in Regionen zwischen dem 35. und 55.

Breitengrad. Demnach geht das vegetative Wachstum in die generative Phase über, sobald die Beleuchtungsdauer 16 bis 18 Stunden beträgt und die Tage daraufhin wieder kürzer werden.

Die Internodien der Sprossachsen sind im Querschnitt sechseckig und hohl sowie mit zahlreichen Klimmhaaren besetzt. Dabei befinden sich immer nur die oberen zwei bis drei Internodien im Wachstum (Borde *et al.*, 1989). An den Nodien weisen die Pflanzen eine gegenständige und gestielte Beblätterung auf (s. Abb. 1). Die gezahnten Laubblätter sind herz- bis handförmig und je nach Altersstadium drei- bis siebenlappig. Dabei erreicht die Pflanze einen Blattflächenindex (BFI) von bis zu 8,9 (Engelhard *et al.*, 2011). Jedes Laubblatt bildet Nebenblätter aus, in deren Blattachsen Seitentriebe gebildet werden, die wiederum eine gegenständige Beblätterung mit Blütenständen entwickeln (s. Abb. 1). Die meisten Blüten werden an den Seitentrieben gebildet, wobei deren Länge sowohl von den Wachstumsbedingungen als auch vor allem von der Sorte abhängt.

Es gibt sowohl männliche als auch weibliche Pflanzen (Diözismus), wobei landwirtschaftlich lediglich die weiblichen Pflanzen bzw. deren unbefruchtete Blüten genutzt werden. Die männlichen Pflanzen bilden rispenartige, zur Anemogamie vorgesehene Blütenstände, aus denen der Pollen freigesetzt wird. Sie finden lediglich in züchterischen Fragen Anwendung. Demnach wird nach § 1 der Verordnung über die Bekämpfung wilden Hopfens vom 21. November 1956 (BayRS V S. 374) jegliche Befruchtung, und damit Samenbildung, durch Ausrottung von wilden Pflanzen vermieden. Hauptgrund hierfür ist, dass durch die physiologische Umstellung bei der Samenreife Lipide gebildet werden, die beim Brauprozess unerwünscht sind.

Die weiblichen Pflanzen bilden Kötzchen mit gleichartiger Blütenhülle aus. Dabei bestehen die umgangssprachlich und im weiteren Verlauf der Arbeit als Dolden bezeichneten Zapfen aus bis zu 60 Einzelblüten. Die Einzelblüten setzen sich aus Deckblatt und Vorblatt zusammen, die an der sogenannten Spindel angeheftet sind. Diese bildet die Blütenstandsachse (Kohlmann und Kastner, 1975). Dabei entwickeln sich pro Deckblatt zwei Vorblätter, in denen sich der Fruchtknoten befindet. An den Vorblättern, die bei Befruchtung der anemochorischen Verbreitung dienen, werden die meisten Lupulindrüsen, welche sekretorische Trichome darstellen, gebildet. Diese sitzen an der Epidermis der Doldenblätter und schützen natürlicherweise die Samen. Es gibt weitere Drüsen an den Laubblättern und an den Deckblättern der Dolden, doch ist die Anzahl und Bedeutung an den Vorblättern der Blüte am höchsten (Sugiyama *et al.*, 2006; Srečec *et al.*, 2011). In den Lupulindrüsen bilden sich unter anderem die spezifischen Bitterstoffe von Hopfen. Diese sekundären Pflanzenstoffe, welche als präformierte bakteriotoxische Verbindungen (Teuber und Schmalreck, 1973; Yamaguchi *et al.*, 2009) im Brauwesen genutzt werden, lassen sich in Alpha- und Betasäuren aufteilen. Diese

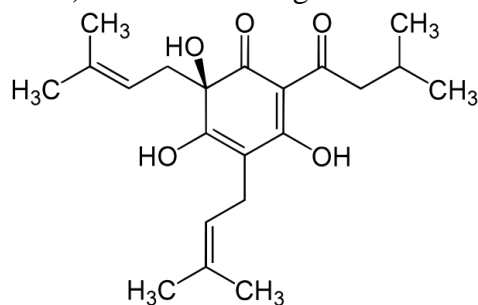


Abbildung 2: Strukturformel der Alphasäure Humulon. Die Alphasäure stellt den wertgebenden Stoff in der Landwirtschaft dar. Es gibt zahlreiche Alphasäuren, die sich lediglich in ihrer Alkanoyl-Seitenkette unterscheiden. Sie besitzt bakteriotoxische Eigenschaften und dient im Brauwesen neben der Konservierung zur Geschmacksbildung und Schaumstabilisierung.

Weichharze sind di- bzw. triprenylierte Derivate des Phloroglucinols, welche sich lediglich in ihrer Alkanoyl-Seitenkette unterscheiden.

Dabei tragen die Alphasäuren (s. Abb. 2) neben den konservierenden Eigenschaften auch zur Geschmacksbildung und zur Schaumstabilisierung in Bieren bei (Smith *et al.*, 1998) und werden medizinisch aufgrund ihrer sedativen Wirkung untersucht (Zanoli und Zavatti, 2008; Schiller *et al.*, 2006). Darüber hinaus stellen sie den wertgebenden Inhaltsstoff in der Landwirtschaft

1. EINLEITUNG

dar, wobei Inhalte von ca. 2 bis 20 % in frisch geernteten Dolden bei einem standardisierten Wassergehalt von 10 % festgestellt werden.

Das natürliche Verbreitungsgebiet von *Humulus lupulus* L. erstreckt sich wissenschaftlich dokumentiert über weite Teile der Holarktis und somit über Europa, Asien und Nordamerika, wobei durch anthropogene Verbreitung auch Pflanzen in Neuseeland und Australien vorkommen (s. Abb. 3).

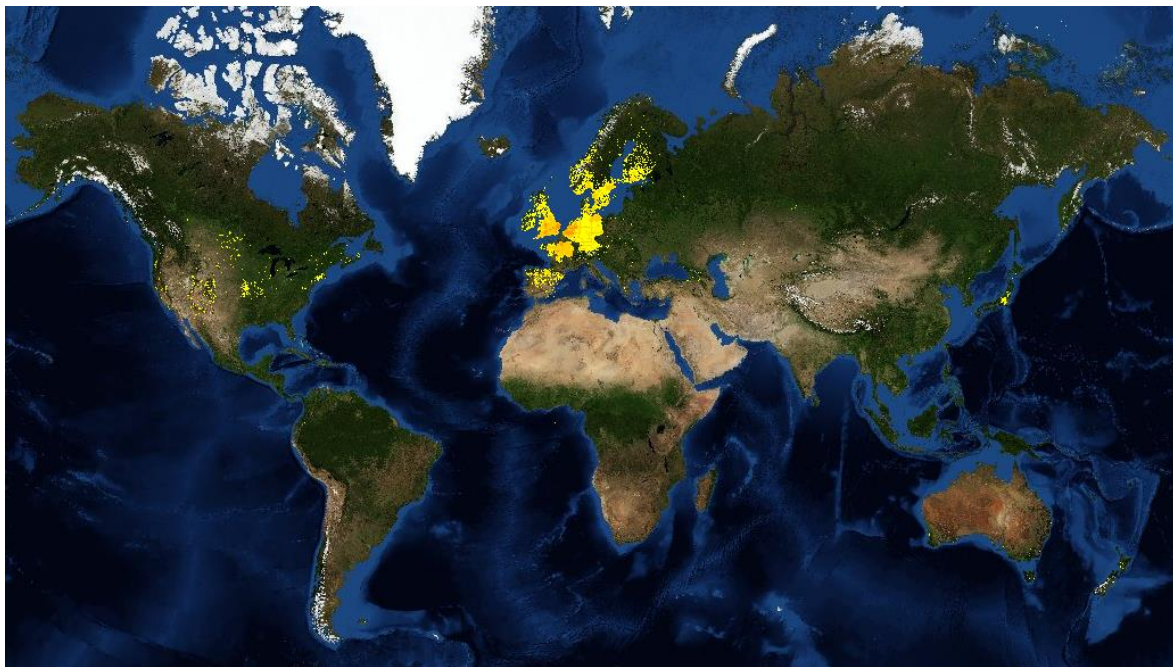


Abbildung 3: Natürliches Vorkommen von *Humulus lupulus* L. Der Auswertung des Schaubildes liegen über 60.000 dokumentierte Vorkommen der letzten 100 Jahre zugrunde. Die gelben Pixel symbolisieren das natürliche Vorkommen, dokumentiert aus Feldbeobachtungsdaten, welche der globalen Schnittstelle für Biodiversitätsdaten zugänglich gemacht wurden. Bildquelle: The Global Biodiversity Information Facility (GBIF): Backbone Taxonomy, <http://www.gbif.org/species/2984535>; aufgerufen am 24.03.2014.

Die Pflanze stammt in ihrer Wildform aus Auenwäldern und ist somit natürlicherweise an hohe Nährstoff- und Wasserkonzentrationen gebunden (Rothmaler und Jäger, 2005; Ellenberg, 1996). In der Natur dienen meist Sträucher und Bäume als Kletterhilfe, aber auch eigene abgestorbene Pflanzenteile aus dem Vorjahr werden erklommen.

Als Vergesellschaftung kommt *Humulus lupulus* hauptsächlich in Schlehengebüschen (*Prunetalia spinosae*) oder dem Traubenkirschen-Eschen-Auenwald (*Pruno Fraxinetum*) mit u.a. *Alnus glutinosa*, *Carex elongata*, *Clematis vitalba*, *Crataegus laevigata*, *C. monogyna*, *Euonymus europaea*, *Ligustrum vulgare*, *Prunus spinosa*, *Ribes nigrum*, *Rosa canina*, *Tamus communis* und *Viburnum opulus* vor (Ellenberg, 1996; Jeitler, 2000). Neben Auenwäldern werden auch Ruderalflächen wie Bahndämme oder Hecken mit *Urtica dioica* besiedelt (Pott, 1995).

1.1.2. Hopfenproduktion

Geschichtlich wird der Anbau von Hopfen schon vor 2000 Jahren bei den Babyloniern und den Ägyptern vermutet, wobei die dortige Zugabe zur Herstellung von bierähnlichen Getränken umstritten ist (Moir, 2000; Priest und Stewart, 2006).

Aus Deutschland existiert eine urkundliche Erwähnung zum Anbau der Pflanze im bayerischen Geisenfeld aus dem Jahre 736 (Kohlmann und Kastner, 1975). Andere Quellen gehen von einer späteren Kultivierung im deutschen Raum aus, wonach der erste Anbau im französischen Kloster St. Denis im Jahre 768 und im Jahre 822 im Kloster Corvey stattgefunden haben soll (Linke und Rebl, 1950).

Grundsätzlich beschränkte sich der Anbau hauptsächlich auf Klöster oder adlige Hoheitsgebiete, welche Brauereien beherbergten, oder direkt auf kleine ansässige Brauer über weite Teile Deutschlands (Borde, 1989). Dies hielt bis ins 19. Jahrhundert an. Erst durch einen starken Bevölkerungszuwachs, verbunden mit einer erhöhten Nachfrage nach Bier, konzentrierte sich der Hopfenanbau auf bestimmte Gebiete. Die in Deutschland größte Anbaufläche mit knapp 50.000 ha wurde im Jahr 1885 erreicht. Anfang des 20. Jahrhunderts verlagerte sich das Schwergewicht des Hopfenanbaus von damals in Franken in die Hallertau (Kohlmann und Kastner, 1975; Linke und Rebl, 1950).

Deutschland ist mit 17.847 ha vor den Vereinigten Staaten von Amerika mit 17.801 ha das größte Hopfenanbauland der Welt (Hopsteiner, 2015 a). Dabei stellt die Hallertau im Herzen Bayerns mit knapp 15.000 ha das größte zusammenhängende Hopfenanbaugebiet der Welt dar. Dies liegt nicht zuletzt an einer stark vernetzten Hopfenindustrie in der Region. So gibt es in der Hallertau neben Hopfenhandels- auch produktionstechnische Firmen und chemische Firmen für die Weiterverarbeitung, die allesamt vom Hopfenanbau abhängen.

Weitere bedeutende Hopfenanbauregionen in Deutschland sind das Gebiet Elbe-Saale, welches sich mit ca. 1.300 ha über die Bundesländer Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt erstreckt, die Gebiete Hersbruck und Spalt in Franken, mit zusammen etwa 350 ha, sowie das Hopfenanbaugebiet Tettngang im Bodenseekreis in Baden-Württemberg mit 1.200 ha. Neben den USA und Deutschland zählen bei einer weltweiten Anbaufläche von etwa 51.300 ha auch Tschechien und China zu bedeutenden Anbauländern von Hopfen (Hopsteiner, 2015 a).

Man unterscheidet im Hopfenanbau drei Sortengruppen. Die Aromasorten haben für gewöhnlich einen Alphasäuregehalt von 4 bis 10 %. Bittersorten haben einen Alphasäuregehalt von über 10 bis zu 20 %, wobei diese Definitionen eher auf die Anwendung im Brauereiwesen abzielen, da eine genaue Differenzierung der Inhaltsstoffe nicht möglich ist und es durchaus auch vorkommen kann, dass Aromasorten Alphasäuregehalte über 10 % erreichen. Eine neue

1. EINLEITUNG

Gruppe machen die sogenannten „Special Flavor Hopfen“ aus. Diese zeichnen sich vor allem durch fruchtbetonte Aromenoten aus und werden größtenteils für stark hopfenbetonte Craftbiere verwendet (Seigner *et al.*, 2013). Neben der Alphasäure sind weitere chemische Verbindungen, wie Betasäuren, Polyphenole und Öle, für die ausgeprägten Aromen der Sorten verantwortlich (Kammhuber, 2013). Doch machen diese Sorten in Deutschland bis dato nur einen flächenbezogenen Anteil von etwa 3 % aus, mit einer seit ihrer Einführung 2012 stark steigenden Tendenz.

Weltweit gibt es heute über 200 registrierte Sorten (IHGC, 2015), während der Hauptteil der Hopfenproduktion zum Bierbrauen verwendet wird. Lediglich ein geringer Teil der Welthopfenproduktion (ca. 1 %) wird für pharmazeutische Zwecke genutzt (Verband deutscher Hopfenpflanzer, persönliche Mitteilung). In Deutschland werden etwa 20 Sorten kultiviert, wobei davon die vier Sorten Hallertauer Tradition (HT), Perle (PE), beide Vertreter der Aromasorten, sowie Hallertauer Magnum (HM) und Herkules (HS) aus der Gruppe der Bittersorten mehr als 75 % des in Deutschland produzierten Hopfens ausmachen (Barth, 2015). Die Vermehrung von Hopfen erfolgt in der Landwirtschaft über vegetative Vermehrung der weiblichen Pflanzen, sodass alle Sorten als genetisch gleich betrachtet werden können, was eine vergleichende Beurteilung unterschiedlicher Standorte anhand der Ertragspotentiale ermöglicht (Rid, 1966). Manche Hopfenflächen erreichen ein Alter von über 40 Jahren, wobei meist nach 15 Erntejahren ein Rückgang des Ertragspotentials zu erkennen ist (Borde *et al.*, 1989). Gerade bei der Etablierung einer Junghopfenanlage ist deshalb auf eine gute Bodengesundung zu achten (Neve, 1991). Des Weiteren sind nach der Pflanzenbeschauverordnung nur gesunde und virus- sowie pilzfreie Pflanzen für die Weitergabe als Pflanzmaterial zu verwenden (Maurer *et al.*, 2013; Maurer *et al.*, 2014; LfL, 2015).

Hopfen wird in Reihen, den sogenannten Bifängen, in eigens dafür errichteten Gerüstanlagen kultiviert (s. Abb. 4). Dabei ist in der Hallertau jeder Bifang ca. 3,2 m voneinander entfernt, während im Bifang die Pflanzen je nach Sorte einen Abstand von 1,3 bis 1,7 m zueinander haben (LfL, 2015). Zwischen den Säulenreihen, in denen ebenfalls Pflanzen angebaut werden, befinden sich jeweils immer zwei Bifänge, sodass die Säulen in etwa einen Abstand von 10 m haben.



Abbildung 4: Hopfenproduktion im Laufe der Vegetationsperiode 2014 an der Sorte Herkules. a) Am 13. April sind die Drähte bereits befestigt, allerdings findet noch kein oberirdisches Pflanzenwachstum statt und auch die Bifänge sind noch nicht geackert. b) Am 14. Mai wurden bereits händisch die drei stärksten Triebe an die Drähte angeleitet. c) Am 14. Juni ist das erste Aufackern des Bifangs durchgeführt sowie der untere Bereich der Pflanzen entlaubt. d) Zum 01. Juli haben die Pflanzen bereits Gerüsthöhe und der Bifang ist geackert. Die oberirdischen Tropfschläuche sind installiert. e) Am 15. Juli hat das Wachstum der Seitentriebe begonnen und die Pflanzen beginnen zu blühen. f) Zum 30. August ist das vegetative Wachstum abgeschlossen und die Ausdoldung geht in die Reifephase über. Die Pflanzen haben ihre typische V-Form erlangt.

Hopfen gilt als Sonderkultur, was am sehr spezialisierten und hohen produktionstechnischen Aufwand liegt (s. Tab. 1). Im Frühjahr werden die Stöcke zunächst auf einer definierten Höhe geschnitten und beim sogenannten Kreiseln alte Wurzeln mitsamt dem künstlich aufgeackerten Bifang aus dem Vorjahr entfernt (LfL, 2015). Die Pflanze treibt je nach Bodentemperatur Mitte April bis Anfang Mai aus (s. Abb. 4). Von ca. 30 bis 40 Sprossen, die aus dem perennierenden Wurzelstock stammen, werden jeweils, je nach Sorte, die vier bis sechs stärksten Triebe von Hand ausgewählt und an zwei Kletterhilfen meist in Form eines Drahtes „angeleitet“. Die Drähte sind an Stahlseilen in den Gerüstanlagen befestigt. Dafür werden jährlich für jede Pflanze zwei Drähte von Hand in 7 m Höhe im Gerüst befestigt und auf Höhe des Wurzelstockes im Boden verankert. Durch die Anbringung der Drähte erhält die Pflanze in der Landwirtschaft ihre typische V-Form, wobei sich je Pflanze zwei Reben aus je drei bis vier Trieben entwickeln, die sich aufgrund ihres starken Schlingerverhaltens nur noch schwer voneinander unterscheiden lassen. Sobald die Triebe mit ihren trichomalen Haken Halt finden, beginnt ein sehr schnelles und produktives Wachstum, wobei die einzelnen Triebe häufig „nachgeleitet“ werden müssen. Die restlichen Triebe werden entfernt, damit gewährleistet ist, dass die Pflanze ihr gesamtes Potential in die angeleiteten Triebe steckt.

1. EINLEITUNG

Tabelle 1: Arbeitsschritte in einem Hopfenjahr. Die Sonderkultur Hopfen erfordert sehr viele Arbeitsgänge zum erfolgreichen Kultivieren der Pflanze. Vor allem das Anleiten und Nachleiten der Hopfenriebe sowie der gesamte Ernteablauf stellen hohe Arbeitsspitzen dar. Die Arbeitsschritte Aufdecken und Schneiden sowie das Kreiseln, die Bodenbearbeitungsschritte Fräsen, Grubbern und Ackern sowie die Ernte der Reben behindern eine dauerhaft oberirdische Installation von Tropfschläuchen.

| Arbeitsgang | Details | Zeitraum |
|--------------------------|------------------------------|-----------------|
| Aufdecken | Wegackern | Herbst |
| | Aufdecken und Schneiden | Febr.-April |
| Drahtaufhängen | Nacharbeiten, Nachlegen | Febr.-April |
| | Draht aufhängen | Dez.-März |
| | Draht einstecken | März-April |
| Hopfenpflege | Nacharbeiten von Hand | März-April |
| | Kreiseln | April |
| | Ausputzen, Anleiten | April-Mai |
| | Nachleiten | Mai-Juni |
| | Abspritzen | Mai-Juni |
| Bodenbearbeitung | Nachleiten/Entlauben | Mai-Juni |
| | Abspritzen | Juli |
| | Fräsen | April |
| | Grubbern (3x) | Mai-Juni |
| | Ackern (2x) | Mai-Juni |
| Windwurfstöcke aufhängen | Gründüngung einsäen | Mai-Juni |
| | Grubbern | Herbst |
| Düngung | | Juli-August |
| Pflanzenschutz | | April |
| | Gießbehandlung (1/2) | Mai |
| | Gießbeh./Bandspritzung (1/4) | Mai-Juni |
| | 1/3 Gerüsthöhe | Juni-Sept. |
| | ab Gerüsthöhe | ganzjährig |
| Ernte | Kontrolle | August |
| | Vorbereitung | Aug.-Sept. |
| | Reben einfahren | Aug.-Sept. |
| | Pflücke/Einhängen | Aug.-Sept. |
| | Pflücke/Springer | Aug.-Sept. |
| | Trocknung | Aug.-Sept. |
| | Konditionierung | Aug.-Sept. |
| | Pressen | Aug.-Sept. |
| | Abwaage | Aug.-Sept. |
| | Rebenhäcksel ausbringen | Okt. |
| Rebenstrunk beseitigen | Okt. | |
| Gerüstreparatur | Okt.-Dez. | |

Einige Produktionsschritte nehmen einen erheblichen Einfluss auf die Möglichkeit einer Bewässerung (s. Tab. 1). Hervorzuheben sind dabei besonders die Arbeitsschritte Aufdecken und Schneiden, die Hopfenpflege, speziell das Kreiseln, sowie die Bodenbearbeitungsschritte Grubbern, Fräsen und Ackern im Laufe der Vegetationsperiode und die Ernte am Ende. Diese verhindern eine dauerhafte oberirdische Installation der Tropfschläuche, wie es zum Beispiel im Weinbau durchgeführt wird. Dort werden die Tropfschläuche an Drahtrahmen in ca. 50 cm Höhe befestigt (Patzwahl, 2007), sodass nach unten genügend Platz für Bodenbearbeitungsschritte bleibt. Dies ist im Hopfen nicht möglich, weil lediglich die unterirdischen Pflanzenteile perennial sind und die oberirdischen Pflanzenteile bei der Ernte

vollständig entfernt werden. Eine dauerhafte oberirdische Installation der Tropfschläuche würde die notwendigen Arbeitsschritte behindern (vgl. 1.2.5.).

Als Düngeempfehlung wird in der Hallertau das Düngeberatungssystem für Stickstoff (DSN) nach mineralisiertem Stickstoff angewendet. Hierfür wird vor Vegetationsbeginn, meist Februar bis Anfang April, eine Mischprobe in 90 cm Tiefe gezogen und im Labor auf den Stickstoffgehalt (NO_3 und NH_4) untersucht. Darauf basierend erhalten die Landwirte eine vom Computer errechnete Düngeempfehlung, wobei der Sollwert bei Hopfen je nach Sorte und Ertragspotential des Standortes bei 160 bis 240 kg N/ ha liegt (Roßbauer und Zwack, 1989; LfL 2015).

Die Ernte stellt weitere Herausforderungen an die Landwirtschaft. So müssen die einzelnen am Betrieb kultivierten Sorten je nach Erntereife (Lutz *et al.*, 2009) in den Produktionsschritten Abreißen und Einfahren, maschinelles Pflücken und Trocknen der Dolden aufeinander abgestimmt werden, was je nach Witterungsverlauf jährliche Verschiebungen mit sich bringen kann. Dabei beginnt die Ernte mit den frühen Sorten, wie Hallertauer Mittelfrüher, durchschnittlich im letzten Drittel vom August und endet mit den späten Sorten, wie Herkules oder Mandarina Bavaria, in der zweiten Septemberhälfte (LfL, 2015).

Neben den Voraussetzungen der Sonnenscheindauer (vgl. 1.1.1.) besitzt Hopfen weitere Standortansprüche, wie gut durchwurzelbare Böden mit guter Wasserführung und einer geringen Anfälligkeit für Verdichtungen. Regnerische Sommer mit mäßigen Temperaturen haben meist hohe Erträge mit hohen Alphasäuregehalten zur Folge (Thomas, 1980; Srećec *et al.*, 2008 und 2013).

1.2. BEWÄSSERUNG

1.2.1. Wasser in der Pflanze

Die Organe ausreichend mit Wasser versorgter Landpflanzen bestehen zu 60 bis 98 % aus Wasser (Lösch, 2003). Die Wasseraufnahme geschieht über die Wurzeln und wird nach dem hydraulischen Prinzip des SPAC (Soil Plant Atmosphere Continuum) beschrieben (Huber, 1924; Gradmann, 1928; Van den Honert, 1948). Demnach verläuft die Verteilung des Wassers in der Pflanze durch Diffusionsgradienten zwischen Boden und Atmosphäre.

Aufgrund dessen lassen sich anhand der Pflanzenachse, beginnend an den Wurzeln bis hin zu den Blättern mit ihren Spaltöffnungen unterschiedliche Wasserpotentiale messen, welche letztlich Aufschluss über die Wasserverfügbarkeit einer Pflanze geben (Bierhuizen und Slatyer, 1965; Elfving *et al.*, 1972). Den Hauptantrieb stellt dabei die Atmosphäre mit je nach Luftfeuchtigkeit sehr niedrigem Wasserpotential dar, die sozusagen das Wasser durch die Pflanze aus dem Boden zieht.

Pflanzen nutzen Wasser als Solvens zur Verteilung von Nährstoffen und Stoffwechselprodukten sowie als Baustoff und zur Kühlung (Lange *et al.*, 2012).

Durch Bewässerung soll Trockenstress bei Pflanzen verhindert werden, welcher weitreichende Folgen für Pflanzen darstellt. So kommt es bei unzureichender Wasserversorgung zuerst zu einer Verringerung des Turgordrucks in den Zellen, was zu einer Abnahme des Streckenwachstums und der Hemmung von Zellteilung und -wachstum führen kann. Im weiteren Verlauf wird die Chlorophyll- und Proteinsynthese gehemmt und es kommt zu einer gesteigerten Synthese des sekundären Pflanzenstoffs Abscisinsäure (ABA) (Hsiao *et al.*, 1976; Mullet und Whitsitt, 1996; Korovetska *et al.*, 2014).

Durch eine Kombination aus Abnahme des Wassergehalts in den Zellen und einer gesteigerten Anreicherung von ABA kommt es zum Stomataschluss, welcher eine verringerte Wasserabgabe durch die Transpiration sowie eine Verringerung der Kohlenstofffixierung, im weiteren Verlauf auch als Assimilation bezeichnet, zur Folge hat. Außerdem wird das Enzym Nitratreduktase gehemmt, was sich auf die Stickstoffverfügbarkeit der Pflanzen auswirkt (Becker und Fock, 1986; Foyer *et al.*, 1998).

Dabei verlieren Landpflanzen das meiste Wasser passiv während der Aufnahme von CO₂, welches sie zur Synthese von Zucker benötigen. Prinzipiell erfolgt die Aufnahme von CO₂ auf Kosten hoher Wasserverluste, da Pflanzen nur einen geringen Anteil des von ihnen aufgenommenen Wassers für die Aufrechterhaltung des Stoffwechsels benötigen (Eschrich, 1995).

Eine Gaswechsellanlage stellt dabei ein praktisches Untersuchungsgerät zur Beurteilung der Produktivität einer Pflanze dar, da hierüber sowohl die Assimilation als auch der gleichzeitige Verlust von Wasser (Transpiration) in einer Messung dargestellt werden kann (Larcher *et al.*, 1981; Tenhunen *et al.*, 1985; Chartzoulakis *et al.*, 2002).

1.2.2. Bewässerung in der Landwirtschaft

Bereits vor etwa 7500 Jahren wurden in Mesopotamien Kanäle gebildet, um Weizen und Gerste künstlich mit Wasser zu versorgen (Frenken, 2009). Die Bewässerung von landwirtschaftlichen Kulturen soll ausbleibende Niederschläge ersetzen und dabei die Pflanzen bei ihrem Wachstum unterstützen. So werden vor allem in Ländern, wo die jährliche Verdunstung der Vegetation durch Niederschläge nicht gedeckt werden kann, die pflanzenbaulichen Kulturen durch Zusatzwasser in ihrem Ertrag stabilisiert bzw. gesteigert (Ehlers, 1996).

Im Jahre 2005 waren über 300 Mio. ha weltweit für eine Bewässerung vorbereitet, wovon gegenwärtig ca. 280 Mio. ha bewässert werden (Siebert *et al.*, 2010). Bei einer ackerbaulich genutzten Gesamtfläche von etwa 15 Mio. km² (Monfreda *et al.*, 2008) stehen somit weltweit rund 20 % der Flächen unter Bewässerung (s. Abb. 5). Bezogen auf die Kontinente werden in Asien 41 %, in Amerika 13 %, in Ozeanien 11 %, in Afrika 9 % und in Europa 7 % der ackerbaulich genutzten Flächen bewässert, wobei Reis, Weizen, Mais und Baumwolle die am stärksten bewässerten Kulturen darstellen (Portmann *et al.*, 2010). Dabei ist, begründet durch die wachsende Weltbevölkerung mit geschätzten über 11 Mrd. Menschen im Jahr 2100 (United Nations, 2015) und die Klimaerwärmung, eine steigende Tendenz zu erwarten (IPCC, 2014).

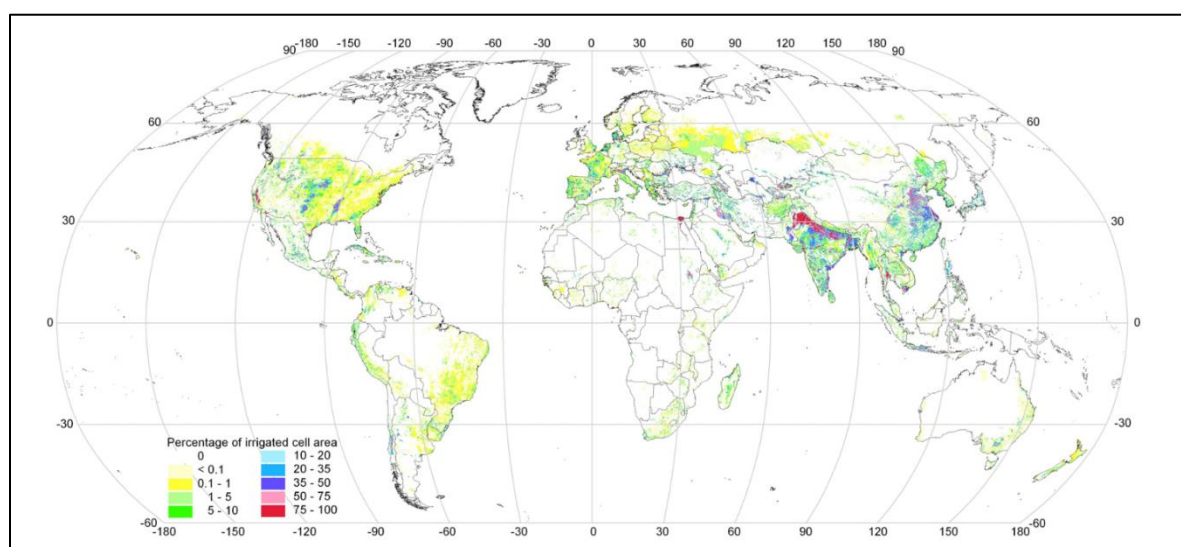


Abbildung 5: Prozentuale Häufigkeit von Bewässerung auf der Welt im Jahr 2000. Das Schaubild basiert neben Daten der FAO (Aquastat) auf nationalen und internationalen Erhebungen über installierte Bewässerungen und hat eine Auflösung von 5 auf 5 Winkelminuten, was am Äquator äquivalent zu ca. 80 km² ist (Siebert *et al.*, 2006).

1. EINLEITUNG

Bezogen auf Europa (s. Abb. 6) stehen in Spanien 3,3 Mio. ha, in Frankreich 2,9 Mio. ha, in Italien 2,5 Mio. ha, in Griechenland 1,5 Mio. ha, in Portugal 800 Tsd. ha, in den Niederlanden 476 Tsd. ha, und in Deutschland 220 Tsd. ha, unter Bewässerung, wobei die Zahl für dafür vorgesehene Flächen variieren kann (Siebert *et al.*, 2010).

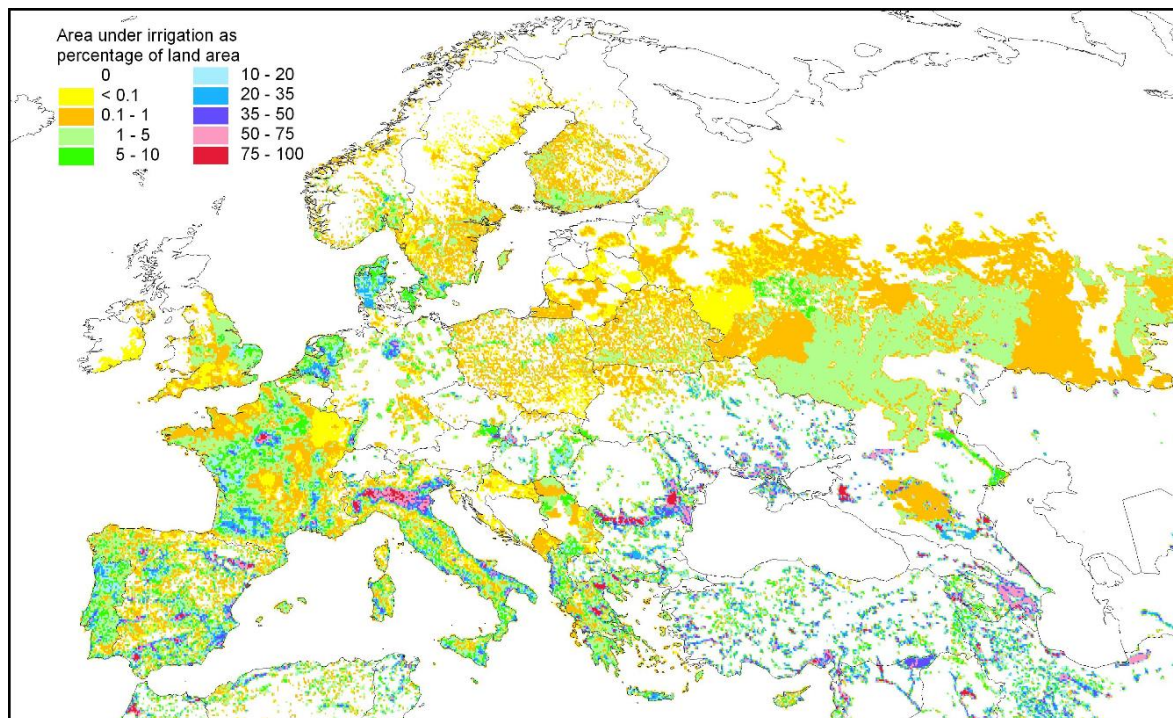


Abbildung 6: Prozentuale Häufigkeit von Bewässerung in Europa im Jahr 2000. Das Schaubild basiert neben Daten der FAO (AquaStat) auf nationalen und internationalen Erhebungen über installierte Bewässerungen und hat eine Auflösung von 5 auf 5 Winkelminuten, was am Äquator äquivalent zu ca. 80 km² ist (Siebert *et al.*, 2006).

In Deutschland sind die meisten bewässerten Flächen mit 92. Tsd. ha in Niedersachsen. Dahinter kommen mit je ca. 28 Tsd. ha die Bundesländer Sachsen-Anhalt und Hessen und mit je ca. 15 Tsd. ha die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Bayern steht mit knapp 10 Tsd. ha bewässerter Fläche an siebter Stelle im Bundesvergleich. Dabei werden in Deutschland hauptsächlich die Kulturen Kartoffeln, Zuckerrüben und Mais sowie Kulturen des Gemüseanbaus zusätzlich bewässert (Siebert *et al.*, 2006).

1.2.3. Bewässerungsformen und objektive Steuerung

Die älteste Form der Bewässerung ist die Oberflächenbewässerung. Hierbei werden Ackerflächen mit Wasser gestaut und unter Wasser gesetzt. Die Wassernutzungseffizienz ist hierbei allerdings sehr schlecht, da es sowohl zu hohen Verdunstungs- als auch zu hohen Versickerungsraten des Wassers kommt. Dennoch findet dieses Verfahren noch auf 2/3 aller bewässerten Flächen der Erde statt (Michel und Sourell, 2014).

Zur effizienteren Bewässerung von ackerbaulichen Kulturen stehen verschiedene Systeme zur Verfügung. So werden einerseits ortsfeste, teilortsfeste und mobile Anlagen unterschieden (Michel und Sourell, 2014). Meist erfolgt die Wasserbereitstellung aus oberflächennahem Grundwasser, wozu Pumpen in der entsprechenden Bodenschicht installiert werden die mit einer bestimmten Leistung Wasser fördern, welches über Zuleitungen auf die ausbringende Hardware verteilt wird.

Ortsfeste Beregnungsanlagen zeichnen sich durch orts- und flächengebundene Komponenten, wie Pumpe und Wasserverteilung aus und finden vor allem in Dauerkulturen Anwendung. Bei teilortsfesten Bewässerungsverfahren sind die Teile der Wasserbereitstellung, also Pumpe sowie Zuleitungen fest installiert und führen zu den zu bewässernden Feldstücken. Die Ausbringung des Wassers erfolgt dann über bewegliche Teile, wie zum Beispiel Kreisberegnungsmaschinen, welche zwischen Feldern gewechselt werden können. Bei mobilen Beregnungsmaschinen sind alle Anlagenteile beweglich, da diese während der Periode mehrmals auf- und abgebaut werden.

Eine moderne Weiterentwicklung der ortsfesten Beregnungsverfahren ist die sogenannte Mikrobewässerung, welche sich in Sprüh- und Tröpfchenbewässerung unterteilt. Dabei lassen sich die Komponenten, beginnend mit einem Brunnen mit Pumpe, weiter in eine Steuerungseinheit, einen Filter sowie Verteilerleitungen einteilen. Die Ausbringung erfolgt beim Sprühverfahren über Mikrodüsen, bei denen das Wasser nicht tropfenweise, sondern als Sprühnebel ausgebracht wird.

Die Tröpfchenbewässerung gilt als die effizienteste Ausbringungsmethode von Wasser (Sammis, 1980). Dabei wird das Wasser über Tropfschläuche direkt an der Pflanze über die Tropfelemente ausgebracht, und es kommt dabei zu wenig Verdunstung des ausgebrachten Wassers. Die Tropfelemente sind mit unterschiedlichen Abständen und Bewässerungsintensitäten, also Wassergabe pro Zeiteinheit erhältlich und können so individuell auf die Bedürfnisse der Kultur abgestimmt werden. Dabei können die Tropfschläuche entweder oberirdisch ausgelegt oder dauerhaft unterirdisch im Boden eingezogen werden. Die Verteilung des Wassers erfolgt dabei sehr punktuell. In Abbildung 7 ist die zweidimensionale Ausbreitung von 10 mm Wasser in einem Sand- und einem Lehmboden bei ober- und unterirdischer Bewässerung dargestellt (Schütze *et al.*, 2013).

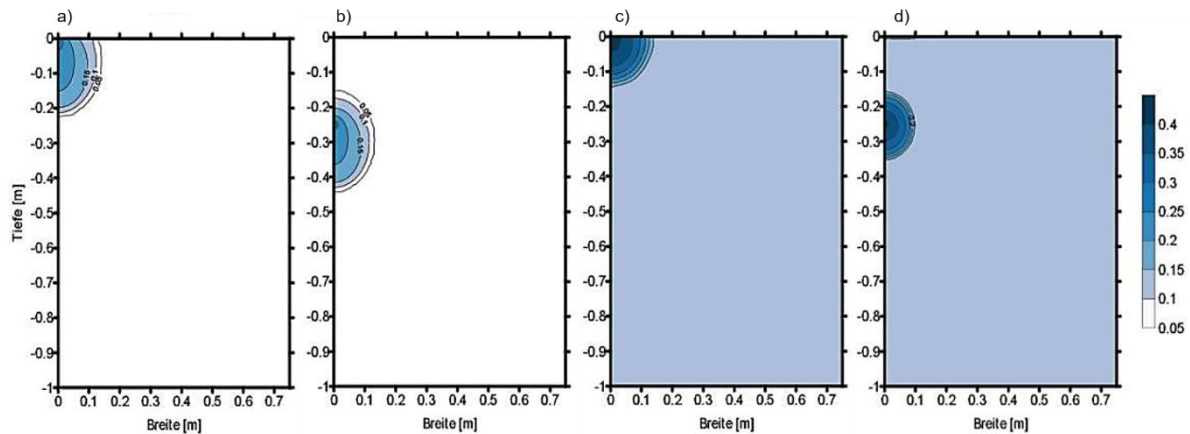


Abbildung 7: Zweidimensionale Ausbreitung von Wasser ausgehend von einem Tropfemitter mit einem Wasserauslass von 2 l/h nach 5 Stunden Bewässerung in einem trockenen Sandboden (a und b) und in einem trockenen Lehmboden (c und d). Aufgetragen ist der Wassergehalt von 5 – 40 % sowie die Tiefe und Breite [m] des Bodens. Bei a) und c) liegt der Tropfschlauch im Nullpunkt. Bei b) und d) jeweils in 25 cm Tiefe. (verändert nach Schütze *et al.*, 2013).

Unabhängig von der verwendeten Bewässerungsart sollte diese immer anhand einer objektiven Steuerung eine an die Kultur angepasste bedarfsgerechte Wasserausbringung gewährleisten (Jones, 2004). Dies soll die Bewässerungsentscheidung erleichtern und überflüssige Wasserausbringung verbunden mit Nährstoffauswaschungen in tiefere Bodenschichten verhindern (Gärdenäs *et al.*, 2005; Van Iersel *et al.*, 2009; Mailhol *et al.*, 2001).

Hierzu werden vor allem zwei Methoden unterschieden. Einerseits kann eine solche Steuerung anhand von im Boden installierten Sensoren geschehen, welche die Bodenfeuchte oder Saugspannung (vgl. 1.2.4.) im Boden messen und nach bestimmten Schwellenwerten die Bewässerung starten (Smajstrla und Locascio, 1996; Krüger *et al.*, 1999). Hierzu sollte man neben den optimalen Schwellenwerten auch den effektiven Wurzelraum der zu bewässernden Kultur kennen, damit die Steuerung objektiv angepasst werden kann.

Eine weitere Möglichkeit der Bewässerungssteuerung besteht in der Aufstellung einer sogenannten klimatischen Wasserbilanzierung (Allen *et al.*, 1998). Diese beruht auf dem Prinzip, die Menge an Wasser nachzuliefern, welche in einem gewissen Zeitraum von Pflanzen und Boden verdunstet wurde. Hierzu dienen Wetterstationen, die anhand mehrerer gemessener abiotischer Umweltfaktoren die tägliche Verdunstung einheitlich errechnen. Diese errechnete Verdunstung, die laut Konvention auf eine Grasfläche übertragen ist, kann dann über speziell entwickelte Korrekturfaktoren auf die jeweilige Kultur umgerechnet werden. Je nach Pflanzenart und dem damit verbundenen Wurzelwerk sowie der auf der Fläche vorherrschenden Bodenart stehen dann bestimmte Wasserreserven zur Verfügung, die nach Verdunstung und Niederschlag bilanziert werden und ab einem bestimmten kritischen Wert durch die Bewässerung nachgeliefert werden.

1.2.4. Einfluss unterschiedlicher Bodenarten

Man kann prinzipiell drei verschiedene Bodenarten unterscheiden. Diese sind nach Scheffer und Schachtschabel (2010) in Sand-, Schluff- und Tonböden unterteilt und unterscheiden sich in der Korngröße der beinhalteten Bodenpartikel, welche wiederum in unterschiedliche Hohlräume resultieren. Dabei definiert man die Fraktionen Sand (0,063 bis 2 mm Durchmesser), Schluff (0,002 bis 0,063 mm Durchmesser) und Ton (< 0,002 mm Durchmesser), welche aus physikalischer und chemischer Verwitterung des Grundgesteins eines Standortes entstehen. Je nach Menge der einzelnen Fraktionen, welche sich durch Siebung und Sedimentation feststellen lassen, ergibt sich daraus eine bestimmte Bodenart. Lehm Böden zeichnen sich durch einen etwa gleichen Anteil aller Partikelgrößen aus.

Dabei spielen die Fraktionsgrößen eine wichtige Rolle in der Wasserhaltefähigkeit der Böden, die mit der Adhäsionskraft der einzelnen Teilchen zusammenhängt. Kleinere Teile binden Wassermoleküle fester als große, was in einer bestimmten Wasserhaltefähigkeit der einzelnen Bodenarten resultiert und über die sogenannte pF-WG Kurve dargestellt wird (s. Abb. 8).

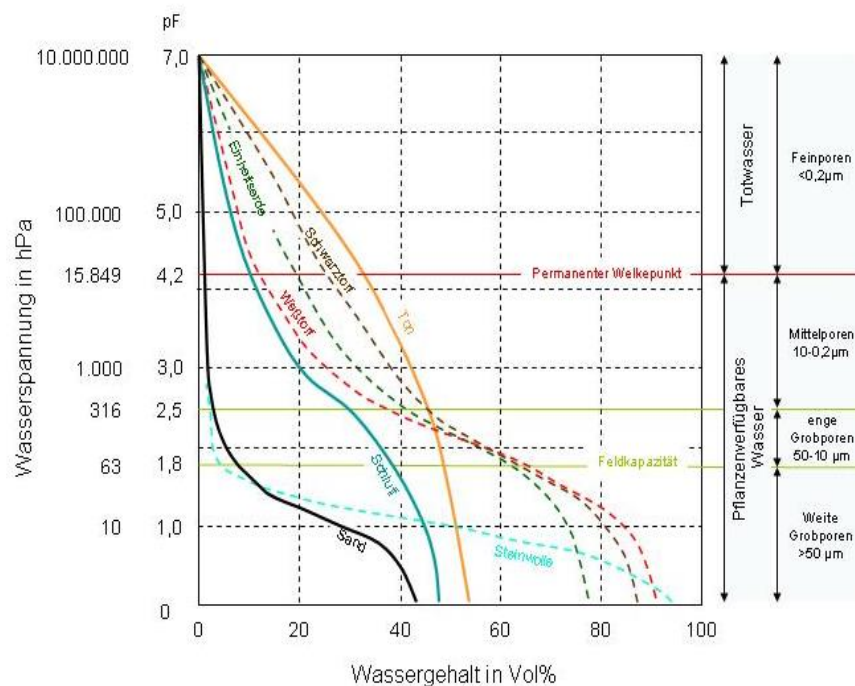


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wasserspannung. Ausgehend von unterschiedlich großen Partikeln weisen die verschiedenen Bodenarten (Sand, Schluff und Ton) bei denselben Wasser- oder Saugspannungen unterschiedliche Wassergehalte auf. Sand kann gegen die Schwerkraft am wenigsten Wasser halten, Schluff hingegen am meisten. Nur gartenbauliche Substrate besitzen ein noch größeres Wasserhaltevermögen als Schluffböden. Bildquelle: dev.bewasserungsmanagement.de/wissen/. Stand: 02.03.2016 (verändert nach Scheffer und Schachtschabel, 2010).

1. EINLEITUNG

Eine wichtige Kenngröße in diesem Zusammenhang stellt die sogenannte Saug- oder Wasserspannung dar, welche die Kraft in hPa angibt, wie stark das Wasser an den Bodenpartikeln festgehalten wird. Der dimensionslose pF- Wert stellt den logarithmierten Wert der Saugspannung dar, wobei p für Potenz und F für die freie Energie des Wassers steht.

Dabei definiert die Feldkapazität (FK) eines Bodens die Menge an Wasser, die ein Boden nach 2 bis 3 Tagen gegen die Schwerkraft mit einer Kraft von ca. 63 hPa festhalten kann. Ein solcher Boden ist wassergesättigt.

Bei einer Saugspannung von ca. 15.000 hPa spricht man vom permanenten Welkepunkt (PWP). Dieser ist unabhängig von der Bodenart als die Kraft definiert, bei der Pflanzen nicht mehr in der Lage sind, das Wasser mit ihren Wurzeln aufzunehmen.

Der Wassergehalt eines Bodens zwischen dem pF-Wert von 4,2 (permanenter Welkepunkt) und 1,8 (Feldkapazität) gibt dabei das pflanzenverfügbare Wasser (PVW) oder die nutzbare Feldkapazität (nFK) in mm/dm bzw. Vol.-% eines Bodens an (Scheffer und Schachtschabel, 2010). Demnach hat ein Schluffboden, welcher aus einem großen Anteil aus Mittelporen besteht, am meisten Wasser gespeichert. Sandböden, mit einem großen Anteil an Grobporen können weniger Wasser speichern, während Tonminerale die Wassermoleküle so sehr festhalten, dass diese nicht mehr von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden können. Man bezeichnet dieses Wasser, welches zwar noch im Boden gespeichert ist, als Totwasser. Allerdings unterscheiden sich die Wassergehalte der Böden bei bestimmten Saugspannungen, weshalb man für Bewässerungssteuerungen häufig Saugspannungssensoren verwendet, da sich deren Messungen auf alle Bodenarten übertragen lassen.

So besitzt ein Sandboden bei einem pF Wert von 1,8 zum Beispiel einen Wassergehalt von ca. 9 Vol.-% und bei 4,2 einen Wassergehalt von ca. 3 Vol.-% (s. Abb. 8). Somit wären in diesem Boden 6 mm/dm an Wasser pflanzenverfügbar. Bei einem Schluffboden ist der Wassergehalt bei einer Saugspannung von 63 hPa etwa 40 Vol.-% und beim permanenten Welkepunkt 20 Vol.-%, sodass hier 20 mm/dm an Wasser nutzbar sind (s. Abb. 8).

Demnach hat die Wasserhaltefähigkeit der Böden neben den grundsätzlichen Anbaubedingungen auch eine starke Auswirkung auf eine Bewässerung. So muss ein Sandboden wesentlich häufiger bewässert werden, da dort das Wasser schneller in tiefere Bodenschichten versickert, da es von den Sandteilchen nicht gebunden werden kann. Das Gleiche gilt aber auch für eine Bewässerungsgabe. Während man einem Sandboden nur sehr wenig Wasser hinzufügen kann, benötigt man zum Auffüllen der Wasserreserve eines Lehmbodens weitaus mehr Wasser, um ihn wieder bis zur Feldkapazität aufzufüllen und pflanzenverfügbar zu machen.

1.2.5. Bewässerung von Hopfen

Aufgrund von Prognosen über die Klimaerwärmung (IPCC, 2014; Danneberg *et al.*, 2012) und über abnehmende Niederschläge in den Sommermonaten (s. Abb. 9) sind einige Hopfenlandwirte in Deutschland dazu übergegangen, ihre Hopfenflächen mit einem Tröpfchenbewässerungssystem auszustatten.

Seitens der Wasserwirtschaftsämter in den jeweiligen Landkreisen wurden dabei Wasserentnahmemengen von ca. 1000 m³/ha genehmigt. Dabei richten sich die Leistungen der errichteten Pumpen nach der Größe der zu bewässernden Schläge und liegen dabei im Durchschnitt bei ca. 20 m³/h, sodass bei einer Bewässerungsmenge von ca. 0,7 mm/h m² und einer durchschnittlichen Anbaufläche von 25 ha jede Fläche etwa 3 h am Tag bewässert werden kann.

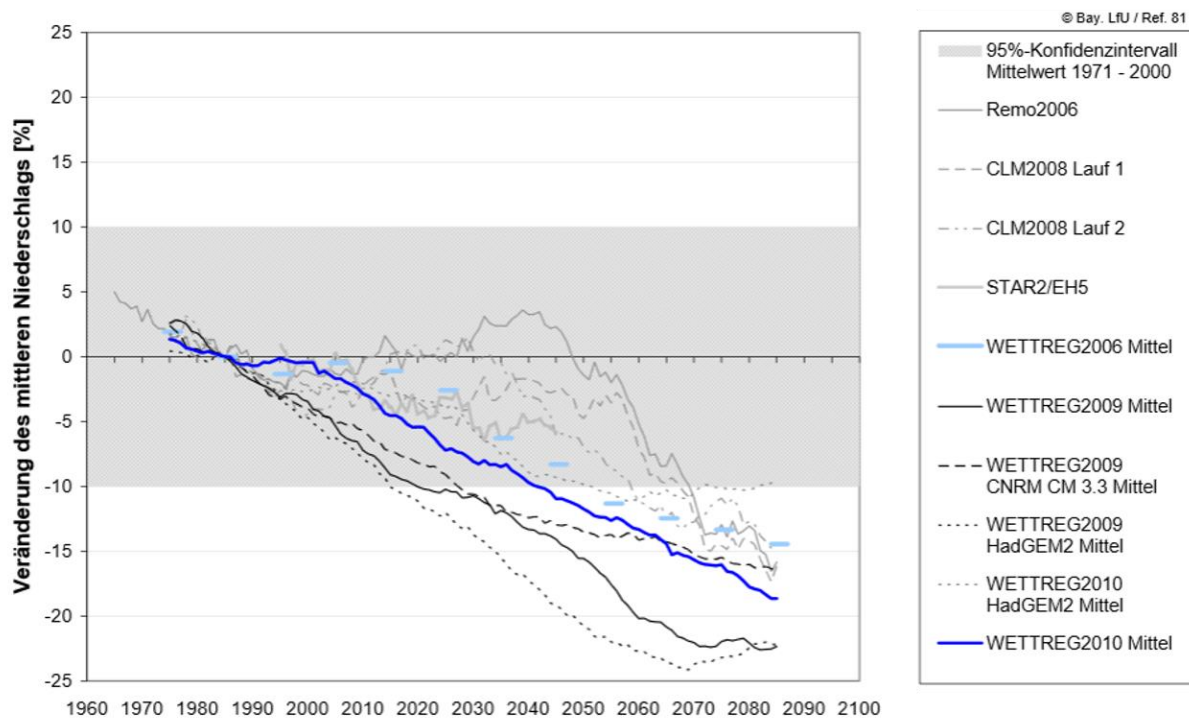


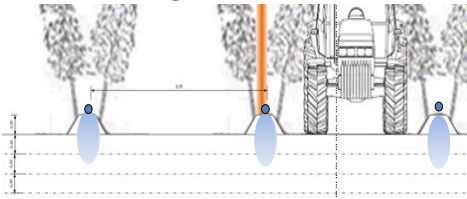
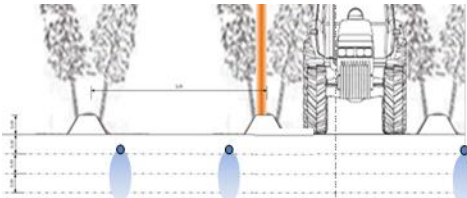
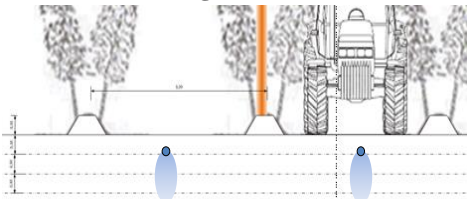
Abbildung 9: Relative Änderung des Gebietsniederschlags in Bayern im hydrologischen Sommerhalbjahr. Die Prognosen sind gegen den Kontrollzeitraum 1971 bis 2000 anhand verschiedener Modelle, deren Bezeichnungen in der Legende benannt sind, errechnet worden. So zeigen alle Modelle spätestens ab der Jahrhundertmitte eine Abnahme der Sommerniederschläge in Bayern an. Nach Danneberg *et al.*, 2012.

Wie in 1.1.2. beschrieben, sind einige Arbeitsschritte im Laufe einer Hopfensaison behindernd, was die dauerhafte Installation einer oberirdischen Bewässerung angeht. Umgangen wird dies durch jährliches Ausbringen der Tropfschläuche auf dem Bifang (AB) nach dem zweiten Aufackern, etwa Ende Juni, und erneutes Einrollen jedes Tropfschlauchs kurz vor der Ernte. Eine weitere praxisbezogene Möglichkeit ist das dauerhafte Einziehen der Tropfschläuche neben dem Bifang (NB), meist in einer Tiefe von 30 cm, wobei immer nur jede zweite Fahrgasse mit Tropfschläuchen bestückt wird, sodass für Pflanzenschutzmaßnahmen immer

1. EINLEITUNG

eine trockene Fahrgasse befahren werden kann. Die dritte Möglichkeit besteht ebenfalls im dauerhaften Einziehen von Tropfschläuchen, allerdings direkt in die Mitte einer jeden Fahrgasse, also zwischen den Bifängen (ZB) etwa 1,6 m von den Stöcken entfernt (vgl. Tab. 2). Dabei verfahren etwa 60 % nach der Methode AB, 35 % nach der Methode NB und 5 % nach der Methode ZB. Eine allgemeine Empfehlung gibt es bisweilen nicht.

Tabelle 2: Praxisrelevante Tropfschlauchpositionierungen im Hopfenanbau. Dargestellt sind die drei in der Praxis gängigen Möglichkeiten zur Positionierung der Tropfschläuche: Auf dem Bifang (AB), neben dem Bifang vergraben (NB) und zwischen den Bifängen vergraben (ZB) welche im Rahmen des Projektes untersucht wurden. Akh: Arbeitskraftstunden.

| Positionierung | Beschreibung |
|--|---|
| Auf dem Bifang (AB)  | Der Tropfschlauch wird nach dem 2. Anhäufeln der Bifänge (ca. Anfang Juni) auf diese verlegt. Das über den Tropfschlauch ausgebrachte Wasser erreicht dadurch direkt die im Bifang neu gebildeten Adventivwurzeln. Für das jährliche Auf- und Abbauen ist ein Arbeitsaufwand von ca. 10 Akh/ha erforderlich. |
| Neben dem Bifang (NB)  | Der Tropfschlauch wird einmalig in einer Tiefe von 30 cm neben dem Bifang mit einem speziellen Pflug eingezogen und verbleibt dauerhaft im Boden. Die im Bifang gebildeten Adventivwurzeln werden nicht erreicht. Bei der Verlegung in bestehenden Anlagen ist es möglich, dass Hauptwurzeln durchtrennt werden. Mögliche Probleme können durch Wurzeleinwüchse in das Tropfelement entstehen. |
| Zwischen 2 Bifängen (ZB)  | Der Tropfschlauch wird einmalig in der Fahrgassenmitte mit einem speziellen Pflug eingezogen. Diese Variante ist im Gegensatz zu der Verlegung neben dem Bifang in Bezug auf die Wurzeln etwas schonender. Die Fläche über dem Schlauch wird nicht befahren, ist aber in Bezug auf die Wasserapplikation am weitesten von den Pflanzen entfernt. Wie bei der Verlegung neben dem Bifang können Wurzeleinwüchse in das Tropfelement zu Problemen führen. |

Da zu Beginn des Projektes das Wurzelbild der Kulturpflanze Hopfen und damit vor allem der effektive Wurzelraum und das zur Verfügung gespeicherte Wasser für die Pflanzen noch weitestgehend unbekannt war, wurden die meisten Hopfengärten nach Gefühl, nach der Wasserverfügbarkeit und anhand der meteorologischen Geschehnisse gesteuert. Einige Landwirte folgten auch der Empfehlung, die Pflanzen nach der Saugspannung des Bodens im Bifangbereich zu steuern (LfL, 2012).

Während der negative Einfluss von Trockenheit auf den Ertrag und die Qualität von Hopfen aus anderen Anbaugebieten der Welt bekannt ist (Mozny *et al.*, 2009; Svoboda *et al.*, 2008; Slavik, 2000; Kopecky und Slavik, 1997 und Kopecky, 1991 für Tschechien, Pavlovic *et al.*, 2012 und 2013 für Slowenien, Srećec *et al.*, 2008 für Kroatien, Fandiño *et al.*, 2015 für Spanien, De Keukeleire *et al.*, 2007 für Belgien und Nakawuka, 2013; Delahunty *et al.*, 2011 und

Wample und Farrar, 1983 für die USA), wurden in Deutschland unterschiedliche Resultate mit künstlicher Bewässerung erzielt.

So zeigten Arbeiten aus der Hallertau aus dem Jahr 1968, dass durch Zusatzbewässerung an der Sorte Hallertauer Mittelfrüher niedrigere Erträge erzielt wurden als in den unbewässerten Parzellen, während die Alphasäure in den bewässerten Parzellen leicht erhöht war (Zattler und Maier, 1969). Im Jahr 1969 wurden gesteigerte Erträge im Bereich von 10 % bis 40 % erreicht; allerdings weist der Autor auf einen besseren Boden bei der beregneten Parzelle mit 40 % Steigerung hin und die Alphasäuregehalte waren bei allen bewässerten Varianten geringer oder gleich. Das Wasser wurde hier flächig über sogenannte Drehstrahlsprinkler ausgebracht und das Hauptaugenmerk der Untersuchung lag auf dem Einfluss von Düngung unter verschiedenen Bodenfeuchteregimen (Zattler und Maier, 1970).

In der Hopfenregion Spalt kam es laut Bayerischer Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP) in den Jahren 1977 bis 1980 nur im Jahr 1980 zu einer signifikanten Ertragssteigerung von 340 kg/ha an der Sorte Spalter, während die Alphasäure in den Jahren 1977 und 1980 um je 0,9 % und 0,4 % gesteigert wurden (LBP, 1981).

Ein dreijähriger Versuch zur Auswirkung der Tröpfchenbewässerung an der Sorte HM in der Hallertau ergab in allen Jahren keine Einflüsse, weder auf den Ertrag noch auf die Alphasäure (LBP, 2002).

1.3. FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG

1.3.1. Feldversuche zur Tröpfchenbewässerung

Aufgrund unterschiedlicher Ergebnisse über den Einfluss von Bewässerung auf den Ertrag und den Alphasäuregehalt von Hopfen in Deutschland, wurden verschiedene Feldversuche angelegt, die der empirischen Untersuchung in den Jahren 2012 bis 2015 dienen sollten (vgl. 2.1.1. und 2.1.2.). Da die Zeitfenster für Untersuchungen an Hopfen mit ca. 3 Monaten sehr knapp sind und Niederschläge die Versuche beeinflussen, wurden mehrere Strategien verfolgt. An zwei verschiedenen Standorten mit jeweils unterschiedlichen Bodenarten (Sand- und Lehmboden) fanden zwei identische Versuche gleichzeitig statt. Die Kernfragen in dieser Versuchsanstellung lauteten:

1. Werden der Ertrag und der Gehalt an Alphasäure von Hopfen durch Tröpfchenbewässerung gesteigert?
2. Wo befindet sich die optimale Lage von Tropfschläuchen, um die Pflanze mit Wasser zu versorgen?
3. Welche Methode eignet sich am besten zur objektiven Bewässerungssteuerung von Hopfen?

In einem weiteren Versuch wurde gezielt versucht, Niederschläge auszuschließen und Trockenstress zu induzieren (vgl. 2.1.3.). Hierfür wurden an zwei verschiedenen Sorten Teile von Hopfengärten mit Folie abgedeckt und dadurch die natürlichen Niederschläge ausgeschlossen. Daraufhin wurde in unterschiedlichen Intervallen die Bewässerung wochenweise abgeschaltet und der Einfluss dieses induzierten Trockenstress auf Ertrag und Alphasäuregehalt hin untersucht. Dabei wurde der Frage nachgegangen:

4. Wird durch induzierten Trockenstress der sekundäre Pflanzenstoff Alphasäure gesteigert?

Ein dritter Versuch in den Jahren 2014 und 2015 wurde mit verschiedenen Applikationsdauern der Beregnung bei unterschiedlichen Schlauchpositionierungen durchgeführt (2.1.4.). Eine unbewässerte Parzelle, die lediglich Niederschläge zur Wassernachfuhr bekam, diente als Kontrolle.

5. Wirken sich unterschiedlich ausgebrachte Wasserapplikationen mit Hinsicht auf die Bewässerungsdauer sowie die Positionierung der Tropfschläuche unterschiedlich auf den Ertrag und den Alphasäuregehalt von Hopfen aus?

1.3.2. Physiologische Untersuchungen an Hopfen

Um den Einfluss von Trockenstress auf Hopfen messtechnisch zu erfassen, wurden physiologische Messungen mittels Gaswechsellanlagen durchgeführt.

In einer Voruntersuchung im Gewächshaus wurden Lichtkurven an Jungpflanzen von *Humulus lupulus* gemessen und nach Assimilation und Transpiration ausgewertet (vgl. 2.2.1.). Da hierzu unzureichende Grundlagen vorlagen, beliefen sich die Hauptfragen auf:

1. Ist Trockenstress von Hopfen durch Gaswechsellmessungen detektierbar?
2. Wie hoch liegt der Lichtsättigungspunkt für Hopfen?

Ausgehend vom Lichtsättigungspunkt wurde die potentielle Assimilation und Transpiration unter Freilandbedingungen an bewässerten und unbewässerten Hopfenpflanzen gemessen (vgl. 2.2.2.), wobei untersucht werden sollte:

3. Unterscheiden sich bewässerte Hopfenpflanzen hinsichtlich ihrer Assimilation und Transpiration von unbewässerten Hopfenpflanzen?
4. Welche meteorologischen Faktoren beeinflussen Assimilation und Transpiration bei Hopfen am stärksten?

Weitere Messungen bei gegebener Lichtstärke sollten daraufhin die tatsächliche Assimilation und Transpiration im Feld quantifizieren (vgl. 2.2.3.). Hierbei wurde den Fragen nachgegangen:

5. Unterscheiden sich die Photosyntheseleistung und die Transpiration von bewässerten und unbewässerten Pflanzen unter natürlichen Lichtverhältnissen im Feld?
6. Wieviel Wasser verbraucht Hopfen annäherungsweise über einen Tag bzw. über eine Saison, und deckt sich die Erkenntnis mit errechneten Verdunstungswerten?

1.3.3. Rhizosphäre von Hopfen

Um eine Bewässerung effektiv steuern zu können, ist es notwendig, den Verlauf der Wurzeln und die damit verbundenen Wasserreserven im Boden zu kennen. Da nur wenig Informationen über das Wurzelwerk und damit die Wasserreserven von Hopfen zur Verfügung standen, wurden insgesamt drei Totalausgrabungen und zwei Teilausgrabungen der Wurzel von *Humulus lupulus* auf zwei unterschiedlichen Bodenarten an je zwei Sorten durchgeführt (vgl. 2.3.). Dabei waren die wichtigsten Fragen:

1. Welche Form hat der Phänotyp der Wurzel von Hopfen?
2. Welche Wasserreserven stehen der Pflanze dadurch zur Verfügung?
3. Inwieweit unterscheiden sich verschiedene Hopfensorten, kultiviert auf unterschiedlichen Bodenarten, hinsichtlich ihrer Bewurzelung?

1.3.4. Retrospektiv erstellte Wasserbilanzen in der Hallertau

Ausgehend von den erhaltenen Ergebnissen über die Wasserreserven von Hopfen wurden mittels retrospektiver Berechnungen Wasserbilanzen in der Hallertau erstellt, welche Aufschluss über die Wasserverfügbarkeit der letzten Jahre geben sollten. Hierzu wurden meteorologische Daten der Versuchsjahre sowie des Trockenjahres 2003 ausgewertet (vgl. 2.4.). Dabei lag der Fokus auf der Beantwortung folgender Fragen:

1. Wie sahen die Wasserbilanzen von Hopfen verschiedener Standorte mit verschiedenen Bodenarten in der Hallertau in den letzten Jahren aus?
2. Welcher Menge an Zusatzwasser wäre an diesen Standorten rechnerisch zu verabreichen gewesen?

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1. FELDVERSUCHE ZUR TRÖPFCHENBEWÄSSERUNG

2.1.1. Bewässerung mit Steuerung nach Saugspannungen

2.1.1.1. Standorte und Bodeneigenschaften

Über die Jahre 2012 bis 2014 wurde der Einfluss von Bewässerung in der Hallertau auf zwei unterschiedlichen Bodenarten (Lehm- und Sandboden) untersucht (s. Tab. 3). Hierzu wurden zwei Standorte ausgewählt, die im Vorfeld festgelegte Kriterien (s. Anhang Tab. 16) erfüllten und auf denen, wie nachfolgend beschrieben, zwei identische Versuche aufgebaut wurden.

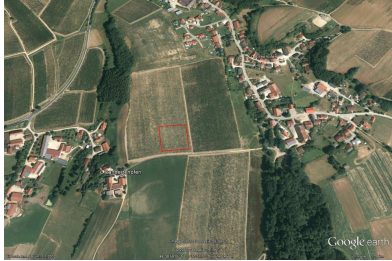

In der Hopfenforschung ist es üblich, mit praktizierenden Hopfenlandwirten zusammenzuarbeiten, da die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft mit dem Hopfenforschungszentrum Hüll nicht über ausreichende Flächen für alle relevanten Versuchsfragen verfügt und darüber hinaus eine Betreuung der Flächen bezüglich Pflanzenschutzmaßnahmen seitens der Landwirte gewährleistet werden kann.

Der Standort Attenhofen, östlich von Mainburg und zentral in der Hallertau gelegen, zeichnet sich durch einen lehmigen Boden mit einer durchschnittlichen Feldkapazität von 18 Vol.-% aus. Der Standort Karpfenstein befindet sich in der Nähe von Neustadt a. d. Donau, nördlich in der Hallertau. Er befindet sich auf sandigem Boden mit einer Feldkapazität von durchschnittlich 13,5 Vol.-%. Der Standort Attenhofen wird aufgrund seiner Bodenbestandteile (vgl. Abb. 10) als schluffiger Lehm (Lu) eingestuft. Bisher war auf dem Standort keine Bewässerung installiert. Der Boden in Karpfenstein wird als toniger Sand (St2) eingestuft. Hier wurde der Hopfen seit dem Einlegen oberirdisch auf dem Bifang bewässert.

Die im Vorfeld durchgeführte Korngrößenbestimmung gibt die genauen Merkmale der Bodenansprache durch die Abteilung Bodenkunde der LfL mittels Siebung und Sedimentation nach ISO DIN 11277 (2002) wieder. Abbildung 10 zeigt die Zusammensetzung der verschiedenen Bereiche im Bifang („B“) und in der Fahrgasse („F“) jeweils in 30 cm und 60 cm Tiefe.

2. MATERIAL UND METHODEN

Tabelle 3: Vergleich der Versuchsstandorte zur Bewässerung mit Steuerung nach Saugspannungen. Die angegebene Bodenart basiert auf den Untersuchungen der Bestandteile in Abbildung 10. Die Koordinaten und Bilder stammen von der Onlineplattform google-Earth, google Inc. USA (größere Versionen s. Anhang Abbildungen 49 und 50). Die Angaben zur Feldkapazität stammen aus den Bodenuntersuchungen in der Bodenkunde der LfL in Freising und wurden aus 96 Einzelproben mittels hängender Saugplatte bestimmt und sind hier als Mittelwert angegeben.

| Standort | Attenhofen | Karpfenstein |
|---|---|--|
| Luftbild |  |  |
| Koordinaten | 48°38'59.05"N 11°50'37.10" O | 48°46'48.68"N 11°47'01.36" O |
| Bodenart | schluffiger Lehm (Lu) | toniger Sand (St2) |
| Alter der Anlage | 4. Standjahr | 4. Standjahr |
| Ertragspotential der letzten Jahre | 2800 - 3500 kg/ha | 2800 - 3500 kg/ha |
| Bisheriges Bewässerungssystem | ohne | Tropfbewässerung auf dem Bifang |
| Nutzbare Feldkapazität | 18 Vol.-% | 13,5 Vol.-% |

Der Boden in Attenhofen bestand im Bifang in 30 cm Tiefe aus 20,5 % Ton, 52,9 % Schluff und aus 26,6 % Sand. In 60 cm Tiefe waren mit 26,7 % Ton, 55,9 % Schluff und 17,4 % Sand weniger Sandanteile vorhanden. In der Fahrgasse wurden in 30 cm Tiefe 21,9 % Ton, 52,6 % Schluff und 25,5 % Sandanteile festgestellt. In 60 cm Tiefe fanden sich 30,4 % Ton, 58,7 % Schluff und 10,9 % Sand.

In Karpfenstein wurden im Bifang in 30 cm Tiefe die Werte 4,4 % Ton, 4,6 % Schluff und 91 % Sand festgestellt und in 60 cm Tiefe 1,9 % Ton, 3,2 % Schluff und 94,9 % Sand. In der Fahrgassenmitte ergaben sich folgende Werte: In 30 cm Tiefe: Ton 4,2 %, 5,8 % Schluff und 90 % Sand und in 60 cm Tiefe: 2,3 % Ton, 3,3 % Schluff und 94,4 % Sand.

Die genaueren Abstufungen sind Abbildung 10 zu entnehmen.

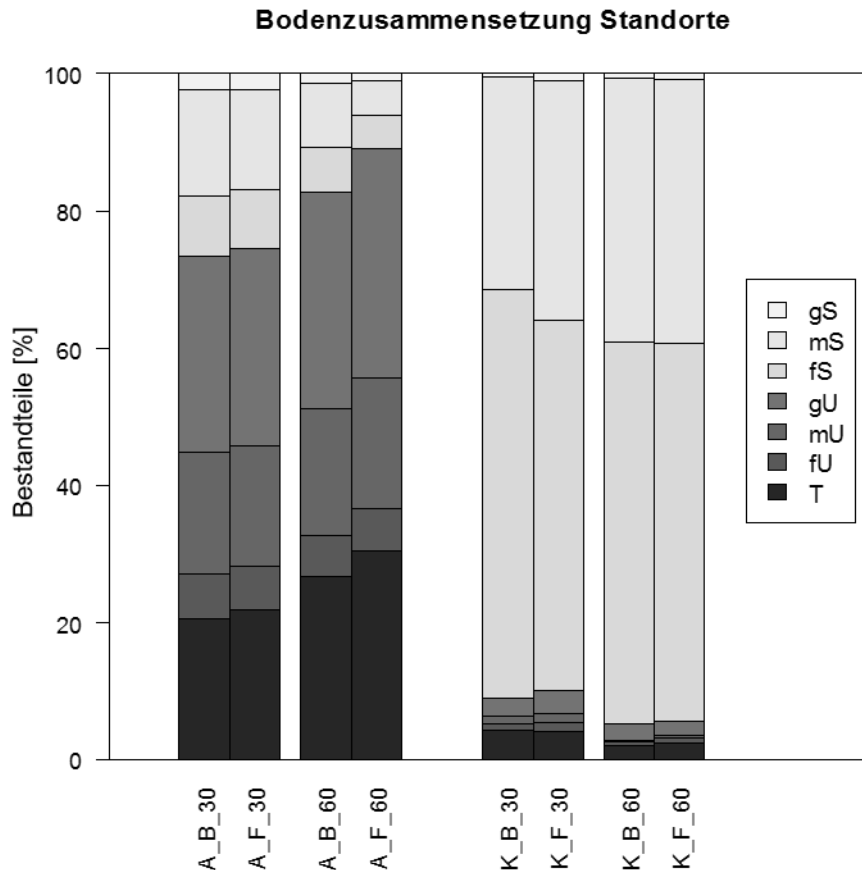


Abbildung 10: Prozentualer Anteil der Korngrößen im Boden der Versuchsstandorte. An jeder Stelle wurden vier Proben entnommen ($n=4$) und der prozentuale Anteil der Bodenteilchen mittels Siebung und Sedimentation nach DIN ISO 11277 (2002) bestimmt. Angegeben ist der Mittelwert der jeweiligen Bestandteile aus den vier Proben. A: Attenhofen, K: Karpfenstein, B: Bifang, F: Fahrgasse, 30: 30 cm Tiefe und 60: 60 cm Tiefe. Die Kurzzeichen beschreiben: gS: Grobsand (0,63 bis < 2,0 mm), mS: Mittelsand (0,2 bis < 0,63 mm), fS: Feinsand (0,063 bis < 0,2 mm), gU: Grobschluff (0,02 bis < 0,063 mm), mU: Mittelschluff (0,0063 bis < 0,02 mm), fU: Feinschluff (0,002 bis < 0,0063 mm) und T: Ton (< 0,002 mm).

2.1.1.2. Untersuchte Hopfenpflanzen

Auf beiden Standorten wurde der Bewässerungseinfluss an der Bittersorte Herkules (HS) untersucht. Diese Sorte ist als sehr massige Pflanze mit einem hohen Biomassezuwachs bis zu 25 kg Grünbiomasse in vier Monaten bekannt (eigene unveröffentlichte Ergebnisse). Außerdem ist es eine Sorte mit den höchsten Alphasäuregehalten von 13 bis 17 % weltweit (Hopsteiner, 2015 b). Laut Angaben der betreibenden Landwirte wurde in den Vorjahren ein durchschnittliches Ertragspotential von 2800 - 3500 kg/ha auf beiden Standorten erreicht. Beide Hopfengärten wurden im Jahre 2009 angelegt, sodass die Hopfenpflanzen zu Beginn des Versuches vier Jahre alt waren. Der Abstand zwischen den Pflanzen betrug entsprechend der Empfehlungen der LfL (2015) 1,6 m, während die Bifänge 3,2 m Abstand zueinander hatten.

2.1.1.3. Tropfschläuche

Als Tropfschlauch wurde der druckkompensierende Schlauch „multibar“ der Firma Irritec, Italien, mit einer Stärke von 16 mm, einem Tropferabstand von 0,5 m und einem Wasserauslass von 1,1 l/h verwendet (s. Abb. 11). Bei einem Pflanzabstand von 1,6 m stehen jeder Pflanze durchschnittlich 3,2 Tropfemitter zur Verfügung.



Abbildung 11: Verwendeter Tropfschlauch „multibar“. Die selbstkompensierenden Tropfschläuche mit Tropfelement sind in den Stärken 16-20 mm erhältlich. Bildquelle: Irritec, <http://www.irritec.com/de/autokompensierende-tropfschlauche/> Stand: 23.05.15

Ein Vorteil von druckkompensierenden Tropfschläuchen besteht darin, dass nicht immer ein exakter Betriebsdruck der Bewässerungspumpe herrschen muss, um eine gleichmäßige Verteilung des ausgebrachten Wassers zu gewährleisten.

Das Bewässerungswasser stammte aus dem öffentlichen Wassernetz und wurde in Absprache mit dem Wasserzweckverband Hallertau in Au i. d. Hallertau (für Attenhofen) und dem Wasserzweckverband Biburg (für Karpfenstein) aus nahegelegenen Hydranten entnommen. Dies hatte den Vorteil, dass man unabhängig von möglichen Begrenzungen der Wasserverfügbarkeit einzelner betrieblicher Brunnen den Versuch durchführen konnte. Ausgehend vom Hydranten wurde eine 50 mm starke Zuleitung gelegt, die jeweils in fünf verschiedene Bewässerungskreisläufe mündete. Die Schläuche jeder Variante waren über Querverteilungen (vgl. Abb. 51, Anhang) miteinander verbunden und in einem Steuerungskasten mit Ventilen und einer Steuerungseinheit (vgl. 2.1.1.5.) verbunden.

2.1.1.4. Versuchsaufbau

Im Versuch wurden drei verschiedene Positionierungen der Tropfschläuche miteinander verglichen. Neben oberirdischer Bewässerung, bei der die Tropfschläuche auf dem Bifang (AB) liegen, auch Varianten mit unterirdisch vergrabenen Tropfschläuchen neben dem Bifang (NB) und in der Fahrgassenmitte zwischen den Bifängen (ZB). Dies waren zu Beginn des Projektes die gängigsten Verlegemethoden der Praxis (vgl. Tab. 2).

Je Versuch wurden sechs verschiedene Varianten mit sechsfacher Wiederholung angelegt (s. Abb. 12). Dabei wurden drei oberirdische Varianten („AB150“, „AB300“ und „AB600“) nach unterschiedlichen Saugspannungswerten und demnach mit unterschiedlichen Wassermengen bewässert. Die Varianten „NB300“ und „ZB300“ erhielten dieselbe Applikation an Wasser wie die Variante AB300. Die unbewässerte Kontrolle erhielt lediglich die vor Ort gefallenen Niederschläge und diente als Vergleichsparzelle.

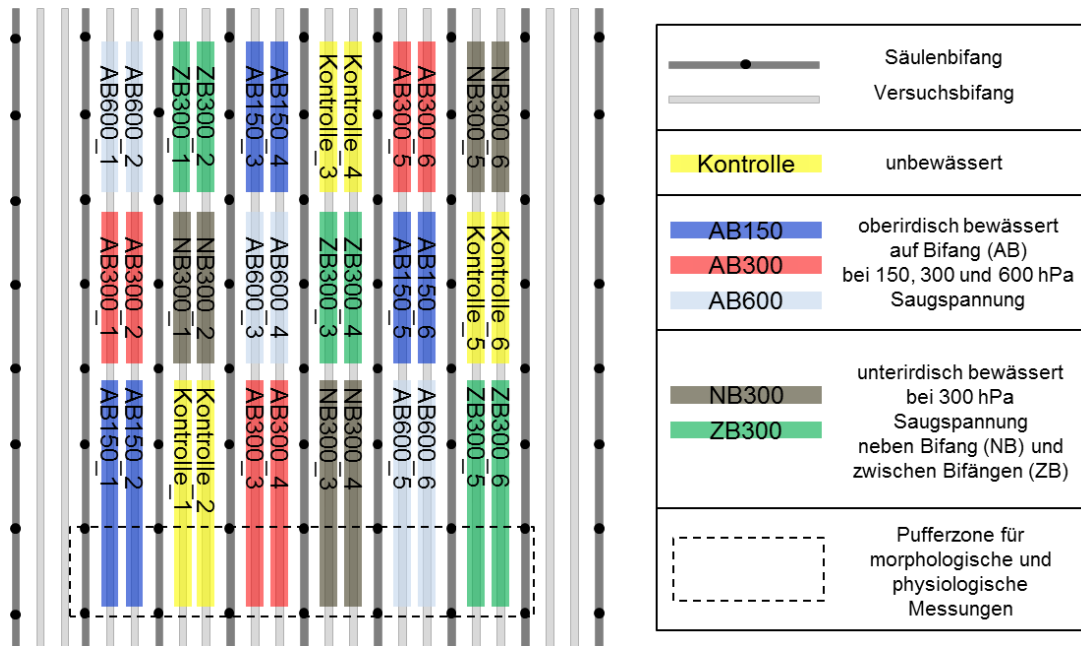


Abbildung 12: Versuchsaufbau mit den Varianten AB150, Kontrolle, AB300, NB300, AB600 und ZB300. Dabei wurden die sogenannten Säulenbifänge als Pufferzonen zwischen den Varianten ausgelassen. Die sechs verschiedenen Varianten sind über das Feld randomisiert wiederholt (n=6). Zwischen zwei Säulen befinden sich jeweils 7 Pflanzen, sodass in jeder Parzellen exakt 14 Pflanzen vorkamen, wovon 10 beerntet wurden. Im vorderen Bereich (gestricheltes Rechteck) wurden zusätzliche Bereiche mit weiteren 7 Pflanzen für morphologische und physiologische Untersuchungen geschaffen, die nicht in die Erntemittlungen einfließen. Hier wurden auch die Sensoren zur Ermittlung der Wasserspannung installiert.

Aufgrund der besonderen Schlauchanordnung der Variante ZB300, in der drei Schläuche zwischen vier Bifängen verlegt werden mussten, um eine Vergleichbarkeit zu den übrigen Varianten zu gewährleisten (vgl. Abb. 51, Anhang), wurden immer zwei Parzellen jeder Variante nebeneinander gelegt. Zwischen den jeweiligen Parzellen verblieben die Säulenbifänge als Pufferzonen.

Des Weiteren dienten bestimmte Bereiche im vorderen Bereich der Versuchsfelder als Untersuchungsbereich für morphologische und physiologische Untersuchungen. Dieser Bereich wurde nicht in die Ernte mit einbezogen.

2.1.1.5. Aufzeichnung und Steuerung nach Saugspannungen

2.1.1.5.1. Einbau der Sensoren

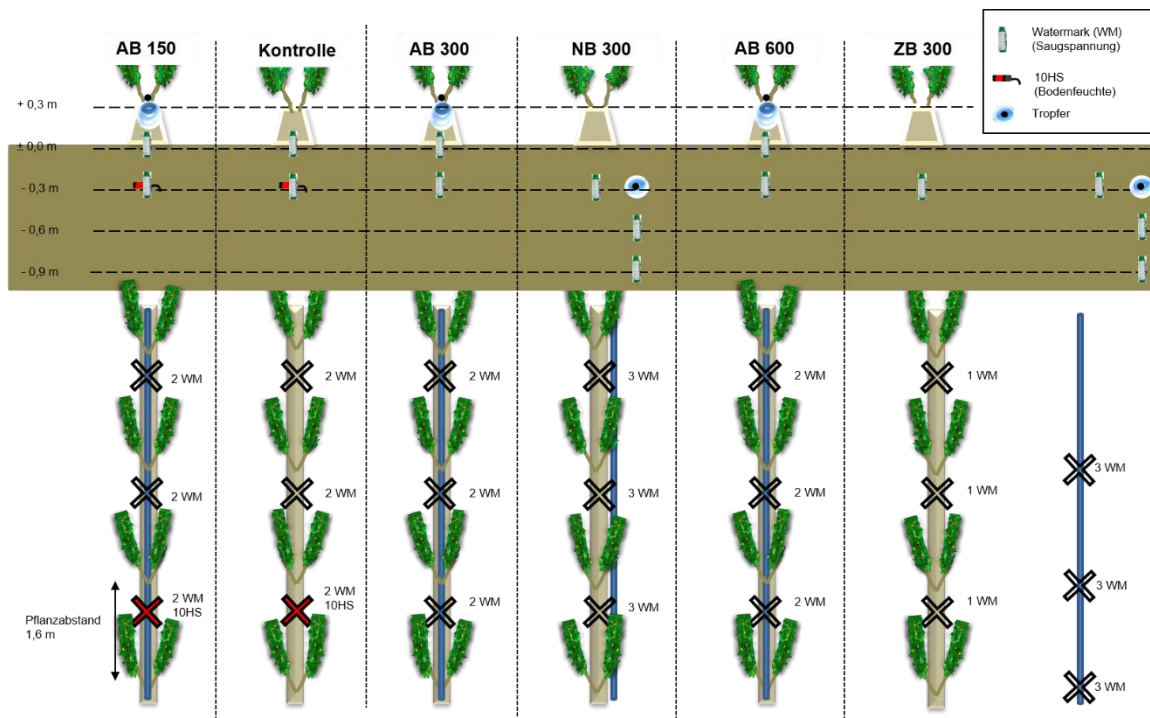


Abbildung 13: Sensoranordnung in den Versuchsvarianten (Querschnitt und Aufsicht). Unabhängig von der Variante wurde ausgehend vom Tropfelement der Tropfschläuche (mit Ausnahme der unbewässerten Kontrolle) immer in 30 cm und 60 cm Tiefe ein Watermarksensor (WM) eingeschlämmt. Dabei diente der obere zur Festlegung der Bewässerung. Der untere sollte neben der Saugspannung auch Versickerungen detektieren. Bei den Varianten NB und ZB wurden zusätzlich weitere Sensoren auf Höhe des Tropfschlauches installiert. In den Varianten AB150 und Kontrolle wurden 60 cm unter dem Tropfschlauch zusätzlich sogenannte 10HS-Bodenfeuchtesensoren (rot-schwarz) verbaut, welche Auswertungen in 3.2.2 dienten. Außer den 10HS-Bodenfeuchte-Sensoren wurden alle Messpunkte in der Pflanzreihe dreifach wiederholt.

Die Aufzeichnung der Saugspannungen erfolgte in jeder Variante sowohl 30 cm als auch 60 cm unter dem Tropfelement immer ca. in der Mitte von zwei Hopfenpflanzen (s. Abb. 13). Bei den oberirdisch ausgelegten Varianten AB bedeutete dies, einen Sensor auf Höhe der Schneidsohle (etwa 30 cm unter der Dammkrone) und 30 cm unter der Schneidsohle, also 60 cm unter dem Bifang.

Bei den Varianten NB und ZB, bei denen der Schlauch in 30 cm Tiefe vergraben lag, wurde zur Vergleichbarkeit ein Sensor in 60 cm und einer in 90 cm Tiefe eingebaut, also ebenfalls 30 und 60 cm unter dem Tropfelement. Bei der Variante NB geschah dies ebenfalls in der Mitte von zwei Pflanzen, bei der Variante ZB in der Höhe einer Pflanze.

Zusätzlich wurde auf Höhe des Tropfschlauches in 30 cm Entfernung ein Sensor angebracht. Im Falle von NB war dieser äquivalent zu dem Sensor in 60 cm Tiefe unter dem Tropfschlauch der oberirdisch bewässerten Varianten. In der Variante ZB wurde ebenfalls ein Sensor in 60 cm Tiefe in der Dammkrone vergraben (s. Abb. 13).

In der unbewässerten Kontrolle wurde vergleichbar zu den Varianten AB ein Sensor in 30 und ein Sensor in 60 cm Tiefe eingebaut. Jeder Messpunkt wurde dreifach wiederholt.

Die Installation erfolgte jährlich nach gleichem Ablauf. Nachdem die Hopfentriebe an den Drähten angeleitet wurden, erfolgte Anfang Juni das erste Anhäufeln des Bifangs, gefolgt vom zweiten Anhäufeln wenige Tage danach. Erst dann konnten die oberirdischen Tropfschläuche für den Versuch ausgelegt werden. Diese waren für die Installation der Watermarksensoren notwendig, da diese stets unter einem Tropfelement ca. in der Mitte von zwei Pflanzen liegen mussten (vgl. Abb. 13). Erst nach diesem Schritt konnte mittels eines Stechzylinders mit dem Durchmesser der Watermarksensoren ein Loch in der gewünschten Tiefe gestochen werden.

In dieses Loch wurde nach Herstellerangaben mittels sogenanntem Einschlämmen, bei dem ein Gemisch aus Erde und Wasser dazu führt, dass der Sensor Bodenschluss erhält und keine Lücken zwischen Sensor und umgebendem Boden entstehen, der Sensor installiert. Dabei wurde darauf geachtet, das Bodengefüge so wenig wie möglich zu stören. Die Sensoren waren vergleichbar zu einem Tensiometer unterhalb eines Rohres befestigt, was den Einbau erleichterte.

Die erhaltenen Saugspannungswerte wurden für jede Variante und jedes Jahr einzeln gegen die Zeit aufgetragen. Dabei wurde bewusst auf die Bildung von Mittelwerten verzichtet, um eine Vergleichbarkeit der drei Wiederholungen zu gewährleisten.



Abbildung 14: Watermarkensensor zur Messung der Saugspannung. Messbereich 0 bis 2000 hPa. Bildquelle: Irrometer Comp., www.irrometer.com; Stand 27.10.15

2.1.1.5.2. *Watermarksensoren zur Ermittlung der Wasserspannung*

Als Sensor dienen Watermarksensoren der Firma Irrometer Comp. Inc., USA (s. Abb. 14). Diese bestehen aus zwei Elektroden, welche in ein spezielles granuläres Material, die sogenannte Matrix, eingebettet sind. Diese Matrix hat direkten Kontakt zum umgebenden Boden, mit dem nach korrektem Einbau ein Feuchtgleichgewicht hergestellt wird. Wird auf diese Elektroden ein Wechselstrom gegeben, stellt die Matrix je nach Feuchtegrad einen bestimmten elektrischen Widerstand dar. Bestimmte Widerstände definieren dabei eine jeweilige Saugspannung im Boden. Watermarksensoren erlauben dabei, Saugspannungen im Bereich von 0 bis 2000 hPa zu messen. Dies ist ein im Hopfenbau entscheidender Vorteil im Vergleich zu

sogenannten Tensiometern, welche als nicht wartungsfrei gelten, da sie nach einer Saugspannung von etwa 700 hPa, was gleichzeitig den maximalen Messbereich darstellt, mit Wasser nachgefüllt werden müssen, um den Saugspannungsverlauf messen zu können. Des Weiteren gelten Watermarksensoren als frostresistent und einfach in der Handhabung. Allerdings wird die Reaktion speziell in unterschiedlichen Bodenarten häufig als träge beschrieben (Spaans und Baker, 1992; Hanson, 2000). Neben Saugspannungen wurde in den Varianten AB150, AB300 und der Variante Kontrolle ebenfalls die Bodenfeuchte mit 10HS-Sensoren der Firma Decagon, USA gemessen. Dies erfolgte ausgehend vom Bifang in einer Tiefe von 60 cm. Diese Werte dienten der Auswertung der Daten aus 3.2.2.

2.1.1.5.3. *Definierte Schwellenwerte zur Bewässerung*

Die ermittelten Saugspannungen der oberirdischen Varianten AB, 30 cm unter dem Tropfschlauch, dienten als Messpunkt für einen Schwellenwert zur Bewässerung. Diese wurde jeweils bei 150 (AB150), 300 (AB300) und 600 hPa (AB600) ausgelöst. Hierbei wurde der jeweils erste Sensor jeder Variante verwendet und die anderen beiden Sensoren im Laufe der Saison beobachtet.

Die Varianten NB300 und ZB300 wurden nicht separat gesteuert; hier wurden die Saugspannungen lediglich aufgezeichnet. Bewässert wurden diese Parzellen anhand der Variante AB300. So war gewährleistet, dass diese drei Varianten immer dieselbe Menge an Wasser erhielten.

Im Versuchsjahr 2014 wurde auf beiden Standorten in der Variante AB150 nur noch die Saugspannung registriert und eine annähernd tägliche Bewässerung von drei Stunden verabreicht. Hintergrund war das Ziel, eine Bewässerungsmenge von über 100 mm zu erreichen, was in den Vorjahren nicht erreicht wurde.

2.1.1.5.4. *Steuerung der Bewässerung*

Alle Sensoren waren in einer Reihenschaltung über mehrere Knoten an das Modul „ICA 60“ (s. Abb. 15) der Firma Pessl, Österreich, angeschlossen, welches gleichzeitig an die Steuerungsventile (Baccara Geva Ltd., Israel) der einzelnen Varianten angeschlossen war. Das Steuergerät verfügt über eine internetbasierte Benutzeroberfläche (www.fieldclimate.com), anhand derer die Werte abgerufen sowie Bewässerungen programmiert werden können.

Des Weiteren wurde an beiden Standorten die Wetterstation „imetos“ der Firma Pessl, Österreich (s. Abb. 15), aufgebaut, um die genauen Wettergeschehnisse vor Ort dokumentieren zu können. Die ermittelten Parameter mit Einheiten der Wetterstation sind in Tabelle 17 im Anhang zusammengefasst.

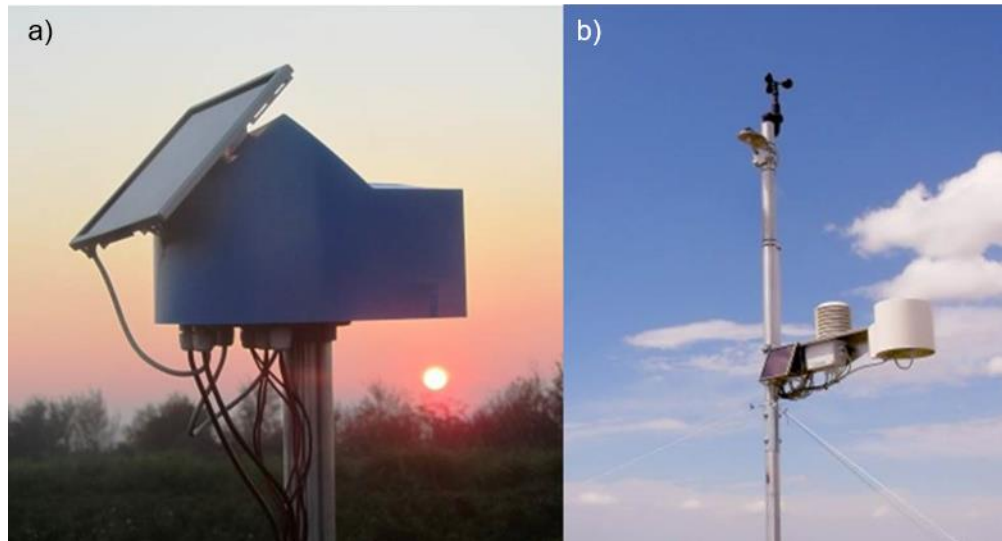


Abbildung 15: Steuerungseinheit ICA 60 (a) und Wetterstation imetos (b). Das Steuerungsmodul ICA 60 wurde sowohl mit den Ventilen der jeweiligen Varianten als auch mit den Sensoren verbunden und diente somit zur Aufzeichnung und Steuerung der einzelnen Varianten. Die Wetterstation „imetos“ zeichnete dabei die meteorologischen Ereignisse auf beiden Standorten auf. Die einzelnen Parameter sind in Tabelle 17 (Anhang) aufgelistet. Beide Geräte sind über das Mobilfunknetz online abrufbar und verfügen über eine internetbasierte Benutzeroberfläche. Bildquelle: Pessl Instruments, www.metos.at, Stand: 12.04.16

2.1.1.6. Ermittlung der verabreichten Wassermenge

Anhand der objektiv gemessenen Saugspannungen ergab sich für jede Variante und jede Saison eine spezifische Bewässerungsdauer. Nach der Formel:

$$\begin{aligned}
 & \text{Wassermenge [l/m}^2\text{]} \\
 &= \text{Tropferauslass [l/h]} : (\text{Tropferabstand [m]} * \text{Reihenabstand [m]}) * \text{Bewässerungsdauer [h]} \\
 &= \frac{1,1 \text{ [l/h]}}{0,5 \text{ [m]} * 3,2 \text{ [m]}} * \text{Bewässerungsdauer [h]} \\
 &= 0,6875 \text{ mm/m}^2 \text{ h} * \text{Bewässerungsdauer [h]}
 \end{aligned}$$

wurde die exakte Wassermenge [l/m²] bzw. [mm] abhängig von der Bewässerungsdauer für jede Variante ermittelt. Da die gesamte Anlage jährlich neu aufgebaut wurde und händisch unabhängig von der automatischen Steuerung ebenfalls Bewässerungen ausgelöst wurden, wurden die Gesamtwassermengen der einzelnen Varianten anhand von Wasseruhren kontrolliert.

2.1.1.7. Ermittlung von Ertrag und Alphasäuregehalt

Die Ernte erfolgte auf beiden Standorten ca. Anfang bis Mitte September - im Einklang mit Empfehlungen der LfL - je nach Witterungsverlauf der Saison, wenn das ideale Reifestadium der Hopfensorte Herkules erreicht war (Lutz *et al.*, 2009).

Hierzu wurden die sechs Wiederholungen vorerst mittels Etiketten markiert und immer exakt zehn der 14 Pflanzen (entspricht 20 Reben) einer Parzelle mittels eines Abreißgeräts mit

2. MATERIAL UND METHODEN

Ladewagen geerntet. Hierbei wurden in der Regel die ersten und letzten beiden Pflanzen einer Parzelle ausgespart, um Randeinflüsse zu verhindern.

Die Dolden wurden anschließend direkt vor Ort am jeweiligen Betrieb mittels einer Pflückmaschine von den Reben getrennt und das Grüngewicht der 36 Parzellen ermittelt. Aus jeder Gesamtmenge wurde eine ca. 2 kg schwere Mischprobe in luftdurchlässigen Säcken entnommen und etikettiert. Diese Proben wurden anschließend in der Trocknungsanlage des Hopfenforschungszentrum Hüll getrocknet.

Aus den getrockneten Proben wurde für jede der 36 Parzellen ein Faktor ermittelt, welcher zur Berechnung des gesamten Parzellenertrages nach folgenden Formeln verwendet wurde:

$$\begin{aligned}\text{Faktor} &= \text{Probetrocknen [kg]} \div \text{Probegrün [kg]} \\ \text{Parzellenertrag}_{\text{trocken}} \text{ [kg]} &= \text{Faktor} * \text{Parzellenertrag}_{\text{grün}} \text{ [kg]}\end{aligned}$$

Der ermittelte Wassergehalt $\text{H}_2\text{O}_{\text{Gehalt}} \text{ [%]}$ der Probe wurde nach folgender Formel auf einen standardisierten Wassergehalt von 10 % errechnet:

$$\text{Parzellenertrag}_{10\%} \text{ [kg]} = \text{Parzellenertrag}_{\text{trocken}} \text{ [kg]} * ((100 \text{ [%]} - \text{H}_2\text{O}_{\text{Gehalt}} \text{ [%]}) \div 90 \text{ [%]})$$

Aus dem erhaltenen Parzellenertrag wurde der jeweilige Ertrag auf kg/ha nach folgenden Formeln umgerechnet:

$$\text{Ertrag}_{\text{Rebe}} \text{ [kg]} = \text{Parzellenertrag}_{10\%} \text{ [kg]} \div 20$$

Je Hektar ergeben sich nach der Formel

$$\begin{aligned}\text{Reben/ha} &= 10000 \text{ m}^2 \div (\text{Reihenabstand (1,6 m)} * \text{Pflanzabstand (1,6 m)}) \\ &= 3906 \text{ Reben/ha}\end{aligned}$$

insgesamt 3906 Reben, bzw. 1953 Pflanzen.

Der Ertrag je Hektar in Kilogramm wurde für jede Variante nach der Formel

$$\text{Ertrag [kg/ha]} = \text{Ertrag}_{\text{Rebe}} \text{ [kg]} * 3906 \text{ Reben/ha}$$

ermittelt und auf 10 kg genau gerundet.

Der Alphasäuregehalt wurde für alle Proben nach dem im Hopfenforschungszentrum Hüll etablierten Standardverfahren der Nahinfrarotspektroskopie (NIR) im Labor ermittelt (Kammhuber, 2008) und ebenfalls auf einen Wassergehalt von 10 % standardisiert.

2.1.1.8. Statistische Auswertung

Aus allen sechs Wiederholungen jeder Parzelle wurde sowohl für die Erträge als auch für den Alphasäuregehalt das arithmetische Mittel (MW) und die Standardabweichung (STABW) errechnet (vgl. 2.6.). Die erhaltenen Mittelwerte (n=6) des Ertrages sind für alle Varianten und Jahre als Balkendiagramm mit STABW dargestellt. Die Alphasäuregehalte sind im selben Schaubild als Punktdiagramm über dem erhaltenen Ertragswert ebenfalls als MW (n=6) mit STABW dargestellt.

Um mögliche Bodenunterschiede im Versuchsfeld detektieren zu können, wurden die verschiedenen Varianten in Form einer Blockanlage (drei Blöcke von links nach rechts und drei Säulen von vorne nach hinten) eingeteilt und auf signifikante Unterschiede mithilfe einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) untersucht. Hierzu wurde zuerst die Voraussetzung der Varianzhomogenität der Varianten mittels eines Levene-Tests geprüft. Im Falle einer detektierten Signifikanz wurden die Unterschiede zwischen den Gruppen mittels des Student-Newman-Keuls (SNK) *posthoc*-Tests ermittelt und die Normalverteilung der Residuen mittels eines Shapiro-Wilk-Tests überprüft. Bei Verletzungen der Testvoraussetzungen wurde auf den parameterfreien Kruskal-Wallis-Test ausgewichen. Unterschiedliche Buchstabenkombinationen im Schaubild deuten auf signifikante Unterschiede zwischen den Varianten hin. Für eine genaue Beschreibung der statistischen Methoden siehe 2.6.

2.1.1.9. Abweichungen vom Versuchsdesign

2.1.1.9.1. Karpfenstein 2013

Im Jahre 2013 konnten am Standort Karpfenstein aufgrund eines Hagelschadens am 20. Juni, welcher im Bestand zu 80 % Kopfabschlag (Bezeichnung im Hopfenbau, wobei die Spitzenmeristeme der heranwachsenden Pflanzen durch Hagelkörner abgehauen werden) führte, nicht wie geplant alle Varianten auf die Erträge und Alphasäuregehalte untersucht werden. Hier wurden zum Erntetermin Anfang September lediglich in den Varianten AB150 sowie der unbewässerten Kontrolle intakte Pflanzen ausgewählt und von jeder einzelnen Rebe der Ertrag und der Alphasäuregehalt ermittelt. Für die bewässerte Variante AB150 wurden insgesamt acht Einzelreben (n=8) verwendet, für die unbewässerte Kontrolle konnten neun intakte Pflanzen geerntet werden (n=9). Aus den ermittelten Erträgen und Alphasäurewerten der einzelnen Reben wurde jeweils ein MW für den Ertrag und ein MW für die Alphasäure

gebildet und mittels eines ungepaarten studentischen t-Tests (Ertrag) und eines Mann-Whitney U-Tests (Alphasäuregehalt) auf signifikante Unterschiede hin untersucht. Die Ergebnisse sind ebenfalls nach den Berechnungen in 2.1.1.7. im Schaubild auf kg/ha hochgerechnet und als Balken- (Erträge) und Punktdiagramme (Alphasäure) dargestellt worden. Die Wasserspannungen wurden trotz der Beeinträchtigungen in allen Varianten aufgezeichnet.

2.1.1.9.2. Attenhofen 2014

Auf dem Versuchsstandort Attenhofen wurde vermutlich aufgrund von unsachgemäßer Bodenbearbeitung im Jahr 2013 ein Teil des zweiten Versuchsbifangs beschädigt. Hier entwickelten sich die Pflanzen der hintereinanderliegenden Parzellen AB300_2 und AB600_2 (vgl. Abb. 12) im Jahr 2014 von Beginn an sehr schwach, was nicht auf die Bewässerungsbehandlung und damit die Versuchsfrage zurückzuführen war. Hier wurde bereits im Laufe der Saison entschieden, die beiden Parzellen aus der Versuchsernte auszunehmen. Dies hatte zur Folge, dass für die Varianten AB300 und AB600 lediglich ein MW aus fünf Wiederholungen (n=5) für den Ertrag und den Alphasäuregehalt berücksichtigt wurde.

2.1.2. Bewässerung unter Berücksichtigung einer klimatischen Wasserbilanz

Für das letzte Versuchsjahr 2015 wurde der Versuch in Attenhofen aus logistischen Gründen nach drei Jahren abgebaut. Auf dem Standort Karpfenstein wurden die Parzellen bezüglich der verlegten Tropfschläuche aus 2.1.1. zwar beibehalten, aber hinsichtlich der Steuerung und Auswertung modifiziert.

Der Hintergrund war, dass nach im Projekt erhaltenen Erkenntnissen über das Wurzelwerk (vgl. 3.3.) und unbefriedigenden Ergebnissen mittels Sensorsteuerung eine neue Form der Bewässerungssteuerung analysiert werden sollte: Die Verwendung einer klimatischen Wasserbilanz als objektives Bewässerungskriterium.

Hierzu wurde die Bewässerung praxisüblich täglich drei Stunden und im Voranschreiten der Saison täglich sechs Stunden betrieben und gleichzeitig eine klimatische Wasserbilanzierung während der Saison angestellt und die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser beobachtet. Am Ende wurden die Varianten ebenfalls hinsichtlich Ertrag und Alphasäuregehalt ausgewertet. Als Vorlage der Bilanzierung dienten Vorgaben der „Food and Agriculture Organization of the United Nations“ (FAO) nach Allen *et al.* (1998).

2.1.2.1. Versuchsdesign

Insgesamt wurden vier Varianten miteinander verglichen. Diese waren AB_intensiv, NB_intensiv und ZB_intensiv sowie eine unbewässerte Kontrolle. Die klimatische Wasserbilanz wurde retrospektiv durchgeführt, um den Verlauf des pflanzenverfügbaren Wassers über die Saison betrachten zu können. Das bereits aufgebaute Versuchsdesign mit den jeweiligen Schlauchanordnungen wurde dabei wie in 2.1.1. belassen (vgl. Abb. 12), wobei die Varianten AB300 und AB600 aus dem Versuch ausgelassen wurden. Als Versuchsstandort diente der Sandbodenstandort Karpfenstein. In Tabelle 4 sind die jeweiligen Varianten hinsichtlich ihrer methodischen Veränderungen dargestellt.

Die Programmierung der Bewässerung zielte auf eine hohe Bewässerungsmenge ab. Hierzu wurden die Varianten wie in 2.1.1.5. mittels des automatischen und internetbasierten Steuermoduls ICA60 betrieben, allerdings nicht nach Vorgaben der Wasserspannung. Anfänglich wurden beginnend am 02. Juli täglich drei Stunden, also 2,06 mm (vgl. 2.1.1.6.) beregnet. Als eine anhaltende Trockenheit prognostiziert wurde, wurden die Bewässerungsgaben auf sechs Stunden, also 4,1 mm täglich verdoppelt. Die Bewässerung endete am 02. Sept. kurz vor der Ernte.

Tabelle 4: Veränderungen der Varianten aus den Versuchen 2012-2014 für den Versuch Berücksichtigung einer klimatischen Wasserbilanz. Vgl. hierzu Abbildung 12. Dabei wurde eine maximale Austrocknung bis zu einer nutzbaren Feldkapazität (nFK) von minimal 60 % angestrebt.

| Ursprüngliche Variante | Neue Variante | Positionierung des Tropfschlauchs | Vorgehensweise bei der Bewässerungssteuerung |
|------------------------|---------------|---|---|
| AB150 | AB_intensiv | auf dem Bifang | täglich intensiv bewässert (anfängl. 3 h, ab Mitte der Saison tägl. 6 h) Ziel: maximale Austrocknung nFK 60 % |
| NB300 | NB_intensiv | neben dem Bifang vergraben | täglich intensiv bewässert (anfängl. 3 h, ab Mitte der Saison tägl. 6 h) Ziel: maximale Austrocknung nFK 60 % |
| ZB300 | ZB_intensiv | zwischen zwei Bifängen in der Fahrgassenmitte vergraben | täglich intensiv bewässert (anfängl. 3 h, ab Mitte der Saison tägl. 6 h) Ziel: maximale Austrocknung nFK 60 % |
| Kontrolle | Kontrolle | - | Unbewässerte Kontrolle, abhängig von den Niederschlägen |

Die Ernte erfolgte äquivalent zu der Vorgehensweise in 2.1.1.7. mit dem Unterschied, dass lediglich vier verschiedene Behandlungen miteinander verglichen wurden. Außerdem musste eine Parzelle (NB_intensiv_2) von der Untersuchung ausgenommen werden, da dort Junghopfenpflanzen eingelegt wurden, die die Ertragsermittlungen verfälscht hätten. Somit wurde der mittlere Ertrag für diese Variante anhand von fünf Wiederholungen (n=5) ermittelt. Die Ergebnisse wurden als geteiltes Balken- (Erträge) und Punktdiagramm (Alphasäuregehalt) aufgetragen und mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA auf Unterschiede getestet. Die angewandten statistischen Methoden werden in 2.6. genauer beschrieben.

2.1.2.2. Berechnung der klimatischen Wasserbilanz

Als Grundlage der klimatischen Wasserbilanz wurden die von der FAO vorgeschlagenen Korrekturfaktoren (k_c -Werte) für Hopfen mit 0,3 vom 01. Mai bis zum 15. Juni (etwa Erreichen der Gerüsthöhe), 1,05 vom 16. Juni bis 23. August und 0,85 vom 24. August bis zum 15. Sept. verwendet. Diese wurden nach Allen *et al.* (1998) mit den vor Ort mit der Wetterstation (vgl. 2.1.1.5) ermittelten Verdunstungswerten nach Penman-Monteith ET_0 multipliziert und so die reelle Verdunstung von Hopfen ET_{Hopfen} ermittelt.

Als Wurzeltiefe wurden nach den Erkenntnissen aus 3.3. 1 m Wurzeltiefe angenommen. Bei einer nutzbaren Feldkapazität (nFK) von durchschnittlich 13,5 Vol.-% waren somit rein rechnerisch pro Quadratmeter 135 Liter pflanzenverfügbares Wasser im Wurzelraum gespeichert (PVW_{gesamt}). Das pflanzenverfügbare Wasser, also der rechnerische Bodenwasservorrat, wurde am 01. Mai, nach den Winterniederschlägen, also maximaler Sättigung des Bodens, auf 100 % gesetzt.

Um die Verdunstung mit den vorhandenen Reserven im Wurzelraum zu bilanzieren, wurde das PVW mit den Niederschlägen verrechnet und die Verdunstung von den vorhandenen Wasserreserven täglich nach folgenden Formeln errechnet:

$$ET_{\text{Hopfen}} [\text{mm}] = ET_0 [\text{mm}] * k_c\text{-Wert}_{\text{Hopfen}}$$

$$\begin{aligned} & \text{Wasserbilanz}_{\text{Hopfen}} [\text{mm}] \\ & = \text{Niederschlag} [\text{mm}] - ET_{\text{Hopfen}} [\text{mm}] \text{ (bei den berechneten Varianten + Bewässerung [\text{mm}])} \end{aligned}$$

$$PVW [\%] = PVW_{\text{vortag}} [\%] + \frac{\text{Wasserbilanz} [\text{mm}]}{\frac{PVW_{\text{gesamt}} [\text{mm}]}{100 [\%]}}$$

Die Berechnung geht dabei von stets gleicher Pflanzenaktivität aus. Das heißt, selbst bei voranschreitender Austrocknung verdunstet die Pflanze immer noch mit voller Leistung. Dies war vor allem im Fall der unbewässerten Variante wichtig, zu beachten. Weiter wurde angenommen, dass es sich bei der Betrachtung um ein geschlossenes System handelt, das pflanzenverfügbare Wasser also weder über 100 % steigen kann (in diesem Fall würden oberirdische Abläufe des Niederschlags angenommen) noch unter 0 % fällt. Das pflanzenverfügbare Wasser [%] wurde in einem Liniendiagramm über die Saison sowohl für die intensiv bewässerten Varianten als auch für die unbewässerte Kontrolle aufgetragen.

2.1.3. Bewässerungsversuche mit induzierter Trockenheit

In zwei weiteren Bewässerungsversuchen sollte in den Jahren 2012 bis 2013 herausgefunden werden, wie sich induzierte Trockenheit in der generativen Phase von Hopfen auf den Ertrag und vor allem auf den sekundären Pflanzenstoff Alphasäure auswirkt. Hierzu wurden beginnend im Jahre 2012 zunächst im Rahmen einer Bachelorarbeit (Stampfl, 2013) an der HSWT zwei Versuche (an zwei Hopfensorten) aufgebaut, welche durch Abdeckung der Flächen natürliche Niederschläge ausgeschlossen haben und lediglich über eine unterirdische Bewässerung eine Wasserzufuhr erhielten. Im Jahr 2013 wurden diese Versuche im Rahmen des Projektes weiter verfolgt, um zweijährige Ergebnisse zu gewährleisten.

2.1.3.1. Untersuchte Sorten

Es wurden zwei Vertreter der am häufigsten in Deutschland angebauten Hopfensorten für die Versuchsfrage ausgewählt. Zum einen handelte es sich um die Bittersorte Herkules (vgl. 2.1.1.2.). Die Pflanzen hatten einen Reihenabstand von etwa 3,2 m und einen Pflanzabstand von 1,6 m.

Die zweite untersuchte Sorte war die Aromasorte Perle, welche mit einem durchschnittlichen Alphasäuregehalt von 4 bis 9 % und einem durchschnittlichen Ertragspotential von 1550 bis 1950 kg/ha angegeben wird (Hopsteiner, 2015 b). Die Pflanzen wurden mit einem Abstand von 1,6 m angebaut bei einem Reihenabstand von 3,2 m.

2.1.3.2. Standorte

Als Standort für die Versuche dienten zwei Hopfenflächen in Grubanger in der Nähe von Hirnkirchen/Au i. d. Hallertau (s. Abb. 16). Die Böden zeichnen sich laut einer seitens des betreibenden Landwirtes durchgeführten Bodenuntersuchung bei der Sorte HS als sandiger Lehm (sL) aus und für die Sorte PE als Lehmboden (L). Die nutzbare Feldkapazität liegt bei der Sorte HS bei ca. 19 Vol.-% nFK und bei der Sorte PE bei ca. 17 Vol.-% nFK. Die genauen Koordinaten lauten für die Sorte PE: 48°32'36.67'' N 11°40'33.05'' O und für die Sorte HS 48°32'41.64'' N 11°40'50.02'' O.

An der nahegelegenen Wetterstation „Hirnkirchen“ wurden die Niederschläge an der Adcon-Wetterstation des Hopfenrings e.V. aufgezeichnet und konnten für die Auswertung des Versuches verwendet werden.



Abbildung 16: Versuchsfelder der Versuche mit induzierter Trockenheit. Das Luftbild von google Earth (google Inc., USA) zeigt die Standorte aus einer Höhe von 2210 m. Die Versuchsflächen liegen ca. 260 m voneinander entfernt.

2.1.3.3. Bewässerung und Tropfschlauch

Die Bewässerung der Versuchsflächen erfolgte über den Bewässerungskreislauf des Betriebes. Dieser ist an einen am Hof betriebenen Brunnen angeschlossen, welcher über einen Verteiler am Betrieb die einzelnen Hopfenflächen nacheinander bewässert. Es wurden druckkompensierende Tropfschläuche der Firma Netafim, Israel, verwendet. Diese waren unterirdisch vergraben und haben alle 50 cm eine Tropfstelle mit einem Wasserauslass von 1,2 l/h, sodass rechnerisch 0,75 mm/h bewässert werden konnten.

2.1.3.4. Versuchsaufbau und Abdeckung der Versuchspartellen

Insgesamt wurden vier verschiedene Varianten miteinander verglichen. Bei den Varianten „28“, „21“ und „14“ wurde die Bewässerung jeweils vier, drei bzw. zwei Wochen vor der geplanten Ernte abgeschaltet und somit eine Wasserzufuhr gestoppt. Hierzu wurde der unterirdische Tropfschlauch von der Bewässerung getrennt. Die vierte Variante „Kontrolle“ wurde bis kurz vor der Ernte bewässert. Somit war dies die einzige Variante, die keinen induzierten Trockenstress aufwies und bis zur Ernte des Versuches bewässert wurde.

Die Versuche wurden für beide Sorten gleich angelegt (s. Abb. 17). Dabei wurden in den Versuchsfeldern von links nach rechts die Varianten Kontrolle, 14, 21 und 28 einmal wiederholt. Nach hinten wurde je Versuchsbifang eine unechte Wiederholung angelegt, die

nach einer Pufferzone von ca. 10 weiteren Pflanzen erfolgte. Somit wurde jede Variante vierfach wiederholt (n=4).

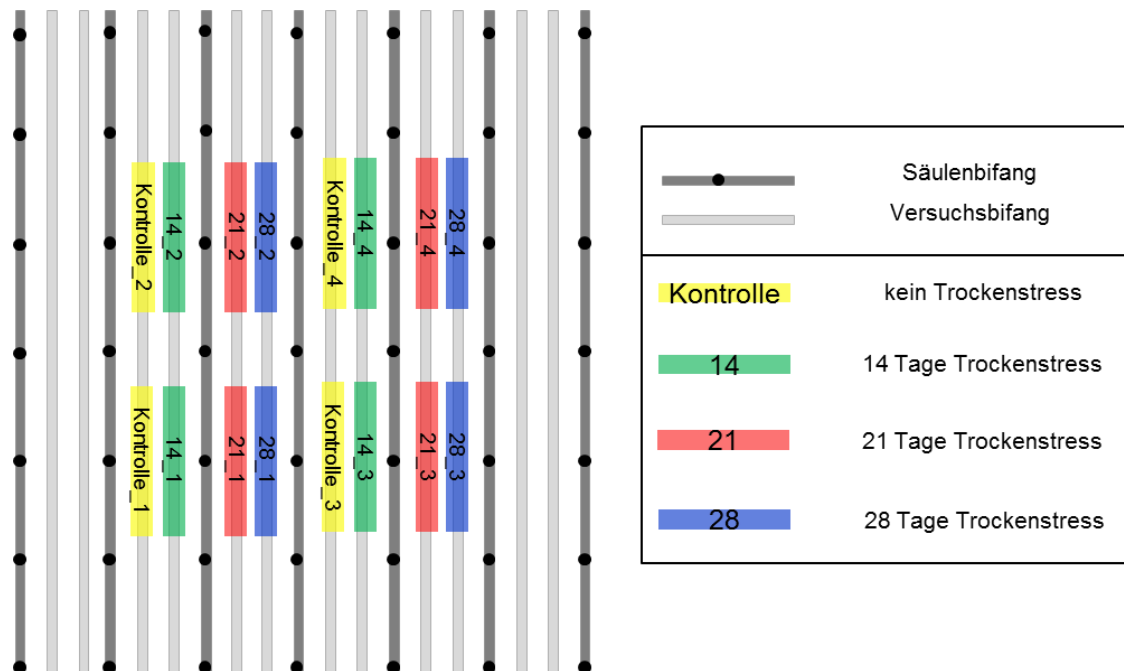


Abbildung 17: Versuchsaufbau der Versuche mit induzierter Trockenheit. Im Falle der einzelnen Varianten wurden die Wiederholungen im selben Bifang als unechte Wiederholungen angelegt. Bei den Varianten 28, 21, und 14 wurde jeweils vier, drei bzw. zwei Wochen vor der Ernte die Wasserzufuhr unterbrochen. Die Variante Kontrolle wurde bis zur Ernte bewässert. Die gesamte Versuchsfläche wurde mit wasserundurchlässiger Silofolie abgedeckt, damit natürliche Niederschläge ausgeschlossen werden konnten (s. Abb. 18). Verändert nach Stampfl (2013).



Abbildung 18: Abdeckung der Versuchspartellen zum Ausschließen natürlicher Niederschläge. Alle Versuchsreihen wurden über die gesamte Länge mit wasserundurchlässiger Silofolie abgedeckt (a). Hierzu wurden je links und rechts von den Versuchsreihen (vgl. Abb. 17) Bahnen ausgehend von der Fahrgassenmitte bis zum Bifang ausgelegt und an den Stellen von Hopfenreben eingeschnitten (b). Eine weitere Folie zwischen den Bifängen wurde ebenfalls an den Stellen der Pflanzen eingeschnitten und dann überlappend über die von links und rechts kommenden Folien gelegt. Besichert wurde die Folie an den Überlappungen sowie an den Enden mit aufgeschütteter Erde (b).

2.1.3.5. Ernte und statistische Auswertung

Die Ernte erfolgte nach den Empfehlungen der LfL zu einem fest geplanten Zeitpunkt. Im Falle der Sorte Perle war dies etwa Anfang September (genau vier Wochen nach dem Abschalten der Variante „28“) und im Falle der Sorte Herkules Mitte September (ebenfalls genau vier Wochen nach Abschalten der Bewässerung in der Variante „28“).

Hierzu wurden die zuvor etikettierten Parzellen von Hand geerntet und voneinander getrennt auf Ladewagen geladen. Die Dolden der geernteten Reben wurden am Hopfenforschungszentrum in Hüll mittels einer Pflückmaschine von der Pflanze getrennt und das Grüngewicht jeder Parzelle direkt vor Ort gewogen. Aus dem erhaltenen Gesamtgewicht wurde für weitere Untersuchungen im Labor je eine Mischprobe entnommen.

Die Mischprobe wurde sowohl auf Wassergehalt als auch auf den Gehalt des sekundären Pflanzenstoffes Alphasäure mittels NIR-Verfahren (Kammhuber, 2008) untersucht.

Ausgehend von den ermittelten Wassergehalten wurde der Ertrag jeder Parzelle jeder Variante auf 10 % Wassergehalt standardisiert und ein durchschnittlicher Mittelwert auf kg/ha umgerechnet (zur genaueren Vorgehensweise vgl. 2.1.1.7.).

Für jede Parzelle wurde der Gehalt an Alphasäure untersucht und für alle vier Varianten gemittelt.

Die Mittelwerte wurden als geteiltes Säulen- (Ertrag) und Punktdiagramm (Alphasäuregehalt) in einem Schaubild inklusive Standardabweichung aufgetragen.

Da der Versuchsaufbau kein randomisiertes Blockdiagramm darstellt (vgl. Abb. 17) und in der Reihe jeweils nur eine unechte Wiederholung gebildet werden konnte, können die statistisch erbrachten Unterschiede nur als Tendenz angesehen werden. Diese wurden mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA mit anschließendem Student-Newmann-Keuls *posthoc*-Test ermittelt, wobei vier Blöcke (zwei von links nach rechts und zwei von vorne nach hinten) gebildet wurden, in denen jeweils eine Wiederholung der vier Varianten beinhaltet war, um Bodenunterschiede in der Analyse zu berücksichtigen. Die Varianzhomogenität wurde mittels eines Levene-Tests vor der Analyse überprüft. Im Falle einer Signifikanz wurde die Normalverteilung der Residuen mittels eines Shapiro-Wilk-Tests geprüft. Unterschiedliche Buchstabenkombinationen stehen für statistische Unterschiede zwischen den Gruppen. Einen genaueren Überblick über die statistischen Verfahren gibt 2.6.

2.1.4. Bewässerung mit unterschiedlicher Applikation gleicher Wassermengen

In einem vierten Bewässerungsversuch in den Jahren 2014 und 2015 wurde der Einfluss der Applikationsdauer von Bewässerungswasser auf Ertrag und Alphasäuregehalt untersucht. Hintergrund waren Erkenntnisse des Wurzelwerks von Hopfen (3.3.), welche auf die Ausbreitung von Bewässerungswasser ausgehend von Tropfschläuchen nach Schütze *et al.* (2013) übertragen wurde (vgl. Abb. 7). Ziel war es, durch unterschiedlich lange Bewässerungszyklen unterschiedlich große Bereiche der sog. Tropfzwiebeln zu erreichen, was sowohl ober- als auch unterirdisch durchgeführt wurde.

2.1.4.1. Standort

Als Standort diente der in 2.1.3. vorgestellte Hopfengarten in Grubanger bei Hinkirchen/Au in der Hallertau mit den Koordinaten 48°32'41.64'' N 11°40'50.02'' O. Der im Jahre 2012 angelegte Versuch wurde Ende 2013 abgebaut und ein für die vorliegende Versuchsfrage komplett neuer Versuch aufgebaut. Hierzu diente zwar dasselbe Hopfenfeld wie in 2.1.3., allerdings wurde der Versuch im Feld nach links verschoben, um mögliche Einflüsse durch die Versuche der vorausgehenden Jahre zu vermeiden. Der Boden zeichnet sich als sandiger Lehm mit einer nutzbaren Feldkapazität von 19 Vol.-% aus.

2.1.4.2. Hopfensorte

Der Versuch wurde an der Sorte Herkules durchgeführt. Für genauere Informationen zur Sorte s. 2.1.1.2.

2.1.4.3. Tropfschlauch und Bewässerung

Für den Versuch wurde ein druckkompensierender Tropfschlauch der Firma Netafim, Israel, mit einem Wasserauslass von 1,2 l/h und einem Tropferabstand von 0,5 m verwendet. Das Bewässerungswasser stammte in Absprache mit dem Wasserzweckverband Paunzhausen aus dem öffentlichen Wassernetz, um eine Bewässerungsdauer von bis zu 12 h gewährleisten zu können, und wurde aus einem naheliegenden Hydranten entnommen, welcher über eine Zuleitung verbunden war.

2.1.4.4. Versuchsaufbau

Für den Versuch wurden fünf verschiedene Varianten geschaffen, die im Feld randomisiert und vierfach wiederholt (n=4) angelegt wurden (s. Abb. 19). Die Variante „AB3“ wurde oberirdisch

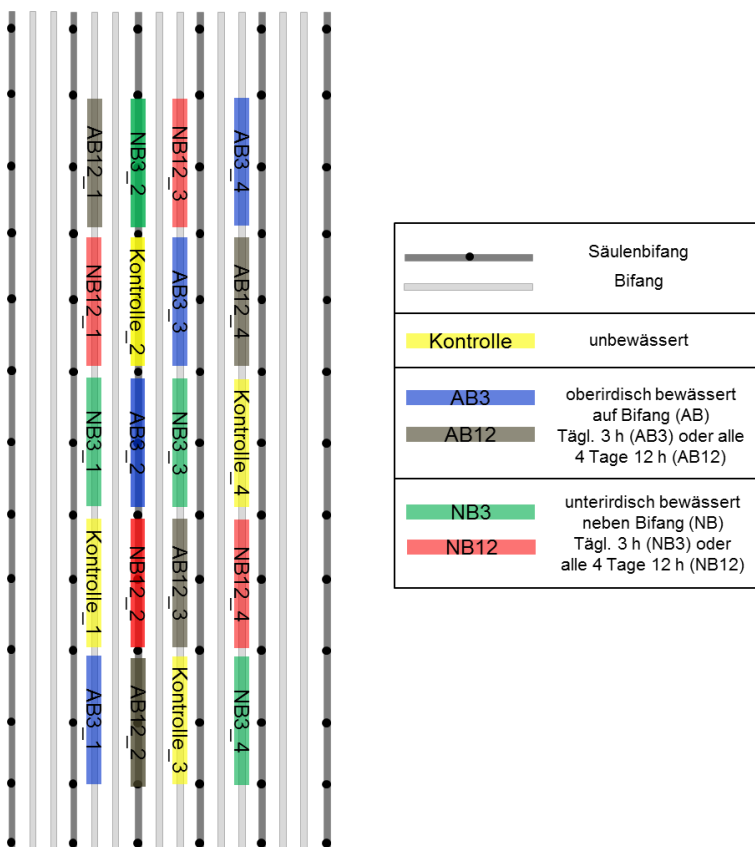


Abbildung 19: Versuchsaufbau des Versuchs unterschiedliche Applikation gleicher Wassermengen. Insgesamt wurden fünf verschiedene Varianten miteinander verglichen, welche randomisiert im Versuch angelegt wurden. Dabei steht AB für oberirdisch auf dem Bifang bewässert und NB für unterirdisch vergraben neben dem Bifang bewässert. Die Zahl hinter der Information zur Positionierung steht für die Bewässerungsdauer in Stunden. Somit ist die Variante AB3 eine oberirdische Bewässerung, welche täglich drei Stunden bewässert wurde. Die Varianten, die 12 Stunden bewässert wurden, erhielten nur alle vier Tage Wasser, sodass am Ende alle Varianten gleich viel Wasser erhielten. Die unbewässerte Kontrolle erhielt Wasser ausschließlich über die Niederschläge, deren Daten über die Wetterstation „Hüll“ der LfL abgerufen wurden.

auf dem Bifang bewässert und erhielt täglich 3 Stunden Wasser. Die Variante „AB12“ wurde nur alle vier Tage bewässert, dann wurde allerdings 12 Stunden lang Wasser appliziert. Bei den Varianten „NB3“ und „NB12“ galt für die Applikationsdauer dasselbe wie bei den Varianten AB, allerdings war der Tropfschlauch hier unterirdisch neben dem Bifang vergraben, um auch einen möglichen Einfluss durch die Positionierung detektieren zu können. Die unbewässerte Kontrolle erhielt lediglich die vor Ort gefallenen Niederschläge, die mithilfe der nahegelegenen Wetterstation der LfL in Hüll aufgezeichnet wurden.

2.1.4.5. Ernte und statistische Auswertung

Die Ernte der Parzellen wurde mittels eines Abreißgerätes durchgeführt. Dabei wurden in den Parzellen von 14 Pflanzen in der Regel die mittleren zehn Pflanzen geerntet, während jeweils zwei Pflanzen vorne und hinten an jeder Parzelle als Pufferpflanzen zur nächsten Parzelle stehen gelassen wurden. Von diesen zehn Pflanzen wurden die Doldenanteile mittels einer Pflückmaschine von den Reben am Hopfenforschungszentrum Hüll getrennt. Am Ende des Laufbandes der Pflückmaschine wurde der Doldenanteil jeder Parzelle abgefangen und direkt das Grüngewicht bestimmt. Aus den Dolden jeder Parzelle wurde eine Mischprobe entnommen, welche zu weiteren Untersuchungen (Wassergehalt und Alphasäuregehalt) diene.

Der ermittelte Wassergehalt jeder Mischprobe wurde auf 10 % Wassergehalt standardisiert und auf Ertrag [kg/ha] hochgerechnet (zur genaueren Vorgehensweise vgl. 2.1.1.7.). Die Bestimmung des Gehalts an Alphasäure erfolgte im Labor des Hopfenforschungszentrums Hüll und wurde mittels NIR-Verfahren (Kammhuber, 2008) bestimmt.

Aus den vier Wiederholungen wurde sowohl für den Ertrag als auch für die Alphasäure ein Mittelwert gebildet und als gemischtes Balken- (Ertrag) und Punktdiagramm (Alphasäure) mit Standardabweichung visualisiert.

Die Mittelwerte wurden mittels einer ANOVA mit Student-Newmann-Keuls-*posthoc*-Test auf Unterschiede untersucht (vgl. 2.6.), wobei jeweils vier Blöcke von links nach rechts gebildet wurden, um mögliche Bodenunterschiede zu berücksichtigen. Dabei wurde die Varianzhomogenität der Daten mit einem Levene-Test überprüft sowie die Normalverteilung der Residuen mittels eines Shapiro-Wilk-Tests, welche in 2.6. genauer beschrieben sind.

2.2. PHYSIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AN HOPFEN

Als Messgerät aller nachfolgend vorgestellten physiologischen Messungen diene das portable LC proSD Messgerät der Firma ADC BioScientific, UK. Das Gerät misst den Gehalt an CO₂ in der Luft anhand eines im Messkopf befindlichen Infrarotgasanalysators (IRGA) in einem Bereich von 0 bis 3000 ppm, den Wasserdampfdruck in einem Bereich von 0 bis 75 mbar mittels eines Wasserdampfsensors sowie die Umgebungs- und Blatttemperatur in einem Bereich von -5 bis 50 °C. Dabei vergleicht es den Gehalt an CO₂ und H₂O der eingesaugten Außenluft mit dem Gehalt in einer speziellen Blattkammer. Hierzu werden die zu untersuchenden Blätter in einer sogenannten Küvette eingespannt. Die Messküvette hat eine Messfläche von 6 cm² (2 x 3 cm). Daneben verfügt das Gerät über eine Fozelle, die das einfallende Licht auf das Blatt misst.

Des Weiteren könnten mittels des Gerätes verschiedene Parameter voreingestellt werden. So verfügt es über einen Lichtaufsatz, der künstliches Licht in einem Bereich von 0 bis 2000 μmol Photonen m⁻² s⁻¹ auf das Blatt geben kann, sodass man unabhängig von den äußeren Lichtbedingungen messen kann. Auch der Wasserdampfdruck und die Konzentration an CO₂ in der Messküvette sowie die Umgebungstemperatur des zu messenden Blattes können voreingestellt werden. Da von diesen Möglichkeiten, mit Ausnahme des künstlichen Lichts, in der vorliegenden Arbeit kein Gebrauch gemacht wurde, sei für weitere Informationen auf den Hersteller verwiesen.

Das Gerät verfügt des Weiteren über eine Benutzeroberfläche, über die bestimmte zu messende Szenarien vorprogrammiert werden können und die laufende Messung kontrolliert werden kann. Die Ausgabe der Dateien erfolgt über eine integrierte SD-Karte, welche im CSV-Format alle relevanten Messungen im PC ausgibt.

Dabei errechnet das Gerät die Assimilation bzw. Nettophotosynthese (NP) und die Transpiration (E) nach den Formeln:

$$\begin{aligned} \text{Netto-Photosynthese (NP)} [\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}] &= u_s \Delta c \\ \text{mit } u_s &= \text{Massenfluss der Luft pro m}^2 \text{ Blattfläche} [\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}] \\ \Delta c &= \text{Differenz der CO}_2 \text{ Konzentration} [\mu\text{mol mol}^{-1}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Transpirationsrate (E)} [\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}] &= \frac{\Delta e u_s}{p} \\ \text{mit } \Delta e &= \text{Differenz der Wasserdampf Konzentration} [\text{mbar}] \\ u_s &= \text{Massenfluss der Luft pro m}^2 \text{ Blattfläche} [\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}] \\ p &= \text{Atmosphärendruck} [\text{mbar}] \end{aligned}$$

2.2.1. Lichtkurven

In den Versuchsgewächshäusern der HSWT wurde an Junghopfenpflanzen der Sorte HS das Lichtoptimum der Photosynthese bestimmt (s. Abb. 20).

Die Pflanzen wurden durch Rhizomvermehrung (sog. Topffechser) im Vorfeld unter hohen Temperaturen im Gewächshaus angezogen und hatten zum Zeitpunkt der Messung ein Alter von ca. 6 Wochen und eine Höhe von 1,5 m. Für die Messung wurden drei Pflanzen in einem Zeitraum von drei Tagen täglich bewässert, während drei weitere Pflanzen für drei Tage vor der Messung kein Wasser enthielten. Ziel war es, eine trockengestresste Gruppe mit einer Saugspannung von über 700 hPa im Wurzelbereich sowie eine gut gewässerte mit einer durchschnittlichen Saugspannung von 150 hPa im Wurzelbereich zu vergleichen. Die Saugspannung wurde in den Pflanztöpfen mittels Tensiometer kontrolliert.

An beiden Pflanzengruppen wurden dann nacheinander mittels sogenannter Lichtkurven die NP und die Transpiration der Pflanzen bestimmt. Hierzu wurde ein Blatt im oberen Drittel der Pflanzen in die Küvette eingespannt und die einfallende Lichtstärke in den Schritten 0, 10, 20, 50, 100, 150, 300, 500, 750, 1000, 1250, 1500 und 1750 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ erhöht und dabei die Nettophotosyntheseleistung und die Transpiration gemessen. Vor Beginn jeder Messung wurde eine Vorlaufzeit von zwei Minuten bei Dunkelheit ($0 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$) eingehalten. Daraufhin wurde jede Lichtstärke für 5 Minuten auf das Blatt gegeben und dabei jede Minute ($n=5$) eine Messung durchgeführt. Aus den fünf Messwerten wurde sowohl für die NP als auch für die Transpiration ein MW mit STABW (vgl. 2.6.) gebildet und in ein Liniendiagramm aufgetragen.



Abbildung 20: Voruntersuchungen im Gewächshaus mittels Lichtkurven. Im Gewächshaus wurden mittels der Gaswechselanlage LC proSD der Firma ADC BioScientific Inc. an sechs Jungpflanzen die Reaktionen auf Trockenstress erfasst (a). Hierzu wurde über mehrere Tage an der Hälfte der Pflanzen Trockenstress durch ausbleibende Bewässerung induziert. Die Auswirkungen wurden sowohl mit Tensiometern (b) als auch mit der Gaswechselanlage aufgezeichnet. Dazu wurden die Blätter in die Küvette (c) eingespannt und unter der Gabe von künstlichem Licht (d) sowohl die Transpirations- als auch die Nettophotosyntheseleistung gemessen.

2.2.2. Potentielle Nettophotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung

Unter Freilandbedingungen wurden im Feld die potentielle Photosyntheseleistung und die Transpiration alternierend an bewässerten und unbewässerten Pflanzen gemessen und verglichen (s. Abb. 21). Hierzu wurde die zuvor in 2.2.1. ermittelte Lichtsättigung von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf die Blätter einer Pflanzengruppe (bewässert oder unbewässert) gegeben und dabei die NP und die Transpiration ermittelt.

2.2.2.1. Versuchsbedingungen

Die Versuche fanden im Jahr 2012 vom 28. Juni bis 13. August an insgesamt 33 Tagen im Bewässerungsversuch von Karpfenstein statt (vgl. 2.1.1.1.). An regnerischen Tagen konnte die Messung nicht durchgeführt werden. Im Jahr 2013 wurde die Messung aufgrund von Hagelschäden im Versuchsfeld von Karpfenstein auf die Versuchsfläche Attenhofen (vgl. 2.1.1.1.) verlegt. 2013 wurde an insgesamt 30 Tagen täglich vom 04. Juli bis zum 02. August gemessen.

Die untersuchten Pflanzen befanden sich dabei im vorderen Bereich des Versuches in einem eigens für physiologische und morphologische Untersuchungen frei gelassenen Bereich, der nicht in die Versuchsernte miteinflusst (vgl. Abb. 12). Dabei wurde im Jahr 2012 für die bewässerte Behandlung die Variante AB150 und im Jahr 2013 die Variante AB300 verwendet. Für die unbewässerte Behandlung wurde stets die Kontrolle verwendet.



Abbildung 21: Gaswechsellmessungen zum Vergleich der potentiellen Transpirations- und Nettophotosyntheseleistung im Feld. Hierbei wurden im Wechsel insgesamt jeweils neun Blätter von bewässertem und unbewässertem Hopfen der Sorte Herkules bei einer künstlichen Lichtstärke von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemessen. Nach jeweils drei Blättern wurde dabei zwischen den Varianten gewechselt, um einen Effekt der jeweiligen Tageszeit auszuschließen. Die Messungen fanden immer zur Mittagszeit (ca. 11:00 - 14:00 Uhr) statt.

2.2.2.2. Messungen an Pflanzen und Bildung eines repräsentativen Mittelwerts

Die Messung fand in einer Höhe von 1,0 bis 1,5 m statt (vgl. Abb. 39). Sie begann jeweils nach einer Equilibrierungsphase von zwei Minuten bei der vorgegebenen Lichtstärke. Die eigentliche Messung dauerte danach fünf Minuten, wobei nach jeder Minute ein Wert geloggt wurde ($n=5$). Nach drei Blättern einer Pflanze einer Behandlung wurde die Messung an Pflanzen der anderen Behandlung durchgeführt, sodass im Laufe eines Messtages fünf Mal zwischen den Behandlungen gewechselt wurde, um einen systematischen Fehler während der Messung auszuschließen. Insgesamt wurden neun Blätter à fünf Messungen ($n=45$) von drei Pflanzen sowohl an den bewässerten Pflanzen als auch an den unbewässerten Pflanzen gemessen. Aus den fünf Werten eines Blattes wurde im Nachhinein die zentrale Tendenz mittels des Medians (vgl. 2.6.) gebildet. Somit erhielt man pro Behandlung und Tag neun Werte ($n=9$). Die Vorgehensweise beruht auf der Tatsache, dass hiermit für jedes Blatt ein objektiver Wert gewährleistet wurde. Aus den neun Medianwerten wurden abschließend ein MW und die STABW gebildet, um ein Abbild der potentiellen Nettphotosyntheseleistung und Transpiration bei einer Lichtstärke von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für die jeweiligen Behandlungen zu erhalten.

2.2.2.3. Statistische Auswertung der Tagesmittelwerte

Die täglich erhaltenen Mittelwerte ($n=9$) wurden in einem Liniendiagramm über die Zeit inklusive STABW aufgetragen. Unter den Testvoraussetzungen der Normalverteilung und der Varianzhomogenität der Daten wurde diese mittels eines studentischen t-Tests auf Gleichheit geprüft. Bei Verletzung der Voraussetzungen wurde auf den Mann-Whitney U-Test ausgewichen (vgl. 2.6.).

2.2.2.4. Ermittlung der kumulativen Wasserausnutzungseffizienz

Um die molare Wasserausnutzung der CO_2 -Aufnahme, also den Kohlenstoffgewinn pro transpirierter Wassermenge der behandelten Varianten zu errechnen, wurde die Summe der Tagesmittelwerte der Assimilation (NP) durch die Summe der Tagesmittelwerte der Transpiration E nach folgender Formel geteilt, um den Wassernutzungskoeffizienten (WUE) nach Larcher (2001) zu ermitteln:

$$WUE \left[\frac{\mu\text{mol}}{\text{mmol}} \right] = \frac{\sum NP [\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]}{\sum E [\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}]}$$

2.2.2.5. Variablen und Vorgehensweise der Regressionsanalyse

Des Weiteren wurde mit allen erhaltenen Daten sowohl der bewässerten als auch der unbewässerten Pflanzen beider Jahre ($n=63$) mittels einer Multiplen Regressionsanalyse die Abhängigkeit mit den vor Ort erhaltenen Wetterdaten ($n=63$) überprüft.

Als abhängige Variablen wurden jeweils die Tagesmittelwerte der potentiellen NP [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und der Transpiration [$\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] sowohl von den bewässerten als auch von den unbewässerten Pflanzen verwendet. Somit wurden insgesamt vier Modelle gebildet.

Als erklärende Variablen wurden in die Modelle die Tagesmittelwerte der abiotischen Faktoren Bodenfeuchte [%], relative Luftfeuchte [%], Globalstrahlung [W/m^2], Temperatur [$^{\circ}\text{C}$], die Windgeschwindigkeit [m/s] sowie die Tagessummen von Niederschlag [mm] und im Falle der bewässerten Pflanzen der Bewässerung [mm] eingefügt. Die meteorologischen Daten stammten von der im Versuchsfeld installierten Wetterstation (vgl. 2.1.1.5.).

Die Bedingungen der Normalverteilung und die Varianzhomogenität der Residuen wurden retrospektiv überprüft. Die Normalverteilung wurde mittels eines Shapiro-Wilk Tests, die Residuen visuell durch Plotten der tatsächlichen gegen die geschätzten Werte geprüft.

Zusätzlich wurde die Multikollinearität der im Modell verwendeten Umweltparameter mittels Pearson-Korrelationstests überprüft. Hier stellte sich eine Korrelation zwischen der Globalstrahlung und der relativen Luftfeuchte heraus, weshalb die relative Luftfeuchte vor der Untersuchung wurzeltransformiert wurde (s. Anhang Tab. 26). Zur genauen Vorgehensweise der statistischen Methoden s. 2.6.

2.2.3. Tagesgang

Neben voreingestellten Lichtintensitäten (vgl. 2.2.1. und 2.2.2.) wurde die Nettophotosynthese und Transpiration von *Humulus lupulus* cv. Herkules ebenfalls unter natürlichen Lichtbedingungen gemessen. Hierzu wurde ein sogenannter Tagesgang der Pflanze aufgezeichnet. Die Messung begann morgens um 4:30 Uhr und endete um 20:50 Uhr, gemessen am 17. Juli 2014.

Die eingefallene Sonneneinstrahlung PAR [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$] sowie die dabei gemessene Transpiration [$\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] und die Nettophotosynthese NP [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] wurden mittels des IRGA aufgezeichnet und gegen die Uhrzeit geplottet. Zusätzlich wurde die Korrelation zwischen der PAR und den Werten der NP und der Transpiration mithilfe eines Pearson-Korrelationstest überprüft und der prozentuale Anteil der Werte zwischen 07:30 und 16:00 Uhr im Vergleich zum gesamten Tag ermittelt.

Des Weiteren wurden Korrelationsrechnungen nach Pearson für das Wasserdampfdruckdefizit (VPD) ermittelt. Dieser wurde aus den Werten für die relative Luftfeuchte (rL) und die

durchschnittliche Temperatur T in Kelvin (K) nach Von Willert *et al.* (1995) nach folgenden Formeln errechnet:

$$\text{VPD [kPa]} = e^0 \text{ [kPa]} - e \text{ [kPa]}$$

mit

$$e^0 \text{ [kPa]} = \text{Wasserdampfsättigungsdruck}$$

$$e^0 \text{ [kPa]} = \exp \left(52,57633 - \frac{6790,4985}{T \text{ [K]}} - 5,02808 * \ln T \text{ [K]} \right)$$

und

$$e \text{ [kPa]} = \text{Wasserdampfpartialdruck}$$

$$e \text{ [kPa]} = e^0 \text{ [kPa]} * \frac{rL \text{ [%]}}{100 \text{ [%]}}$$

Als Pflanze wurde eine bewässerte Pflanze der Variante AB300 aus dem Versuchsfeld in Karpfenstein verwendet. Da die Messung ungehindert von Schattenwürfen, die durch die sieben Meter hohe Pflanze zustande kommen können, durchgeführt werden sollte, wurde ein Blatt aus der obersten Blattetage in sieben Metern Höhe verwendet. Dieses wurde über eine Hebebühne erreicht. Dabei wurde sowohl die Messküvette des IRGA als auch der Seitentrieb mit dem zu messenden Blatt an der Hebebühne mittels einer Schnur fixiert, um ungewolltem Blattabriss und damit Unterbrechung der Messung durch Windeinflüsse entgegenzuwirken. Am Untersuchungstag herrschten für den Monat Juli typische meteorologische Gegebenheiten mit einer mittleren Temperatur von 18,4 °C bei einem Maximalwert von 24,2 °C keinen Niederschlägen bei schwacher Bewölkung.

2.2.4. **Nettophotosynthese und Transpiration bei gegebenen Lichtverhältnissen**

Neben der Charakterisierung der Photosynthese- und Transpirationsaktivität von Hopfen über einen gesamten Tag an einem Blatt (2.2.3.) wurde ebenfalls das Ziel verfolgt, die Reaktion der Blätter über die gesamte Höhe der Pflanze bei natürlichen Lichtverhältnissen abzubilden.

Um Messungen über die gesamte Höhe mehrerer Pflanzen durchführen zu können, wurden in der Anbausaison 2014 zwei Baugerüste mit einer Länge von 5 Metern im Versuchsfeld Karpfenstein errichtet, die das Messen an insgesamt vier Pflanzen ermöglichte (s. Abb. 22). Hierfür wurden die Pflanzen nach Engelhard *et al.* (2011) in die drei Bereiche „unten“ (vom Grund bis 2 m Höhe), „Mitte“ (2 m bis 4 m Höhe) und „oben“ (4 m Höhe bis Krone) unterteilt (vgl. Abb. 39). Das Gerüst bestand aus zwei Etagen, über die jeweils die mittlere und die obere Blattetage erreicht werden konnte. Die untere Blattetage wurde vom Boden aus gemessen.

2.2.4.1. Ausgewählte Pflanzen

Für die Messung wurden analog zu den Messungen in 2.2.2. Pflanzen aus den beiden Versuchsvarianten AB150 und unbewässerte Kontrolle im vorderen dafür geschaffenen Bereich des Versuchsfeldes in Karpfenstein verwendet (vgl. Abb. 12). Die untersuchten Pflanzen unterschieden sich zum Zeitpunkt der Messung außer in der Form der Behandlung Bewässerung nicht voneinander und befanden sich im sechsten Ertragsjahr.



Abbildung 22: Messung der Transpiration und Nettphotosynthese verschiedener Höhenstufen unter natürlichen Lichtbedingungen. Zur Durchführung wurden im Hopfengarten zwei Baugerüste errichtet, um an der gesamten Pflanze messen zu können (a, b und d). Dazu wurden die Pflanzen in die drei Bereiche „unten“, „Mitte“ und „oben“ untergliedert, die jeweils charakterisiert wurden. Zur Messung wurden randomisiert Blätter ausgewählt, an denen die Menge des aufgenommenen Kohlenstoffdioxids und des abgegebenen Wassers in einer Küvette mittels einer sogenannten Gaswechselanlage analysiert werden. Nach dem Einspannen eines Blattes (c) wurde ca. 3 Minuten gewartet, bis sich ein stabiler Wert eingestellt hat, der dann mittels Knopfdruck geloggt wurde. Des Weiteren zeichnet die Anlage die auftreffende Strahlungsmenge (Photosynthetic Active Radiation (PAR) in $\mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$) auf.

2.2.4.2. Durchführung der Messungen

Die Messungen fanden an insgesamt sieben Tagen (08., 16., 23. und 31. Juli sowie 05. bis 07. August) im Jahr 2014 statt. Am 08. Juli wurden testweise lediglich die bewässerten Pflanzen gemessen. Begonnen wurden die Messungen morgens um ca. 07:30 Uhr und endeten um ca. 16:00 Uhr. Diese Zeitspanne erwies sich als die Zeit mit den höchsten Werten für die NP und die Transpiration (vgl. 3.2.3.). Die Messung fand bei gegebenen Licht-, Luftfeuchtigkeits- und Temperaturverhältnissen statt.

Hierfür wurden die Blätter in die Küvette eingespannt (s. Abb. 22 c) und, nachdem sich ein stabiler Wert (sichtbar am Display des portablen Messgeräts) eingestellt hatte, dieser mittels Knopfdruck geloggt. In der Regel geschah dies nach 2 bis 3 Minuten.

Um einen systematischen Fehler im Vergleich der Messungen zwischen bewässerten und unbewässerten Pflanzen weitestgehend ausschließen zu können, wurde die zu messende Behandlung nach ca. acht Messungen gewechselt. Jede Höhenstufe beider Behandlungen wurde über den gesamten Tag in der Regel dreimal gemessen, was eine Stichprobenanzahl von 24 (n=24) ergab.

2.2.4.3. Aufzeichnung der Meteorologie

Neben den Gaswechselfmessungen wurden gleichzeitig die meteorologischen Gegebenheiten mittels der Wetterstation „imetos“ der Firma Pessl, Österreich (vgl. 2.1.1.5.4.), aufgezeichnet, welche die Verdunstung ET_0 nach Penman-Monteith nach Vorgaben der FAO (Allen *et al.*, 1998) errechnet. Dies geschah innerhalb der bereitgestellten Internetplattform (www.fieldclimate.com) seitens des Herstellers.

2.2.4.4. Auswertung

Die ermittelten Daten der Gaswechselfmessungen und der Meteorologie wurden mit der Statistiksoftware „R“ aufbereitet. Die Wetterdaten wurden für jeden Tag nach den Parametern Niederschlagssumme [mm], durchschnittliche Luftfeuchtigkeit [%], photosynthetisch aktiver Sonneneinstrahlung „PAR“ nach Minimum und Maximum [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] und der durchschnittlichen Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] in 30 Minuten Abständen gegen die Zeit aufgetragen.

Die Gaswechselfdaten wurden für jeden Tag und jede Höhenstufe nach gemessener PAR [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$], NP [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] und Transpiration [$\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] anhand von Box-Whisker Plots ausgewertet und grafisch dargestellt, was mittels Median, oberem und unterem Quartil sowie den oberen und unteren Whiskern einen präzisen Eindruck über die Verteilung der Daten erlaubt. Die Mediane jeder Höhenstufe wurden gegen die Behandlung mittels eines Mann-Whitney U Tests (vgl. 2.6.) auf statistische Gleichheit untersucht.

Außerdem wurden die ermittelten Transpirations- und Assimilationswerte aller Tage gegen den VPD (vgl. 2.2.3) in x, y- Plots aufgetragen und anhand von Regressionen (vgl. 2.6.) auf Zusammenhänge geprüft. Um eine größere Datengrundlage zur Verfügung zu haben (n=18), wurden hierfür die Werte in Tagesabschnitte (morgens = 07:00 bis 10:00 Uhr, mittags = 10:00 bis 13:00 Uhr, nachmittags 13:00 bis 16:00 Uhr) unterteilt und die jeweiligen Mediane gegen Mittelwerte des VPD (vgl. 2.2.3.) dieser Zeit aufgetragen und die WUE (vgl. 2.2.2.4.) errechnet.

Für weitere Hochrechnungen der Transpiration für jede Höhenstufe (2.2.4.6.) wurden der jeweils ermittelte Tagesmedian genutzt. Hierbei wurden die Werte der beiden Behandlungen bewässert und unbewässert kombiniert und ein neuer Median über beide Behandlungen errechnet.

2.2.4.5. Ermittlung der Blattfläche

Anhand der ermittelten Blattflächen aus sechs Replikaten ($n=6$), welche über die Mittelwerte mit STABW von Engelhard *et al.* (2011) für die drei Termine 15. Juni, 15. Juli und 15. August generiert wurden, wurde mittels sigmoidaler Kurven mit der Software „Origin“ ein Kurvenverlauf erstellt, der es ermöglicht, zu jedem Tag der Anbausaison (01. Mai bis 15. Sept.) die exakte Blattfläche [m^2] jeder Höhenstufe darzustellen.

Für die untere Höhenstufe erfolgte die Errechnung der sigmoidalen Kurve nach den Formeln:

$$f(x)_{\text{unten}} = \frac{7,76}{1 + e^{(-0,055(x - 2,46 \times 10^{-6}))}}$$

$$f(x)_{\text{Mitte}} = \frac{21,63}{1 + e^{(-0,082(x - 2,46 \times 10^{-6}))}}$$

$$f(x)_{\text{oben}} = \frac{19,76}{1 + e^{(-0,11(x - 2,46 \times 10^{-6}))}}$$

Hierbei wurde davon ausgegangen, dass das Pflanzenwachstum am 01. Mai mit 0 m^2 beginnt und nach dem dritten Untersuchungstermin von Engelhard *et al.* (2011) noch ein Blattflächenzuwachs von 10 % stattfindet, was in Abstimmung mit dem Hopfenforschungszentrum Hüll festgelegt wurde. Diese Blattflächen dienen in der weiteren Auswertung zur Hochrechnung der tatsächlichen Transpiration für jeden Tag.

2.2.4.6. Extrapolation des Wasserverbrauchs

Mit den gewonnenen Medianen der Transpiration und den ermittelten Blattflächen wurde für die Zeit der Messung die tägliche Transpiration für jede Höhenstufe nach folgendem Vorgehen hochgerechnet:

$$\begin{aligned} & \text{Transpiration}_{\text{Höhenstufe}} [\text{mmol}] \\ & = \text{Transpiration}_{\text{Höhenstufe}} [\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot \text{Blattfläche}_{\text{Höhenstufe}} [\text{m}^2] \cdot \text{Zeit} [\text{s}] \end{aligned}$$

Als Bemessungszeitraum wurden 8 Stunden gewählt, sodass $8 \cdot 3600 \text{ s} = 28800$ Sekunden pro Tag festgelegt wurden. Die erhaltenen Transpirationswerte wurden nach dem Molgewicht für Wasser mit 18 g/mol in Gramm umgewandelt und mit der Voraussetzung $1000 \text{ g Wasser} = 1 \text{ Liter}$ in Liter umgerechnet. Um des Weiteren einen Überblick der Verdunstung der gesamten Pflanze zu bekommen, wurden die Ergebnisse der drei Höhenstufen summiert. Da die nach Penman-Monteith errechnete Verdunstung nach Liter pro m^2 Fläche [mm] dargestellt ist, wurde die errechnete Transpiration der einzelnen Pflanzen auf einen Quadratmeter standardisiert. Hierfür diente die nach Graf *et al.* (2014) errechnete Grundfläche von $5,0 \text{ m}^2$, die jeder Pflanze als Grundfläche zur Verfügung steht und sich mit der in der Praxis üblichen Anwendung von ca. 2000 Pflanzen pro Hektar deckt.

Abschließend wurden die mit der Gaswechselanlage gemessenen Transpirationswerte $\text{ET}_{\text{Hopfen}}$ mit den errechneten ET_0 Werten der Wetterstation verglichen und ein fiktiver Korrekturfaktor für jeden Tag ermittelt. Diese wurden in der Phase zwischen Blüte und Reife gemittelt und angepasst.

2.3. RHIZOSPHERE VON HOPFEN

2.3.1. Wurzelgrabungen

Um ein Bild der Wurzelverteilung im Boden zu bekommen, wurden an mehreren Pflanzen sogenannte Totalausgrabungen (Köstler *et al.*, 1968) vorgenommen. Hierfür wurden durchschnittliche Pflanzen im Bestand ausgewählt, die weder übermäßig stark noch übermäßig schwach sowie keine Randpflanzen waren.

Als Untersuchungszeitpunkt wurde je nach logistischer Möglichkeit das Ende des vegetativen Wachstum als zu untersuchendes Stadium ausgewählt, also etwa bei Makrostadium 5 bzw. am Anfang von Makrostadium 6 (Roßbauer *et al.*, 1995).

Um die ausgewählten Pflanzen wurde mittels Neonfarbe eine leuchtende Markierung gezogen, an der sich ein Minibagger bei der Grabung orientieren konnte (s. Abb. 23). Der Graben hatte die Ausmaße von 3,8 x 3,2 m, wobei die Tiefe des Grabens je nach Wurzelbild variierte.

Nachdem der Graben ausgehoben war, wurde von Norden kommend mit Grabgabeln, Rechen und Reißnadeln das Wurzelwerk vorsichtig freigelegt (Kutschera und Lichtenegger, 1982). Bei der Grabung dokumentierten Fotos und Abmessungen die Dimensionen der freigelegten Wurzelbereiche. Die Ergebnisse dienten der Errechnung des durchwurzelten Bodenvolumens und wurden anhand morphologischer Zeichnungen verbildlicht.



Abbildung 23: Ablauf der morphologischen Wurzeluntersuchung. a) Im Ausmaß 3,8 x 3,2 m wurde eine neonfarbige Markierung angesprüht, die zur Orientierung des Baggerfahrers diente und in der ein Graben gezogen wurde, in dem vorsichtig mit Rechen, Spatengabeln und Besen die Wurzeln freigelegt wurden b) und c) Die freigelegten Wurzeln wurden mit Maßstäben versehen d) - f), anhand von Fotos und Aufzeichnungen protokolliert und dienten später als Vorlage für die morphologischen Zeichnungen.

2.3.1.1. Untersuchte Pflanzen und Standorte

2.3.1.1.1. *Herkules* - Sandboden

Eine Grabung fand auf dem Sandbodenstandort der Bewässerungsversuche in Karpfenstein (vgl. 2.1.1.) statt. Der Boden ist als reiner Sandboden beschrieben und zeichnet sich durch eine durchschnittliche nutzbare Feldkapazität von 13,5 Vol.-% aus.

Die Grabung fand am 23. Juli 2013 statt. Zu diesem Zeitpunkt befand sich die Pflanze in der Blüte bei BBCH 65 (Roßbauer *et al.*, 1995). Zum Zeitpunkt der Grabung war die Pflanze im fünften Ertragsjahr und wies ein durchschnittliches Ertragspotential von 2800 bis 3500 kg/ha auf.

2.3.1.1.2. *Herkules* - Lehm Boden

Auf dem Lehm Bodenstandort Hirnkirchen der Versuchsfläche aus 2.1.3. und 2.1.4. wurde am 08. August die Wurzel der Sorte HS ausgegraben. Der Boden zeichnet sich durch eine nutzbare Feldkapazität von 19 Vol.-% aus. Die Pflanze war zu diesem Zeitpunkt im Übergang zur Ausdoldung bei BBCH 75 (Roßbauer *et al.*, 1995) und hatte ein Alter von fünf Jahren. Das durchschnittliche Ertragspotential der untersuchten Pflanze lag bei ca. 3750 bis 4000 kg/ha.

2.3.1.1.3. *Perle* - Sandboden

In einem Nachbargarten des Versuchsfeldes Karpfenstein (vgl. 2.1.1.) wurde das Wurzelsystem der Sorte PE mit einem Alter von sechs Jahren untersucht. Die Bodeneigenschaften decken sich mit denen des Versuchsstandortes (vgl. 2.1.1.1.). Die Pflanze befand sich im Entwicklungsstadium von BBCH 75 (Roßbauer *et al.*, 1995) und somit in der Doldenentwicklung. Die Grabung fand am 04. August 2014 statt. Der Hopfengarten der untersuchten Pflanze weist ein durchschnittliches Ertragspotential von ca. 1800 bis 2200 kg/ha auf.

2.3.1.1.4. *Perle* - Lehm Boden


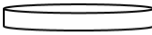
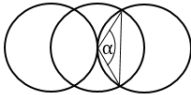

Auf einem Lehm Boden mit einer nutzbaren Feldkapazität von 20 Vol.-% (Koordinaten: 48°34'19.36" N, 11°39'00.51" O) wurden zwei weitere Pflanzen der Sorte PE mittels einer partiellen Teilausgrabung (Polomski und Kuhn, 1998) untersucht. Die beiden Pflanzen lagen in zwei nebeneinander liegenden Hopfengärten, die mittels eines Weges voneinander getrennt sind. Die Grabungen fanden im Rahmen der Tagung „Wurzel und Rhizosphäre: Ökophysiologie, Humushaushalt und Bodenmanagement“ vom 14. bis 15. September 2015 in Pfaffenhofen an der Ilm - der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung (ASRR), der Fördergesellschaft für Agrarwissenschaften und der Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung (GKB) statt.

Die Hopfengärten zeichneten sich durch unterschiedliche Ertragspotentiale aus. Die Fläche mit dem schlechteren Ertragspotential (ca. 1350 kg/ha) wurde daher seit Neueinlegung im Jahre 2009 mittels einer Tröpfchenbewässerung unterstützt. Dennoch entwickeln sich die Pflanzen jedes Jahr schlechter als die Pflanzen der unbewässerten Fläche, die ein Ertragspotential von 1750 bis 2200 kg/ha aufweisen, obwohl jegliche Maßnahmen von Bodenbearbeitung über Düngung als auch im Bereich Pflanzenschutz auf beiden Flächen gleich durchgeführt wurden. Eine Beantwortung sollte über die Kenntnis des Wurzelsystems erfolgen. Die Grabungen fanden am 11. September 2015 statt. Das Alter der Pflanzen der unbewässerten Fläche betrug vier Jahre, das Alter der Pflanzen der bewässerten Fläche betrug sechs Jahre. Beide Pflanzen waren bereits voll entwickelt und pflückreif (BBCH 90, nach Roßbauer *et al.*, 1995).

2.3.2. Berechnungen des durchwurzelten Bodenvolumens

Die Errechnung des durchwurzelten Bodenvolumens orientierte sich an der gefundenen dreidimensionalen Ausdehnung des Wurzelsystems. Die vorgefundene Aufteilung des Wurzelwerks in horizontal und vertikal verlaufende Wurzeln vereinfachte, die Ausdehnung in geometrische Formen einzuteilen und ein zusammengesetztes Volumen zu errechnen. Die verwendeten geometrischen Körper mitsamt der verwendeten Formeln zur Berechnung sind Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Lage und geometrische Form der aufgefundenen Wurzelbereiche und Formeln zur Volumenberechnung. Der erste Bereich wird durch den künstlich angehäuften Bifang bestimmt. Dieser ist vergleichbar mit einem triangularen Prisma. Im A-Horizont um den Wurzelstock herum verlaufen horizontal gerichtete Wurzeln, die in ihrer Ausdehnung die Form eines Zylinders beschreiben. Da sich die horizontal verlaufenden Wurzeln benachbarter Pflanzen rein rechnerisch einen Teil des Volumens teilen, muss dieses Volumen um die Zylinderüberschneidung korrigiert werden. Die vertikal nach unten verlaufenden Wurzeln werden mittels eines Quaders unterhalb des Zylinders beschrieben. Die zugrundeliegenden Formeln aller geometrischen Körper dienen der Berechnung des durchwurzelten Bodenvolumens.

| Lage | Geometrische Form zur Berechnung des Volumens | Formel | Form |
|--|---|--|---|
| Bifang | Prisma | $\frac{1}{2} \text{ Breite} \cdot \text{Höhe} \cdot \text{Länge}$ |  |
| A-Horizont (um den Wurzelstock) | Zylinder | $\pi \cdot r^2 \cdot \text{Höhe}$ |  |
| A-Horizont (um den Wurzelstock) | Zylinderüberschneidung | $r^2 \cdot (\pi \cdot \alpha / 180^\circ - \sin \alpha) \cdot h$ mit $\alpha = 120^\circ$ |  |
| B-Horizont (unterhalb des Wurzelstocks) | Würfel | $\text{Tiefe} \cdot \text{Höhe} \cdot \text{Länge}$ |  |

2.4. RETROSPEKTIV ERSTELLTE WASSERBILANZEN IN DER HALLERTAU

Ausgehend von den vorgeschlagenen Korrekturfaktoren der FAO (Allen *et al.*, 1998) für die Jahre 2003 (repräsentativ für ein sehr trockenes Jahr) und die Jahre 2012 bis 2015 wurden retrospektive Berechnungen des pflanzenverfügbaren Wassers in Abhängigkeit einer definierten Wurzeltiefe über die gesamte Hallertau vorgenommen.

2.4.1. Verdunstungswerte ET_0 und ET_{Hopfen}

Als berechnete Verdunstungswerte nach Penman-Monteith (ET_0) dienten Werte von in der Hallertau aufgebauten Wetterstationen „Sandharlanden“, „Eschenhart“, „Dietrichsdorf“, „Hüll“, „Baumannshof“ und „Stadelhof“ (s. Abb. 52 im Anhang), die über die Homepage der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (www.LfL.bayern.de) unter dem Stichwort „Agrarmeteorologie Bayern“ abgerufen werden können.

Zunächst wurden die Verdunstungswerte ET_0 nach Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) beginnend vom 01. Mai bis zum 15. September für alle Jahre in Vergleich gestellt, um mögliche klimatische Unterschiede der Standorte in der Verdunstung darstellen zu können. Hierzu wurden die jeweiligen Verdunstungswerte für jeden Standort und jedes Jahr in Form eines Liniendiagramms gegen die Zeit dargestellt.

Ausgehend von den ET_0 -Werten wurden die Jahressummen der Verdunstung von Hopfen (ET_{Hopfen}) errechnet. Hierzu wurden die an den Wetterstationen ermittelten ET_0 Werte mit den Korrekturfaktoren (k_c -Werte) nach der Formel:

$$ET_{\text{Hopfen}} [\text{mm}] = ET_0 [\text{mm}] \times k_c$$

errechnet und die Ergebnisse der einzelnen Tage aufsummiert in Tabellenform wiedergegeben. Die vorgeschlagene Periode des ersten k_c -Wertes $k_{c_{\text{ini}}}$ mit 0,3 wurde beginnend am 01. Mai jeden Jahres bis zum 15. Juni angewendet. Mit Beginn der Hauptwachstumsphase der Hopfenpflanzen, dies ist für die Sorte Herkules etwa ab Erreichen der Gerüsthöhe (festgelegt auf den 16. Juni), setzt der k_c -Wert $k_{c_{\text{mid}}}$ mit 1,05 für 70 Tage bis zum 24. August ein. Darauf folgt der $k_{c_{\text{end}}}$ mit 0,85 bis zum einschließlich 15. September.

2.4.2. Pflanzenverfügbares Wasser bei unterschiedlichen Bodenarten

Für die Berechnung des pflanzenverfügbaren Wassers wurde ein durchschnittliches Wurzelvolumen von 5 m³ angenommen, was die Untersuchungen im Rahmen des Projektes durchschnittlich widerspiegelt (vgl. 3.3.). Bei einer Fläche von 5 m², die jede Hopfenpflanze zur Verfügung hat, ergibt sich somit eine Wurzeltiefe von 1 m, was eine Berechnung von Modellen mit den gegebenen Werten der Parameter Niederschlag, Verdunstung und Bodenwassergehalt in mm vereinfacht.

Als Referenzwerte für das pflanzenverfügbare Wasser in mm/dm dienten - in Absprache mit der Abteilung für Bodenkunde der LfL - Tabellenreferenzwerte (Vorderbrügge *et al.*, 2004), die für die jeweilige Bodenart mit der Entstehungsart und der jeweiligen Zustandsstufe nachgeschlagen wurden und in der Tabelle 6 aufgelistet sind.

Tabelle 6: Verwendete Bodenarten zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz. Die Werte stammen aus Tabellenreferenzen nach Vorderbrügge *et al.* (2004) und beziehen sich auf die jeweiligen Bodenarten im Bereich der Wetterstationen. Die nFK [Vol.-%] und das daraus resultierende pflanzenverfügbare Wasser [Liter] gelten für 1 m Wurzeltiefe.

| | Eschenhart | Hüll | Dietrichsdorf | Stadelhof | Sandharlanden | Baummannshof |
|---|------------|---------|---------------|-----------|---------------|--------------|
| Bodenart mit Entstehungsart und Zustandsgröße | L Lö(3) | L Lö(4) | L LöD(4) | IS D(1) | sL D(3) | S Al(4) |
| nFK [mm/dm] | 22,57 | 19,96 | 18,88 | 18,11 | 11,35 | 6,43 |
| Pflanzenverfügbares Wasser [Liter] bei 1 m Wurzeltiefe und Feldkapazität (PVW) | 225,7 | 199,6 | 188,8 | 181,1 | 113,5 | 64,3 |

Davon ausgehend wurde nach der Formel

$$PVW_{\text{Tag}} [\%] = PVW_{\text{Vortag}} [\%] + (\text{Niederschlag}_{\text{Tag}} [\text{mm}] - ET_{0 \text{ Tag}} [\text{mm}] * k_c) / \left(\frac{PVW_{[\text{mm}]}}{100 [\%]} \right)$$

das tägliche pflanzenverfügbare Wasser für die jeweilige Bodenart ausgerechnet (vgl. 2.1.2.2.) und in Form eines Liniendiagramms gegen die Zeit aufgetragen.

Als Bedingung wurde ein Start mit wassergesättigten Böden (PVW = 100 %) am 01. Mai jeden Jahres festgelegt. Des Weiteren galt, dass die Pflanzen unabhängig vom pflanzenverfügbaren Wasser immer gleichbleibend anhand der errechneten $ET_{\text{Hopfen}} (= ET_0 \times k_c)$ transpirieren und dabei maximal 100 % und minimal 0 % des PVW im Boden erreicht werden können, vergleichbar mit einem geschlossenen System.

2.4.3. Simulation einer optimalen Bewässerung

Neben dem pflanzenverfügbaren Wasser wurden ausgehend von den berechneten Modellen und den vorherrschenden Wetterereignissen in den betrachteten Jahren optimale Bewässerungen simuliert. Ziel hierbei war es, eine Empfehlung für die Zukunft geben zu können, welche Flächen bewässerungswürdig sind, und darüber hinaus wieviel Wasser an bestimmten Orten mit den jeweiligen repräsentativen Bodenarten benötigt wird.

Da jeder Bodenart eine andere nutzbare Feldkapazität zugrunde liegt, kommen hierbei sowohl unterschiedliche Bewässerungsfrequenzen als auch unterschiedliche Bewässerungsmengen in Abhängigkeit der Verdunstung zustande.

Hierbei ist die nFK [%] des jeweiligen Bodens mit dem PVW [%] im Bereich der Wurzeltiefe identisch. Nachdem die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser rechnerisch auf einen Wert von 60 % nFK ausgetrocknet ist, wird das Reservoir wieder auf 90 % nFK aufgefüllt, was auch als Geisenheimer Methode bekannt ist (Paschold *et al.*, 2011; Zinkernagel *et al.*, 2012).

60 % liegen dabei in einem Bereich, wo noch nicht von Trockenstress ausgegangen wird. Das Auffüllen auf 90 % soll eine unökonomische Versickerung von kurz nach der Bewässerung eintretenden Niederschlägen verhindern und ist bei der Bewässerung von ackerbaulichen Kulturen gängige Praxis (Michel und Sourell, 2014).

Die Berechnung für jeden Tag, an dem das PVW unter 60 % fiel, lautete:

$$\text{Beregnung [mm]} = \text{PVW}_{\text{gesamt}} [\text{mm}] \times 0,3$$

Damit wurde gewährleistet, dass der Boden wieder zu 90 % mit Wasser aufgefüllt wurde. Die verabreichten Wassermengen über eine Saison und einen Standort wurden kumuliert in Form einer Tabelle dargestellt.

2.5. UNTERSUCHUNGSGEBIET HALLERTAU

Alle vorgestellten Arbeiten wurden in der Hallertau durchgeführt. Die Hallertau ist eine Region in Bayern im Süden Deutschlands. Sie ist begrenzt durch die Städte Ingolstadt und Kelheim im Norden, Schrobenhausen im Westen, Landshut im Südosten und Freising im Süden und erstreckt sich innerhalb der fünf bayerischen Landkreise Pfaffenhofen, Freising, Kelheim, Landshut und Eichstätt.

Eine exakte geografische Grenze gibt es nicht. Das Hauptkriterium ist der Hopfenanbau, welcher sich bei einer Gesamtfläche von ca. 2400 km² im Jahr auf ca. 15.000 ha erstreckt (Barth, 2015).

2.5.1. Meteorologie

In der Hopfenanbauregion Hallertau herrscht gemäßigttes Klima vor. Die Wetterstation am Hopfenforschungszentrum Hüll, welche zentral in der Hallertau gelegen ist, hat eine durchschnittliche Jahresniederschlagssumme im 10-jährigen Mittel (2006 bis 2015) von 873,1 mm. Die Durchschnittstemperatur liegt bei 9,3 °C. Die exakten Durchschnitts- bzw. Summenwerte der meteorologischen Parameter Temperatur [°C], relative Luftfeuchte [%], Niederschlag [mm] und die Sonnenscheindauer [h] der Untersuchungsjahre 2012 bis 2015, sowie das 10-jährige Mittel der Wetterstation Hüll sind in Tabelle 7 aufgelistet.

2.5.1. Bodenarten

Die Hallertau gehört dem Donau-Isar-Hügelland an, welches erdzeitgeschichtlich dem Tertiären Hügelland zuzuordnen ist (Pinzl, 2002). Dabei liegen sehr verschiedene Bodenarten vor. Allerdings können zwei wichtige grundlegende Bodenarten im Hopfenbau unterschieden werden. So werden ca. 73 % des Hopfenanbaus auf Lehm Böden, in der Landwirtschaft als schwere Böden bezeichnet, durchgeführt und 24 % auf sandigen, sogenannten leichten Böden. Die restlichen 3 % werden auf tonigen Böden kultiviert (LfL, persönliche Mitteilung).

Tabelle 7: Monatliche Witterungsdaten der Jahre 2012 bis 2015 für die Hallertau (Standort Hüll). Das 10-jährige Mittel bezieht sich auf die Jahre 2004 bis einschl. 2013 (LfL Jahresbericht 2012, 2013, 2014, Sonderkultur Hopfen).

| Monat | | Temperatur in 2 m Höhe [°C] | | | relative Luftfeuchte Mittel [%] | Niederschlag Summe [mm] | Sonnenscheindauer [h] |
|-----------|------------|-----------------------------|-------|-------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | | Mittel | Min Ø | Max Ø | | | |
| Januar | 2012 | 0,9 | -2,5 | 5,1 | 84,8 | 111,5 | 69,3 |
| | 2013 | -0,2 | -3,1 | 2,0 | 89,8 | 66,0 | 24,0 |
| | 2014 | 1,5 | -1,3 | 4,5 | 93,9 | 51,9 | 27,0 |
| | 2015 | 1,25 | -10,2 | 15 | 90,8 | 87,8 | 33,0 |
| | Ø 10 Jahre | -0,6 | -4,1 | 2,9 | 88,3 | 62,3 | 63,7 |
| Februar | 2012 | -4,5 | -9,8 | 2,3 | 77,2 | 23,5 | 108,3 |
| | 2013 | -1,9 | -5,4 | 0,9 | 88,9 | 82,3 | 17,0 |
| | 2014 | 2,9 | -1,5 | 8,0 | 83,9 | 10,5 | 89,0 |
| | 2015 | -1,8 | -13,4 | 7,9 | 90,3 | 14,9 | 65,7 |
| | Ø 10 Jahre | -0,5 | -4,7 | 4,2 | 85,5 | 44,3 | 84,0 |
| März | 2012 | 6,6 | 0,3 | 15,1 | 78,6 | 16,5 | 172,6 |
| | 2013 | 1,0 | -2,8 | 5,7 | 80,8 | 47,9 | 129,0 |
| | 2014 | 6,2 | -0,3 | 13,5 | 75,9 | 25,5 | 188,8 |
| | 2015 | 5,1 | -3,1 | 16,7 | 75,9 | 31,3 | 139,4 |
| | Ø 10 Jahre | 3,6 | -1,5 | 9,4 | 80,8 | 59,3 | 146,6 |
| April | 2012 | 8,9 | 2,7 | 14,5 | 71,9 | 69,3 | 165,3 |
| | 2013 | 8,6 | 3,8 | 13,9 | 78,4 | 45,8 | 131,0 |
| | 2014 | 10,1 | 4,1 | 16,2 | 76,7 | 28,2 | 162,4 |
| | 2015 | 8,4 | -3,9 | 23,7 | 71,3 | 39,5 | 232,2 |
| | Ø 10 Jahre | 9,6 | 3,2 | 16,3 | 73,6 | 63,0 | 205,5 |
| Mai | 2012 | 14,3 | 7,4 | 21,4 | 67,9 | 58,8 | 260,3 |
| | 2013 | 11,7 | 7,0 | 16,5 | 81,8 | 145,2 | 130,0 |
| | 2014 | 12,4 | 7,1 | 17,9 | 77,0 | 129,8 | 168,2 |
| | 2015 | 13,4 | 4,0 | 27,7 | 78,6 | 113,7 | 161,1 |
| | Ø 10 Jahre | 13,4 | 7,2 | 19,6 | 74,1 | 105,1 | 215,0 |
| Juni | 2012 | 17,1 | 11,2 | 23,3 | 76,4 | 130,7 | 227,5 |
| | 2013 | 15,7 | 10,5 | 21,2 | 79,3 | 171,4 | 193,0 |
| | 2014 | 16,9 | 9,0 | 23,9 | 66,7 | 48,8 | 279,7 |
| | 2015 | 17,1 | 6,2 | 31,9 | 77,0 | 112,9 | 208,2 |
| | Ø 10 Jahre | 16,8 | 10,7 | 23,0 | 75,5 | 110,6 | 217,9 |
| Juli | 2012 | 18,1 | 12,1 | 24,2 | 76,0 | 67,4 | 225,4 |
| | 2013 | 20,0 | 11,9 | 27,6 | 66,9 | 10,7 | 301,0 |
| | 2014 | 18,6 | 12,8 | 24,9 | 79,8 | 162,7 | 206,6 |
| | 2015 | 21,1 | 5,5 | 36,1 | 67,7 | 27,6 | 280,7 |
| | Ø 10 Jahre | 18,4 | 12,1 | 25,4 | 75,2 | 110,1 | 246,0 |
| August | 2012 | 18,1 | 11,6 | 25,4 | 77,6 | 176,4 | 273,4 |
| | 2013 | 17,9 | 11,1 | 25,3 | 75,5 | 58,1 | 244,0 |
| | 2014 | 15,8 | 10,7 | 21,7 | 84,0 | 109,7 | 189,6 |
| | 2015 | 20,4 | 6,4 | 36,8 | 72,3 | 43,4 | 278,5 |
| | Ø 10 Jahre | 17,3 | 11,3 | 24,3 | 80,0 | 119,3 | 215,1 |
| September | 2012 | 13,6 | 7,9 | 19,6 | 83,7 | 44,2 | 170,7 |
| | 2013 | 13,1 | 8,3 | 18,4 | 83,9 | 116,9 | 126,0 |
| | 2014 | 14,1 | 9,5 | 19,7 | 90,2 | 48,9 | 133,1 |
| | 2015 | 13,3 | 1,8 | 33,6 | 79,1 | 40,6 | 139,8 |
| | Ø 10 Jahre | 13,6 | 8,1 | 20,2 | 83,6 | 62,1 | 170,1 |
| Oktober | 2012 | 7,9 | 3,7 | 12,8 | 89,2 | 42,7 | 108,5 |
| | 2013 | 9,5 | 5,0 | 14,6 | 86,7 | 57,8 | 98,0 |
| | 2014 | 10,8 | 6,8 | 15,5 | 93,8 | 77,3 | 96,1 |
| | 2015 | 8,0 | -1,7 | 23,4 | 89,5 | 55,2 | 86,0 |
| | Ø 10 Jahre | 8,8 | 4,1 | 14,8 | 87,6 | 49,2 | 120,1 |
| November | 2012 | 4,5 | 2,0 | 7,7 | 93,1 | 77,0 | 55,1 |
| | 2013 | 3,9 | 1,1 | 6,5 | 90,0 | 61,6 | 36,0 |
| | 2014 | 5,4 | 2,8 | 8,7 | 96,2 | 41,7 | 52,6 |
| | 2015 | 6,4 | -5,4 | 18,7 | 86,1 | 75,1 | 89,1 |
| | Ø 10 Jahre | 3,8 | 0,4 | 7,7 | 91,2 | 54,6 | 62,2 |
| Dezember | 2012 | 0,4 | -3,0 | 3,7 | 89,0 | 87,1 | 59,0 |
| | 2013 | 1,3 | -1,4 | 4,9 | 91,1 | 9,6 | 52,0 |
| | 2014 | 2,5 | -0,4 | 5,0 | 92,6 | 46,9 | 27,1 |
| | 2015 | 3,5 | -3,6 | 13,5 | 94,0 | 21,5 | 55,6 |
| | Ø 10 Jahre | 0,2 | -2,8 | 3,4 | 91,0 | 61,8 | 52,2 |

2.6. STATISTISCHE AUSWERTUNG

Alle ermittelten Daten wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel (Microsoft Inc., USA) aufbereitet und sowohl in deskriptiver als auch in explorativer Statistik mit der freien Software „R“ (R Core Team, 2015) erarbeitet. Zur Ermittlung des sigmoidalen Kurvenverlaufs der Blattfläche über die Zeit diente die Software Origin Pro 2015, der OriginLab Corporation, USA.

Wenn nicht anders angegeben, wurden alle zur Verwerfung der Nullhypothesen angesetzten Signifikanzniveaus für die durchgeführte Statistik wie folgt festgelegt:

signifikant < 0,05*, sehr signifikant < 0,01** und hoch signifikant < 0,001***.

2.6.1. Arithmetisches Mittel

Die Berechnung des arithmetischen Mittels erfolgte nach der Formel:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

mit

\bar{x} = arithmetisches Mittel

n = Anzahl aller beobachteten Werte

x_i = i-ter Wert

2.6.2. Standardabweichung

Die Standardabweichung wurde nach der Formel

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

mit:

s = Standardabweichung

n = Stichprobenanzahl

x_i = i-ter Wert

errechnet.

2.6.3. Median

Der Median \bar{x}_{med} stellt die zentrale Tendenz einer Messreihe dar. Dabei wurde der Wert für eine ungerade Anzahl an Stichproben nach der Formel:

$$\bar{x}_{\text{med}} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}$$

berechnet. Für eine gerade Anzahl der Stichproben erfolgte die Berechnung nach der Formel:

$$\bar{x}_{\text{med}} = \frac{1}{2} x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2} + 1}$$

2.6.4. studentischer t-Test

Der studentische t-Test ist ein parametrisches Testverfahren, mit dem geprüft werden kann, ob die Mittelwerte zweier Grundgesamtheiten (zweiseitiger t-Test) gleich sind oder sich statistisch unterscheiden und ist standardmäßig in der Statistiksoftware R unter `t.test` integriert. Dabei wird von der Nullhypothese H_0 ausgegangen, dass sich die Mittelwerte nicht unterscheiden. Die Voraussetzungen zur Durchführung des t-Tests sind die Normalverteilung beider zu vergleichenden Gruppen sowie Varianzhomogenität. Diese wurden mittels des Shapiro-Wilk-Tests und des Levene Tests überprüft.

2.6.5. Mann-Whitney U Test

Im Falle von nicht normalverteilten Daten zweier zu vergleichender Gruppen bzw. bei Medianvergleichen muss auf einen sogenannten Rangsummentest ausgewichen werden. Um in diesem Fall einen Vergleich von zwei Gruppen anstellen zu können, wurde der Mann-Whitney U Test (Mann und Whitney 1947) verwendet, welcher unter dem Befehl `wilcox.test` in R integriert ist und entsprechend verwendet wurde.

2.6.6. Varianzanalyse (ANOVA)

Die Varianzanalyse (ANOVA) ist ein Prüfverfahren, welches mittels der Varianzen verschiedener Gruppen auf Zusammenhänge zwischen den Gruppen schließen lässt. Dabei wird versucht, die Varianz einer sogenannten Zielvariablen durch die Varianz der Faktoren zu erklären, indem die Streuung zwischen den Stichproben mit der Streuung innerhalb der Stichproben verglichen wird (Dormann und Kühn, 2011). Die Varianzanalyse diente zur Untersuchung der Erträge und Alphasäuregehalte der Bewässerungsversuche. Normalerweise wurde dabei immer die gleiche Anzahl an Mittelwerten (Stichproben) untersucht. Dieses Vorgehen wird als orthogonale ANOVA bezeichnet. Im Falle von ungleichen Stichprobenanzahlen innerhalb der Gruppen handelt es sich um ein sogenanntes unbalanciertes Modell. Im Falle mehrerer einflussnehmender Faktoren auf die Ausgangsvariable spricht man von einer mehrfaktoriellen ANOVA. Die ANOVA ist unter dem Befehl `aov` standardmäßig in R enthalten. Voraussetzungen für die Durchführung einer Varianzanalyse sind neben Normalverteilung aller Gruppen auch die Homoskedastizität (Varianzhomogenität der Residuen), welche jeweils mit dem Shapiro-Wilk und dem Levene Test überprüft wurde.

2.6.6.1. Student-Newman-Keuls (SNK)-*posthoc*-Test

Im Falle einer detektierten Signifikanz mittels der vorangehenden ANOVA wurde mittels des Student-Newman-Keuls Tests untersucht, welche Gruppen sich signifikant unterscheiden. Der Test gilt als robust gegenüber Fehlern 1. Art und wird häufig in agrarwissenschaftlichen Versuchen angewendet. Er ist in R unter dem Package „agricolae“ integriert und wurde über den Befehl `SNK.test` verwendet.

2.6.7. Kruskal-Wallis-Test

Der Kruskal-Wallis-Test (Kruskal und Wallis, 1952) ist ein statistischer Test der vergleichbar zur Varianzanalyse überprüft, ob mehr als zwei Gruppen einer Grundgesamtheit entstammen. Der Unterschied zur Varianzanalyse liegt darin, dass die Prüfstatistik auf sogenannten Rangsummen basiert, welche im Gegensatz zur ANOVA nicht aus normalverteilten Daten stammen müssen. Der Test ist standardmäßig in R unter dem Befehl `kruskal.test` implementiert und wurde nach diesen Vorgaben verwendet.

2.6.8. Regressionsanalyse

Das Erstellen von Regression dient der Aufdeckung diverser (Umwelt-)Einflüsse auf eine abhängige Variable. Der Vorteil besteht darin, dass man gleichzeitig mehrere (erklärende) Variablen auf die Stärke von Einflüssen auf eine (abhängige) Variable bewerten kann.

Dabei basiert das Erstellen eines linearen Modells auf einer Regressionsgerade, wobei diese aus mehreren Koeffizienten gebildet wird und deren Steigungen den positiven oder negativen Einfluss auf die abhängige Variable aufzeigen. Dies geschieht über Minimierung der Abweichungsquadrate der Residuen des einzelnen Parameters bezogen auf die über die abhängige Variable erstellte Regressionsgerade (Dormann und Kühn, 2011). Im Fall eines Modells mit mehreren kontinuierlichen Daten spricht man von einer multiplen Regression, die in R unter dem Befehl `lm` verwendet wurde. Die erstellten Modelle wurden dabei einer sogenannten step-backward Selektion unterzogen. Dies bedeutet, dass man beginnend mit allen Umweltparametern schrittweise die Werte mit den höchsten p-Werten aus dem Modell entfernt, während signifikant von Null verschiedene Umweltparameter im Modell erhalten bleiben (Crawley, 2002). Idealerweise bleiben dabei nur signifikant von Null verschiedene Parameter im Modell erhalten. Allerdings ist dabei auch ein zweiter Faktor entscheidend, nämlich die Güte des Modells. Diese wird dabei über den sogenannten R^2 -adjusted-Wert beschrieben, der angibt wieviel der Varianz der abhängigen Variable durch die erklärenden Variablen beschrieben werden kann. Ziel ist es, möglichst viel der Varianz durch die Modelle erklären zu können,

sodass durchaus auch Modelle mit nicht signifikanten p-Werten im Modell erhalten bleiben können.

2.6.9. Levene Test

Der Levene Test ist ein statistischer Test, mit dem die Varianzhomogenität von Daten überprüft werden kann. Er fand in dieser Arbeit Anwendung, um die Voraussetzungen der einzelnen Vergleichstests zu überprüfen, und ist in der Statistiksoftware R im Package (`car`) implementiert und wird über den Befehl `LeveneTest` ausgeführt.

2.6.10. Shapiro-Wilk Test

Um die Normalverteilung der Datensätze zu überprüfen, wurde der Shapiro-Wilk Test (Shapiro und Wilk, 1965) verwendet, dessen Nullhypothese davon ausgeht, dass die untersuchten Daten einer Normalverteilung entstammen. Er ist standardmäßig in der Software R verfügbar und wird über den Befehl `shapiro.test` aufgerufen.

2.6.11. Pearson Korrelationstest

Der Korrelationstest nach Pearson wird verwendet, um lineare Zusammenhänge zwischen zwei Datensätzen aufzudecken. Er gibt einen Korrelationskoeffizienten aus, welcher Werte zwischen -1 und 1 annehmen kann. Dabei zeigt das Vorzeichen an, ob ein negativer oder positiver Zusammenhang zwischen den Daten besteht. Umso näher an 0, desto unwahrscheinlicher ist ein Zusammenhang, je näher der Koeffizient an ± 1 liegt, desto wahrscheinlicher besteht eine Abhängigkeit zwischen den Daten.

Der Test wurde verwendet, um Kollinearitäten zwischen den erklärenden Variablen der Multiplen Regression zu überprüfen und ist in R unter dem Befehl `cor (method = "pearson")` anwendbar.

3. ERGEBNISSE

3.1. FELDVERSUCHE ZUR TRÖPFCHENBEWÄSSERUNG

3.1.1. Bewässerung mit Steuerung nach Saugspannungen

3.1.1.1. Klimatische Situation

3.1.1.1.1. *Attenhofen - Lehm Boden*

3.1.1.1.1.1. *2012*

Am Standort Attenhofen fielen im Jahr 2012 insgesamt 883,5 mm Niederschlag. Die Daten wurden bis einschließlich Juni aus Daten der nahegelegenen Wetterstation „Dietrichsdorf“ und ab Juli mittels der am Standort installierten Wetterstation generiert. In den Vegetationsmonaten Mai bis Mitte September konnten am Standort 487,1 mm Niederschläge verzeichnet werden. Vor allem die Monate Juni mit 127,8 mm und der August mit 191,6 mm waren sehr regenreich. Der Juli fiel mit 61,2 mm trockener aus.

3.1.1.1.1.2. *2013*

Das Jahr 2013 lag mit insgesamt 843,4 mm Niederschlag im 10-jährigen Durchschnitt der Hallertau. Allerdings fielen diese bezogen auf die Wachstumsphase von Hopfen ungünstig. Speziell in den Monaten Mai mit 147,0 mm und im Juni mit 139,4 wurden Bodenbearbeitungsmaßnahmen durch überdurchschnittlich hohe Niederschläge behindert, was auch den Versuchsaufbau erschwerte. So war der Versuchsaufbau, welcher jährlich zu allererst abhängig vom Anhäufeln der Bifänge war, hierdurch beeinträchtigt. Die trockenen Monate Juli mit nur 14,6 mm und August mit 52,0 mm Niederschlägen wiesen begünstigte Bedingungen für die Versuchsfrage auf. Erst im September, während der Hopfenernte, fielen mit 122,0 mm wieder überdurchschnittlich hohe Niederschläge.

3.1.1.1.1.3. *2014*

Das Jahr 2014 war mit insgesamt 648,8 mm trocken. Während der Vegetationsphase von Hopfen fielen insgesamt 351,0 mm Niederschläge. Diese verteilten sich auf 88,2 mm im Mai, 36,8 mm im Juni, 120,4 mm im Juli und 79,0 mm im August. Bis zur Ernte Mitte September fielen noch 26,6 mm Niederschlag.

3.1.1.1.2. *Karpfenstein – Sandboden*

3.1.1.1.2.1. *2012*

Am Versuchsstandort Karpfenstein fielen im Jahr 2012 von Januar bis Dezember insgesamt 820,1 mm an Niederschlag. Die Daten von Januar bis einschließlich Juni wurden dabei von der nahegelegenen Wetterstation „Sandharlanden“ generiert. Ab Juli stammen die Daten von der vor Ort installierten Wetterstation „imetos“. Der Mai war mit 64,1 mm relativ trocken. Im Juni fiel mit 143,7 mm für die Hallertau überdurchschnittlich viel Regen. Der Juli war dafür mit 58,6 mm wieder trockener. Im August konnten insgesamt 137,0 mm verzeichnet werden. Im September wurden bis zur Ernte noch 29,8 mm gemessen. Insgesamt fielen so in der Vegetationszeit der Sorte Herkules 433,2 mm am Standort Karpfenstein.

3.1.1.1.2.2. *2013*

Das Jahr 2013 war mit insgesamt 507,4 mm während der Vegetationszeit (01. Mai bis 15. September) durchschnittlich sehr feucht. Allerdings war die Verteilung für das Wachstum von Hopfen in diesem Jahr nachteilig. So fielen davon im Mai bereits 146,0 mm und im Juni 134,6 mm. Der Juli war daraufhin mit 21,4 mm Niederschlag als sehr trocken einzustufen. Im August konnten mit einem starken Niederschlagsereignis am 25. August mit 43,4 mm wieder insgesamt 105,8 mm verzeichnet werden. Bis zur Ernte wurden weitere 99,6 mm an Niederschlag gemessen.

3.1.1.1.2.3. *2014*

Im Jahr 2014 wurden in Karpfenstein insgesamt 751,8 mm an Niederschlag registriert. Der Monat Mai war mit 121,0 mm überdurchschnittlich feucht. Dahingegen fiel der Monat Juni mit 30,8 mm unterdurchschnittlich trocken aus. Die Monate Juli mit 132,4 mm und August mit 117,0 mm waren allerdings wieder durchschnittlich in Bezug auf das 10-jährige Mittel der Hallertau. Im Monat September fielen insgesamt 61,8 mm, wovon 28,2 mm bis zur Ernte Mitte September auftraten

3.1.1.2. Installation von Watermarksensoren und Verlauf der Bodensaugspannung

3.1.1.2.1. Attenhofen - Lehm Boden

Die Installation der Bodenfeuchtesensoren verlief auf Lehm Boden weitestgehend problemlos, auch wenn ein erschwerter Unterschied zum Sandboden (vgl. 3.1.1.2.2.) festzustellen war. Allerdings kann der Umgang mit der automatisierten Technik als nicht störungsfrei beschrieben werden, was anhand des Jahres 2012 verdeutlicht werden soll.

Die Abbildungen 24 und 25 zeigen den Verlauf der Wasserspannungen von 0 bis 2000 hPa der einzelnen Versuchsvarianten (vgl. Abb. 13). Anhand derer sollen exemplarisch für alle Jahre und Varianten die Hauptergebnisse und Schwierigkeiten mit den Messungen und der darüber gesteuerten Bewässerungsautomatik verdeutlicht werden. Die Schaubilder 53 bis 56 im Anhang zeigen die Messungen der Jahre 2013 und 2014.

In den Schaubildern sind die Bewässerungen, die anhand der Steuerungseinheit ausgelöst wurden, dargestellt. Häufig öffnete die automatisierte Anlage die Ventile der Bewässerungskreisläufe nicht, sodass die Bewässerung manuell vor Ort gestartet werden musste. Die gesamten Bewässerungsmengen je Variante und Jahr sind Tabelle 8 zu entnehmen.

In der unbewässerten Kontrolle wurden von Anfang Juli Wasserspannungen von 300 - 400 hPa sowohl in der Tiefe von 30 cm als auch in der Tiefe von 60 cm gemessen. Diese stiegen kontinuierlich an und fielen erst durch Niederschlagsereignisse Anfang August wieder ab. Es zeigt sich, dass diese Niederschläge nicht an allen Sensoren gleiche Auswirkungen hatten. So fiel Sensor 3 nur sehr gering ab, während die anderen beiden Sensoren (Watermark 1 und Watermark 2) wesentlich stärkere Abfälle verzeichneten (s. Abb. 24, Kontrolle). Maximal wurden im Zeitraum der Messung Ende Juli und Ende August Werte von ca. 1000 hPa gemessen. Bis auf wenige Ausnahmen verliefen die Sensoren dabei weitestgehend identisch.

In der stark bewässerten Variante AB150 (s. Abb. 24, AB150) verliefen die Messungen der drei Sensoren in einer Tiefe von 30 cm Tiefe weitestgehend identisch. Lediglich Sensor 2 zeigte hiervon Mitte Juli geringe Abweichungen mit Wasserspannungen von knapp 500 hPa. Insgesamt wurden 16 Bewässerungszyklen ausgelöst, welche stets dazu führten, dass die Sensoren in 30 cm Tiefe wieder abfielen. In einer Tiefe von 60 cm war dies nicht immer zu verzeichnen. Hier bewirkten manche Bewässerungen wie z. B. am 10. August kein Abfallen der Werte. Auch verliefen hier die Sensoren nicht immer gleich. Vor allem Ende August kam es zwischen Sensor 2 und Sensor 3 zu Differenzen von bis zu ca. 500 hPa.

In der Variante AB300 konnten die Saugspannungen zweier Sensoren (Sensor 1 und Sensor 3) nicht durch die Bewässerungsgaben abgesenkt werden (s. Abb. 24, AB300). Dies hatte zur

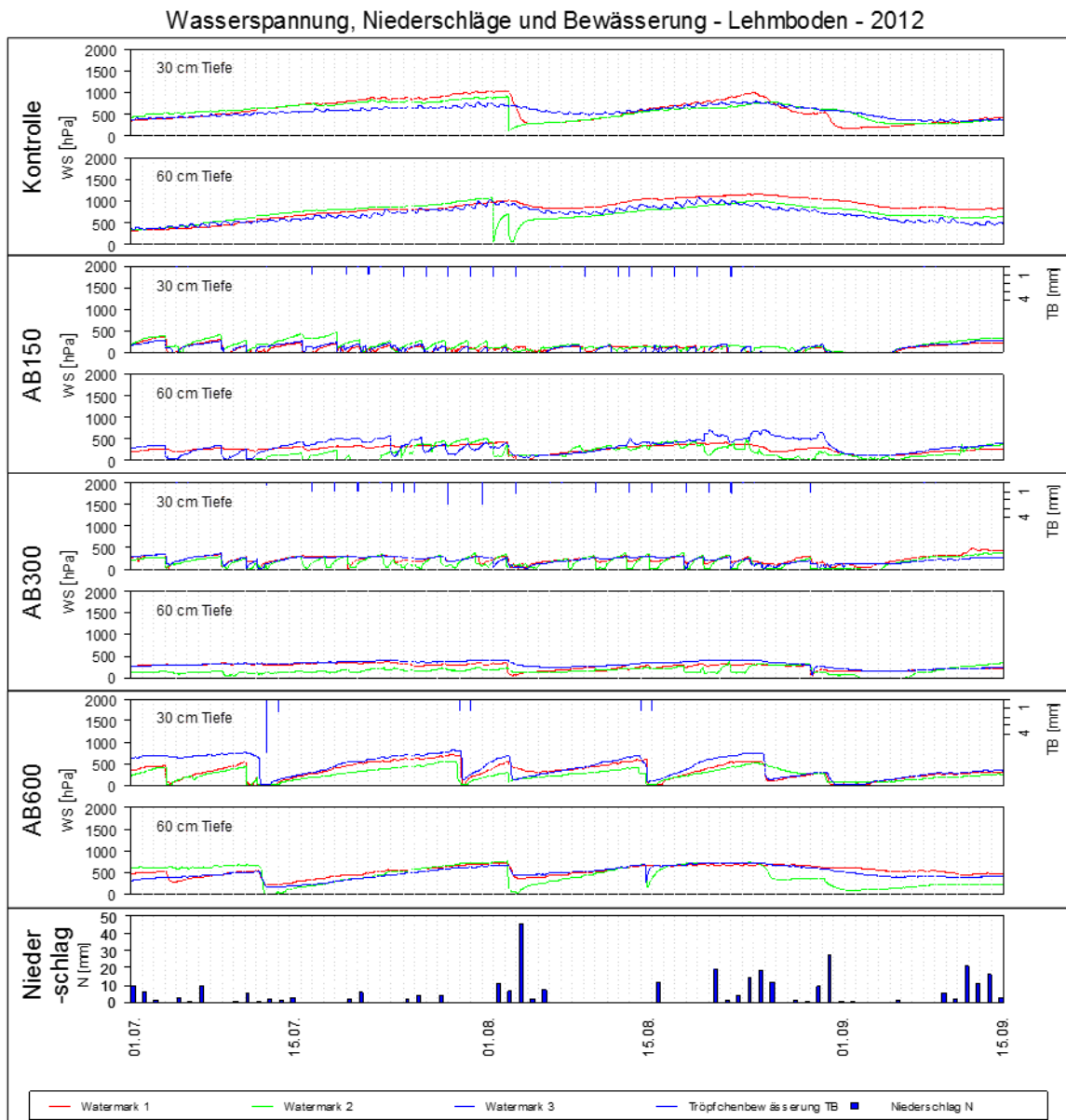


Abbildung 24: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 01.07. - 15.09.2012 in Attenhofen. In jeder Variante wurden drei Watermarksensoren (rot, grün, blau) in der Mitte von zwei Pflanzen in den Tiefen 30 cm und 60 cm unter einer Tropfstelle eingebaut (vgl. Abb. 13), welche alle zehn Minuten die WS registrierten. Die mittels der Steuerungseinheit ICA60 automatisch verlaufende Tröpfchenbewässerung jeder Variante ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

Folge, dass die beiden Bewässerungsgaben am 29. Juli und am 01. August verdoppelt wurden, um eine Absenkung beider Sensoren zu erzwingen, was allerdings erst durch die Niederschlagsereignisse Anfang August für alle drei Sensoren erreicht wurde. Während Sensor 1 und Sensor 3 nur unzureichend durch die Bewässerungen abfielen, wurde ab diesem Zeitpunkt Sensor 2 als Entscheidungssensor programmiert. Insgesamt wurden in der Variante 16 Bewässerungsgaben gegeben, hingegen der Theorie insgesamt sogar mehr als in AB150 (vgl. 3.1.1.3.1.).

3. ERGEBNISSE

Bei der ersten Bewässerungsgabe in Variante AB600 hatte ein Nichtschließen des Ventils im Bewässerungskreislauf eine überdurchschnittlich hohe Bewässerungsgabe von 6,2 mm zur Folge. Obwohl die Sensoren in 30 cm Tiefe weitestgehend über den gesamten Messzeitraum identisch verliefen, musste stets die doppelte Menge an Wasser gegeben werden als geplant, um die Sensoren wieder auf einen Wert von 0 hPa zu senken. Somit kam es in der Variante AB600 zu insgesamt sechs automatischen Bewässerungszyklen.

In der Variante NB300, wo die Sensoren in 60 cm Tiefe im Bifang, was auf Höhe des Tropfschlauches in 30 cm Entfernung war, installiert waren (s. Abb. 25, NB300), verliefen die Sensoren ungleichmäßig. Auch konnte lediglich an Sensor 2 die Bewässerung registriert werden, während die anderen beiden Sensoren durch diese so gut wie keine Ausschläge zeigten. Eine Austrocknung in diesem Bereich konnte nur von Sensor 2 registriert werden, welche durch die Bewässerungen und die Niederschläge Anfang August wieder gestoppt wurde.

In 60 cm Tiefe (30 cm unter dem Tropfschlauch) zeigten die Sensoren 1 und 3 zwar sehr niedrige Saugspannungen an, was sehr nasse Verhältnisse widerspiegelt, doch konnten diese nicht durch Sensor 2 abgebildet werden. Dieser Sensor wurde durch das Bewässerungswasser offensichtlich nicht erreicht. An den tiefer installierten Sensoren 60 cm unter dem Tropfschlauch, also 90 cm unter der Erdoberfläche, wurden zwar an allen Sensoren die Bewässerungszyklen registriert, doch zeigten alle Sensoren stets unterschiedliche Werte an. Während Sensor 3 fast über den gesamten Zeitraum Werte von maximal ca. 200 hPa, was sehr nasse Verhältnisse widerspiegelt, anzeigte, erreichte Sensor 1 Werte von bis zu 1000 hPa.

Die im Bifang installierten Sensoren von Variante ZB300 in 60 cm Tiefe, ca. 1,6 m entfernt vom Tropfschlauch, zeigten ähnliche Saugspannungswerte, wie die identisch verbauten Sensoren der unbewässerten Kontrollvariante. So wurden auch hier Saugspannungen im Bereich von bis zu 1000 hPa erreicht. Allerdings hatten die Niederschläge Anfang August hier kein Abfallen der Sensoren zur Folge, sodass davon auszugehen ist, dass die Niederschläge hier nicht bis in diese Tiefe vorgedrungen sind. Die Sensoren in der Fahrgassenmitte (3 Sensoren auf Höhe des Tropfschlauches in 30 cm Tiefe und in 30 cm Entfernung, 3 Sensoren in 60 cm Tiefe, 30 cm unter dem vergrabenen Tropfschlauch und 3 Sensoren in 90 cm Tiefe, 60 cm unter dem vergrabenen Tropfschlauch) zeigten durchweg sehr feuchte Verhältnisse in diesem Bereich an, was zeigt, dass es hier zu keiner Wasserentnahme gekommen ist.

Am 24. August sind in der Variante ZB300 acht Sensoren vollständig ausgefallen. Dies war auf eine Bodenbearbeitung zurückzuführen, bei denen die Kabel der Sensoren durchtrennt wurden. Eine Neuinstallation war vor der Ernte nicht mehr möglich.

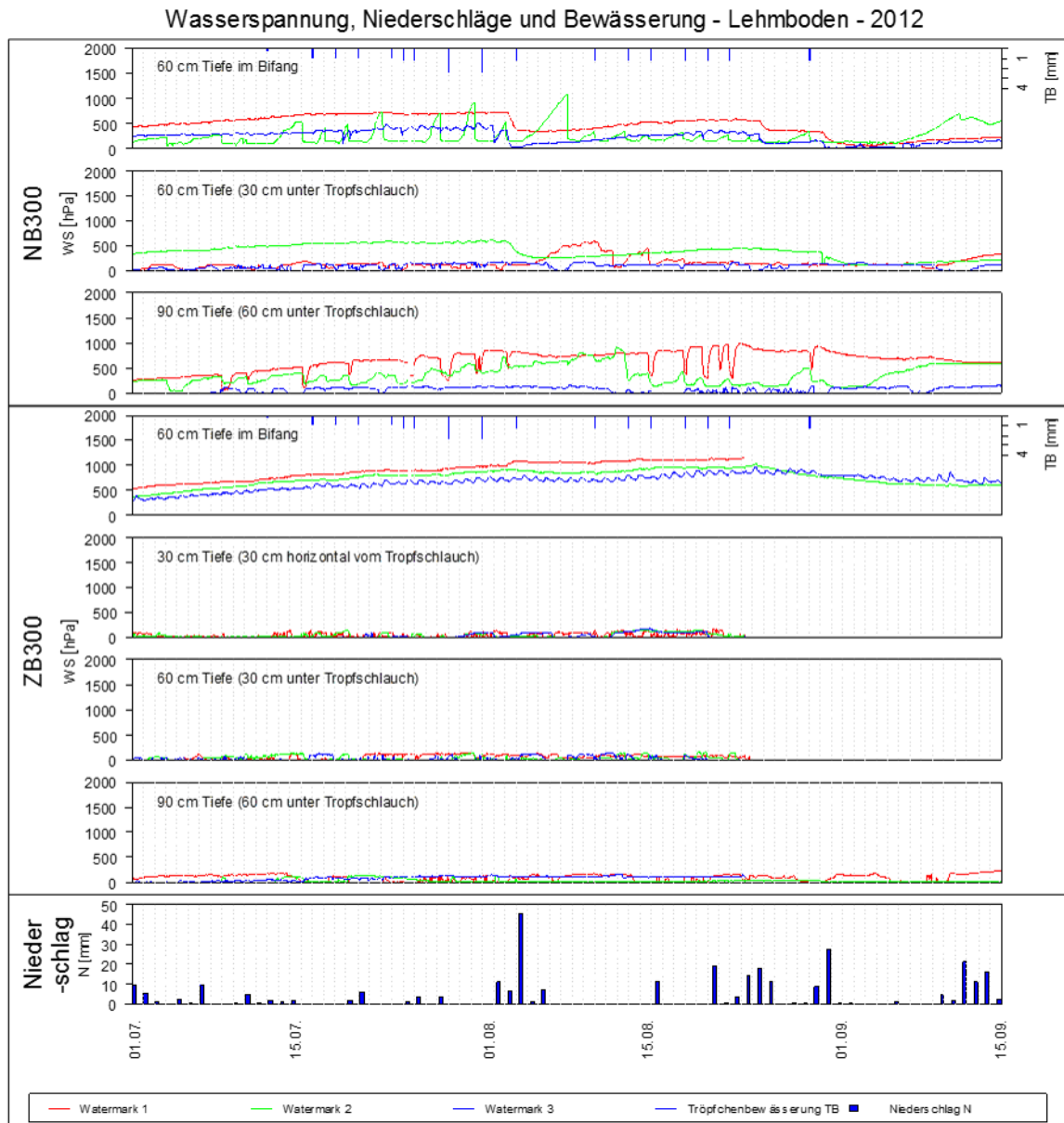


Abbildung 25: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 01.07. - 15.09.2012 in Attenhofen. Jeder Messwert wurde anhand von drei Sensoren (rot, grün, blau) wiederholt. Für die genaue Anordnung der Sensoren siehe Abb. 13. Die gegebene Tröpfchenbewässerung wurde von der Variante AB300 gesteuert und ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

3.1.1.2.2. Karpfenstein – Sandboden

Für den Sandbodenstandort Karpfenstein ist nachfolgend der Verlauf der Bodensaugspannung des Jahres 2012 (s. Abb. 26 und 27) exemplarisch dargestellt. Die Ergebnisse der Jahre 2013 und 2014 sind dem Anhang (Abb. 57 bis 60) zu entnehmen.

Vergleichbar zum Versuchsstandort Attenhofen war die automatische Steuerung über Sensoren auch hier von Schwierigkeiten geprägt. Diese waren vor allem der ungleichmäßige Verlauf einiger theoretisch identisch verbauter Sensoren, ein Nichtabsenken der Wasserspannung einiger Sensoren durch die Bewässerung sowie das Nichtöffnen der Ventile durch die

3. ERGEBNISSE

Steuerungseinheit, welche dann manuell betätigt wurden. Die vollständigen Wassergaben sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Da sich die Werte und die Schwierigkeiten der einzelnen Varianten stark mit den zuvor beschriebenen (3.1.1.2.1.) decken, wird auf eine genaue Beschreibung der einzelnen Varianten verzichtet.

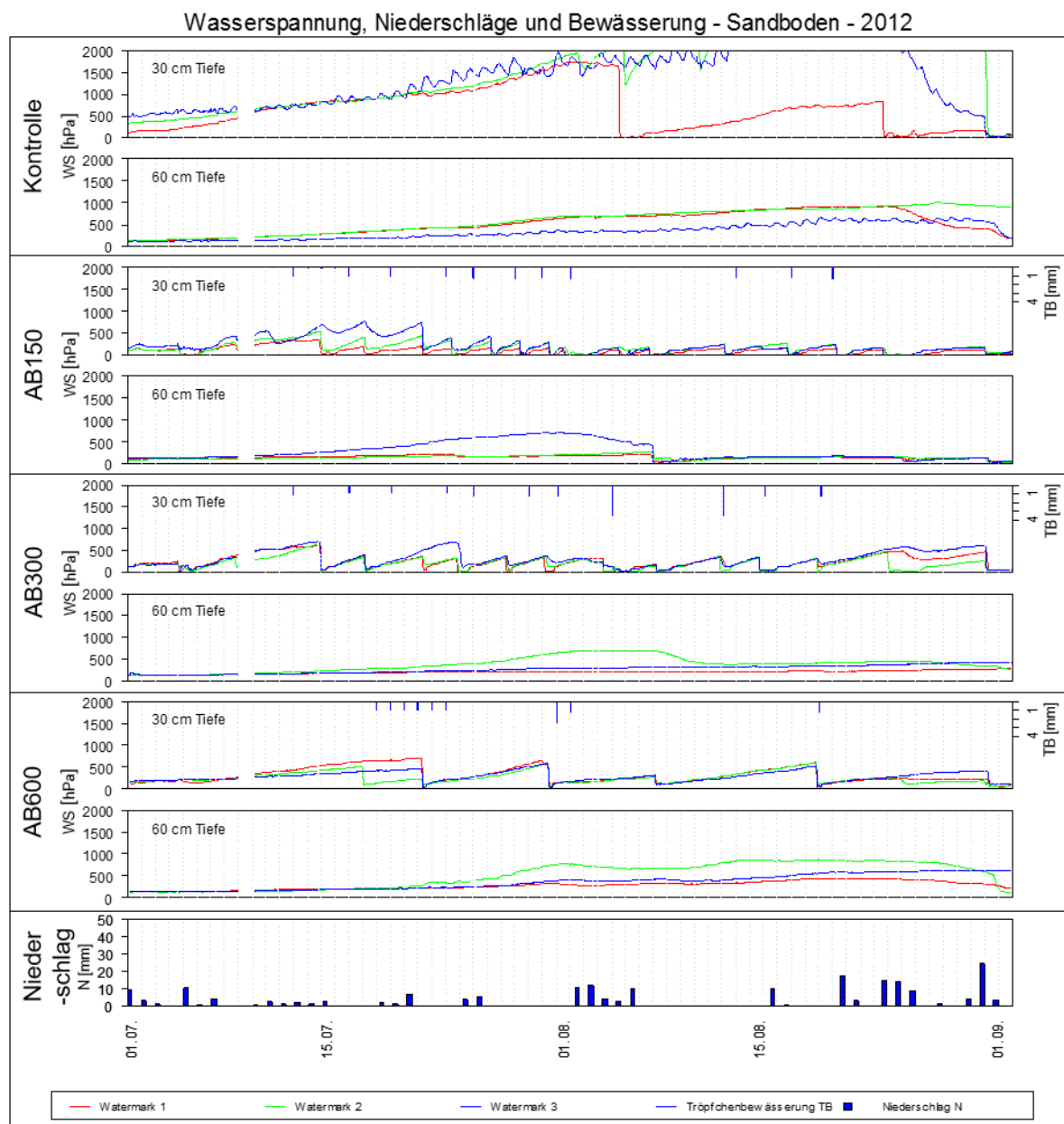


Abbildung 26: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 01.07. - 15.09.2012 in Karpfenstein. In jeder Variante wurden drei Watermarksensoren (rot, grün, blau) in der Mitte von zwei Pflanzen in den Tiefen 30 cm und 60 cm unter einer Tropfstelle eingebaut (vgl. Abb. 13), welche alle zehn Minuten die WS registrierten. Die mittels der Steuerungseinheit ICA60 automatisch verlaufende Tröpfchenbewässerung jeder Variante ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

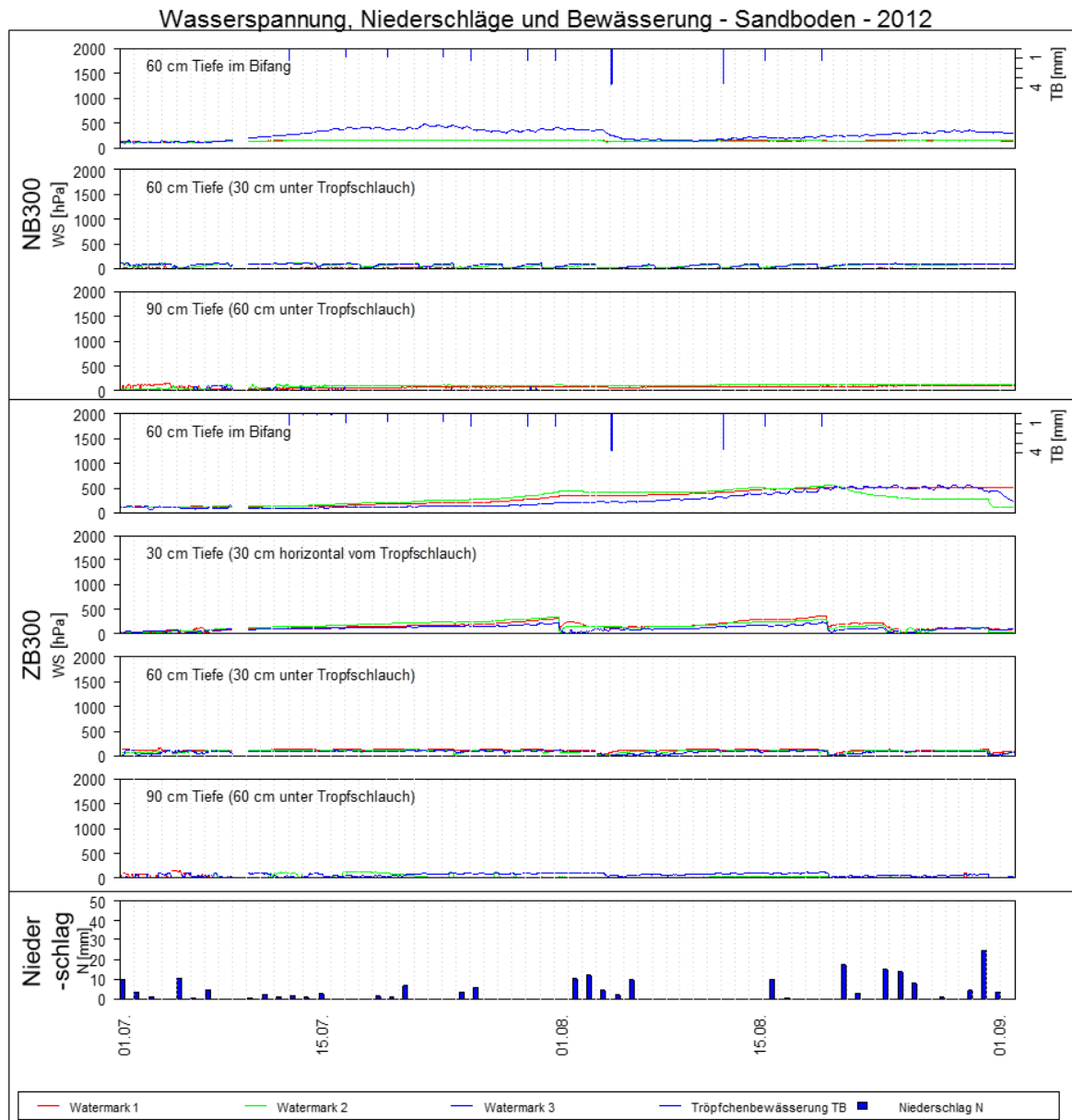


Abbildung 27: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 01.07. - 15.09.2012 in Karpfenstein. Jeder Messwert wurde anhand von drei Sensoren (rot, grün, blau) wiederholt. Für die genaue Anordnung der Sensoren siehe Abb. 13. Die gegebene Tröpfchenbewässerung wurde von der Variante AB300 gesteuert und ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

3.1.1.3. Ausgebrachte Wassermengen

Trotz der in 3.1.1.2. beschriebenen technischen Schwierigkeiten mit der automatischen Steuerung wurden in allen Varianten unterschiedliche Bewässerungsgaben verabreicht. Dabei haben die Varianten AB600, AB300 und AB150 theoretisch aufsteigende Bewässerungsmengen erhalten, während die Varianten NB300 und ZB300 eine ähnliche Menge wie die Variante AB300 erhielten. Nur im Jahr 2012 am Lehmstandort Attenhofen hat die Variante AB300 mit 45,1 mm aufgrund eines nicht schließenden Ventils außerplanmäßig mehr Wasser erhalten als die Variante AB150 mit 34,7 mm.

3. ERGEBNISSE

Im Jahr 2014 wurden die Varianten AB150 an beiden Standorten unabhängig von den Saugspannungen mit über 100 mm bewässert. Die Tabellen 8 und 9 zeigen jeweils die Wassermengen [mm] aller Jahre aufsummiert aus automatisch und händisch verabreichten Gaben und mittels der installierten Wasseruhren kontrollierten Wassermengen für die Standorte Attenhofen und Karpfenstein.

3.1.1.3.1. Attenhofen - Lehm Boden

Tabelle 8: Verabreichte Bewässerungsmengen [mm] der einzelnen Varianten am Versuchsstandort Attenhofen. Die angegebenen Wassermengen beziehen sich sowohl auf die automatisch durch das Steuerungsmodul ausgelösten Bewässerungen als auch auf die von Hand gegebenen Wassermengen.

| Bewässerungsmengen [mm] | | | |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2012 | 2013 | 2014 |
| AB150 | 34,7 | 66,4 | 138,9 |
| AB300 | 45,1 | 59,4 | 35,4 |
| AB600 | 25,2 | 36,1 | 44,0 |
| NB300 | 36,9 | 62,7 | 35,5 |
| ZB300 | 32,7 | 61,2 | 37,7 |

3.1.1.3.2. Karpfenstein – Sandboden

Tabelle 9: Verabreichte Bewässerungsmengen [mm] der einzelnen Varianten am Versuchsstandort Karpfenstein. Die angegebenen Wassermengen beziehen sich sowohl auf die automatisch durch das Steuerungsmodul ausgelösten Bewässerungen als auch auf die von Hand gegebenen Wassermengen.

| Bewässerungsmengen [mm] | | | |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2012 | 2013 | 2014 |
| AB150 | 42,5 | 53,2 | 143,7 |
| AB300 | 28,5 | 36,6 | 16,9 |
| AB600 | 18,0 | 28,9 | 17,6 |
| NB300 | 29,8 | 36,6 | 16,9 |
| ZB300 | 29,1 | 36,6 | 16,9 |

3.1.1.4. Ertrags- und Alphasäureermittlungen

3.1.1.4.1. Attenhofen – Lehm Boden

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Ertrags- und Alphasäureuntersuchungen für die Jahre 2012 bis 2014 am Standort Attenhofen dargestellt (s. Abb. 28). Die mittleren Erträge der einzelnen Behandlungen sind in Form von Balken mit STABW und die Ergebnisse der Alphasäuregehalte als Punkte ebenfalls mit STABW dargestellt. Dabei symbolisieren unterschiedliche Buchstabenkombinationen von Großbuchstaben signifikante Ertragsunterschiede zwischen den Behandlungen und unterschiedliche Kleinbuchstaben die Unterschiede zwischen den Alphasäurewerten bezogen auf das jeweilige Untersuchungsjahr. Die genauen durchschnittlichen Erträge der Versuchsjahre aller Behandlungen inkl. STABW sind den Tabelle 18 bis 20 im Anhang zu entnehmen.

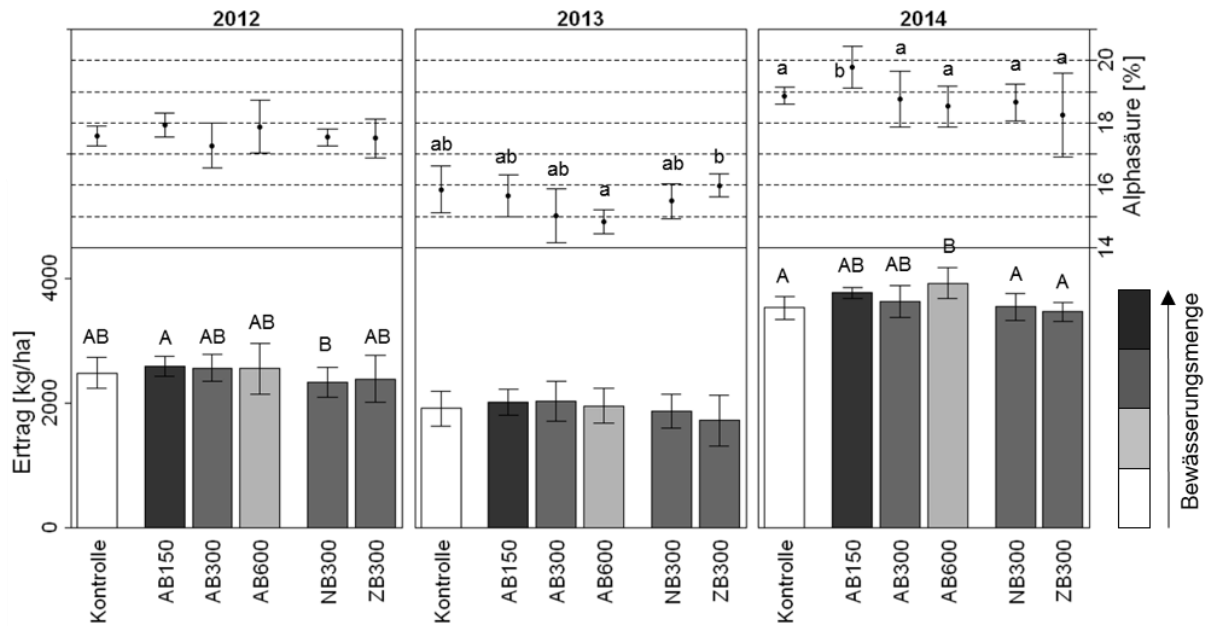


Abbildung 28: Mittlerer Ertrag [kg/ha] und Alphasäuregehalt [%] der einzelnen Behandlungen der Jahre 2012 bis 2014 am Lehm Bodenstandort Attenhofen. Die Erträge sind als Balkendiagramm mit STABW und die Alphasäuregehalte als Punktdiagramm mit STABW eingezeichnet. Statistische Untersuchung auf Unterschiede wurden mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA getestet (2012: $F_{\text{Ertrag}} = 3,3$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,02$, $F_{\text{Alpha}} = 1,2$, $p_{\text{Alpha}} = 0,33$, 2013: $F_{\text{Ertrag}} = 1,2$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,33$, $F_{\text{Alpha}} = 3,2$, $p_{\text{Alpha}} = 0,02$; 2014: $F_{\text{Ertrag}} = 4,2$, $p_{\text{Ertrag}} < 0,01$, $F_{\text{Alpha}} = 3,3$, $p_{\text{Alpha}} = 0,02$). Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede im Ertrag und Kleinbuchstaben hinsichtlich der Alphasäuregehalte nach ermittelten *posthoc*-Test. Die Graufärbung der Balken gibt die theoretische Bewässerungsmenge in Bezug auf die übrigen Varianten an. Die exakten Werte der einzelnen Behandlungen sind Tabelle 8 zu entnehmen.

3.1.1.4.1.1. Erträge

Die Erträge am Standort Attenhofen unterschieden sich im Jahr 2012 signifikant voneinander ($F = 3,3$ und $p = 0,02$). Der SNK-*posthoc*-Test ergab dabei, dass sich die Variante AB150 mit durchschnittlich 2600 kg/ha (± 160 kg/ha) signifikant von der Variante NB300 mit 2330 kg/ha (± 240 kg/ha) unterscheidet.

Im Jahr 2013 kam es zu keinen signifikanten Unterschieden zwischen den Behandlungen ($F = 1,2$ und $p = 0,33$). Im Durchschnitt wurden 1920 kg/ha (± 250 kg/ha) ermittelt.

Für das Jahr 2014 konnten signifikante Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden ($F = 4,2$ und $p < 0,01$). Der SNK-*posthoc*-Test zeigt, dass sich die Variante AB600 mit 3920 kg/ha (± 250 kg/ha) signifikant von den Varianten Kontrolle mit 3530 kg/ha (± 180 kg/ha), NB300 mit 3550 kg/ha (± 220 kg/ha) und der Variante ZB300 mit 3470 kg/ha (± 160 kg/ha) unterscheidet.

3.1.1.4.1.2. Alphasäuregehalt

Für die Alphasäuregehalte der verschiedenen Behandlungen ergaben sich im Jahr 2012 keine signifikanten Unterschiede für den Standort Attenhofen ($F = 1,2$ und $p = 0,33$). Die Werte lagen dabei in allen Behandlungen zwischen 17 und 18 %.

3. ERGEBNISSE

Im Jahr 2013 unterschieden sich die Behandlungen hinsichtlich der Alphasäure signifikant voneinander ($F = 3,2$ und $p = 0,02$). Der anschließende SNK-*posthoc*-Test zeigt dabei, dass sich die Variante AB600 mit 14,8 % ($\pm 0,4$ %) signifikant von der Variante ZB300 mit 16,0 % ($\pm 0,4$ %) unterschied, während die übrigen Varianten zwischen diesen Werten lagen.

Auch im Jahr 2014 konnten signifikante Unterschiede im Alphasäuregehalt festgestellt werden ($F = 3,3$ und $p = 0,02$). Der SNK-*posthoc*-Test zeigte, dass sich hier die stark bewässerte Variante AB150 mit 19,8 % ($\pm 0,7$ %) von allen übrigen Varianten abhob. Der niedrigste Wert mit 18,3 % ($\pm 1,3$ %) wurde in der Variante ZB300 ermittelt.

3.1.1.4.2. Karpfenstein – Sandboden

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse des Sandbodenstandorts Karpfenstein der Jahre 2012 bis 2014 hinsichtlich Erträge und Alphasäuregehalte. Dabei sind die mittleren Erträge als Balken und die dazugehörigen Alphasäuregehalte als Punkte jeweils mit Standardabweichung dargestellt. Die genauen mittleren Ertragswerte aller Behandlungen und Jahre mit Standardabweichungen sind den Tabellen 18 bis 20 im Anhang zu entnehmen.

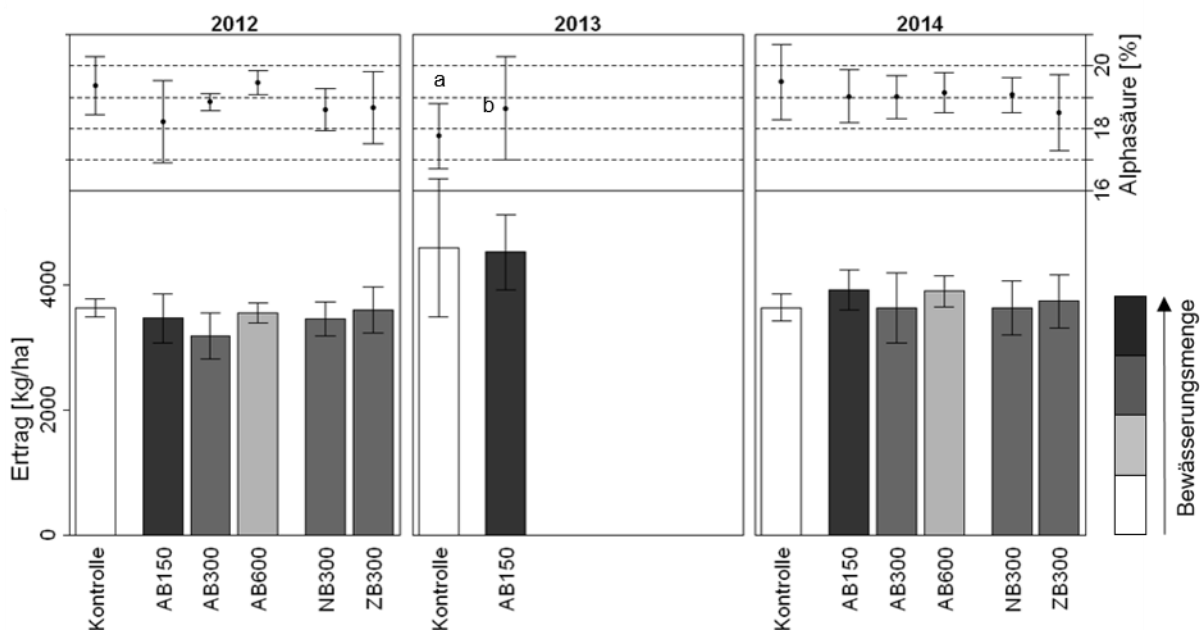


Abbildung 29: Mittlerer Ertrag [kg/ha] und Alphasäuregehalt [%] der einzelnen Behandlungen der Jahre 2012 bis 2014 am Sandbodenstandort Karpfenstein. Die Erträge sind als Balkendiagramm mit STABW und die Alphasäuregehalte als Punktdiagramm mit STABW eingezeichnet. Statistische Unterschiede wurden mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA und im Jahr 2013 mittels eines studentischen t-Tests und im Falle der Alphasäure aufgrund nicht normalverteilter Daten mittels eines Mann-Whitney-U-Tests getestet. Für die Untersuchung der Alphasäuregehalte im Jahr 2014 wurde ein Kruskal-Wallis-Test verwendet (2012: $F_{\text{Ertrag}} = 1,8$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,14$, $F_{\text{Alpha}} = 1,7$, $p_{\text{Alpha}} = 0,16$, 2013: t-test $p_{\text{Ertrag}} = 0,87$, Mann-Whitney U-Test $p_{\text{Alpha}} = 0,03$; 2014: $F_{\text{Ertrag}} = 1,3$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,30$, Kruskal-Wallis, $\text{Chi}^2 = 3,1$, $p_{\text{Alpha}} = 0,69$). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede hinsichtlich der Alphasäuregehalte. Die Graufärbung der Balken gibt die theoretische Bewässerungsmenge in Bezug auf die übrigen Varianten an. Die exakten Werte der einzelnen Behandlungen sind dem Anhang zu entnehmen. Für die exakten Bewässerungsmengen s. Tabelle 9.

3.1.1.4.2.1. Erträge

Die Erträge unterschieden sich zwischen den Behandlungen im Jahr 2012 nicht signifikant voneinander ($F = 1,8$ und $p = 0,14$). Dabei lagen die Erträge in diesem Jahr im Durchschnitt bei 3480 kg/ha.

Im Jahr 2013 wurden aufgrund eines Hagelschadens lediglich Einzelreben der Varianten AB150 und der Kontrolle geerntet und verglichen. Hierbei zeigten sich für den Ertrag, mit 4520 kg/ha (± 600 kg/ha) in der stark bewässerten Variante AB150 und 4600 kg/ha (± 1100 kg/ha) in der unbewässerten Kontrolle, keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,87$).

Auch im Jahr 2014 konnten die mittleren Erträge zwischen den Varianten nicht als statistisch verschieden angesehen werden ($F = 1,3$ und $p = 0,30$). Diese lagen zwischen 3920 kg/ha (± 320 kg/ha) in der Variante AB150 und 3630 kg/ha (± 560 kg/ha) in der Variante AB300.

3.1.1.4.2.2. Alphasäuregehalt

Für den Standort Karpfenstein konnten hinsichtlich der Alphasäuregehalte 2012 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden ($F = 1,7$ und $p = 0,16$). Die Werte lagen in diesem Jahr zwischen 19,4 % ($\pm 0,9$ %) in der Kontrolle und 18,2 % ($\pm 1,3$ %) in der Variante AB150.

Im Jahr 2013 unterschied sich die Alphasäure mit 18,7 % ($\pm 1,7$ %) in der Behandlung AB150 und 17,7 % ($\pm 1,0$ %) in der unbewässerten Kontrolle signifikant voneinander, was aufgrund von nichtnormalverteilter Daten mittels eines Mann-Whitney U-Tests untersucht wurde ($p = 0,03$).

2014 unterschied sich der Gehalt an Alphasäure zwischen den einzelnen Varianten nicht. Die Unterschiede wurden aufgrund nicht normalverteilter Daten innerhalb der Gruppen, was nicht mittels einer Transformation der Daten beseitigt werden konnte, mittels eines Kruskal-Wallis-Tests getestet ($\text{Chi}^2 = 3,1$ und $p = 0,69$). Dabei lagen die Werte zwischen 18,5 % ($\pm 1,2$ %) in der Variante ZB300 und 19,5 % ($\pm 1,2$ %) in der Kontrolle.

3. ERGEBNISSE

3.1.2. Bewässerung unter Berücksichtigung einer klimatischen Wasserbilanz

3.1.2.1. Klimatische Situation

Das Jahr 2015 war mit 626,6 mm im Gesamten und 269 mm Niederschlag während der Wachstumsperiode (01. Mai bis 15. September) das trockenste Versuchsjahr während des gesamten Projektes. Durch eine Verteilung mit 91,8 mm im Mai, 69,8 mm im Juni, 22,2 mm im Juli und 63,4 mm im August war zudem die Verteilung während der Wachstumsperiode gepaart mit sehr heißen Temperaturen über 30 °C sehr ungünstig für den Hopfenanbau. Vom 01. bis zum 15. September wurden noch 22,4 mm an der nahegelegenen Wetterstation Sandharlanden gemessen. Die Wetterstation vor Ort wurde Anfang September abgebaut.

3.1.2.2. Ausgebrachte Wassermengen

Die Varianten AB_intensiv, NB_intensiv und ZB_intensiv wurden vom 02. bis 21. Juli täglich drei und ab dem 22. Juli bis 04. September täglich sechs Stunden bewässert, sodass im Laufe der Saison insgesamt 212,6 mm in allen Varianten ausgebracht wurden. Dies waren somit die höchsten verabreichten Wassermengen im Rahmen der Untersuchung.

3.1.2.3. Verlauf des pflanzenverfügbaren Wassers

In Abbildung 30 ist der Verlauf des pflanzenverfügbaren Wassers [%] für die intensiv bewässerten Varianten (AB_intensiv, NB_intensiv und ZB_intensiv) und für die unbewässerte Kontrolle dargestellt. Man erkennt, dass das Wachstum der Pflanzen bis annähernd Ende Juni von starken Niederschlägen geprägt war, sodass es in diesem Zeitraum zu keinen starken Austrocknungen kam. Erst ab dem 28. Juni fielen beide Kurven steil ab. Dabei wurde der Abfall der bewässerten Varianten mit Einsetzen der Bewässerung ab dem 02. Juli etwas geschwächt. Am 08. Juli war die unbewässerte Variante bei knapp über 50 % des pflanzenverfügbaren Wassers, während die bewässerten Varianten noch bei 60 % standen. Ein darauffolgendes Niederschlagsereignis ließ beide Varianten dann wieder leicht ansteigen. Ab dann fiel der Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser im Wurzelraum der unbewässerten Pflanzen rechnerisch immer tiefer und erreicht am 29. Juli annähernd mit 0,9 % das Minimum an Wasser, das bis 13. August nicht mehr anstieg, da keine Niederschläge das Wasserreservoir auffüllten. In dieser Zeit waren die unbewässerten Pflanzen nach diesem Modell ohne Wasser. Niederschläge in der Mitte des Monats August ließen dies wieder leicht auf rechnerisch knapp über 10 % ansteigen. Durch die Verdunstung erreichte die Kurve aber schon am 23. August wieder 0 %. Erst ein starkes Niederschlagsereignis am 24. August füllte das Reservoir wieder auf. Allerdings wurden bis zur Ernte Mitte September keine Werte mehr über 25 % erreicht.

Die bewässerten Varianten fielen aufgrund der intensiven Bewässerung im Laufe der Saison auf minimal knapp unter 50 % des pflanzenverfügbaren Wassers. Mit den Niederschlägen Mitte und Ende August konnte dies sogar wieder bis auf 100 % aufgefüllt werden und erreichte zur Ernte Werte von ca. 90 %.

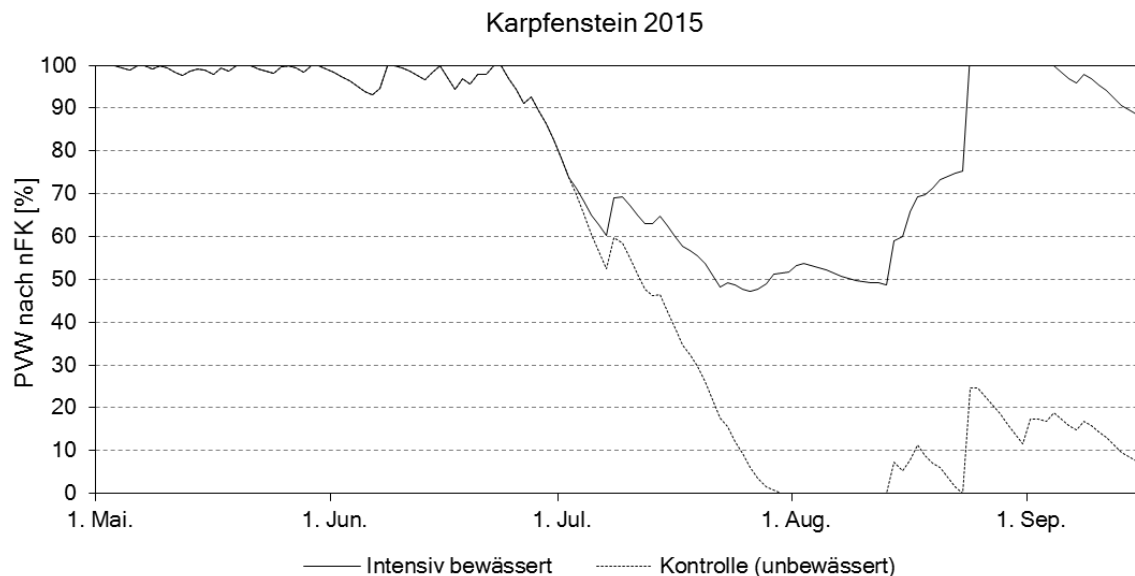


Abbildung 30: Pflanzenverfügbares Wasser PVW [%] der intensiv bewässerten Varianten (AB, NB und ZB) sowie der unbewässerten Kontrolle in der Wachstumsperiode 01.Mai bis 15. September 2015 in Karpfenstein. Der Verlauf des PVW basiert auf den Verdunstungswerten nach der FAO bei einer nutzbaren Feldkapazität von 13,5 Vol.-% und einer Wurzeltiefe von 1 m. Berücksichtigt im Verlauf sind die gemessenen Niederschläge sowie bei den bewässerten Varianten die verabreichte Bewässerung.

3.1.2.4. Ertrags- und Alphasäureermittlungen

Abbildung 31 stellt die ermittelten mittleren Erträge und die mittleren Alphasäuregehalte des Bewässerungsversuchs 2015 dar. Unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen dabei signifikante Unterschiede zwischen den Erträgen der Behandlungen, während Kleinbuchstaben die Unterschiede der Alphasäure symbolisieren.

3.1.2.4.1. Erträge

Die Erträge der Behandlungen unterschieden sich signifikant zwischen den bewässerten Varianten und der unbewässerten Kontrolle, getestet mittels ANOVA ($F = 22,2$, $p < 0,001$) mit anschließendem SNK-*posthoc*-Test. Die Kontrolle wies dabei einen mittleren Ertrag von 2190 kg/ha (± 220 kg/ha) auf. In den Varianten AB_intensiv, NB_intensiv und ZB_intensiv wurden jeweils 3380 kg/ha (± 220 kg/ha), 3330 kg/ha (± 470 kg/ha) und 3060 kg/ha (± 300 kg/ha) mittlerer Ertrag gemessen.

3. ERGEBNISSE

3.1.2.4.2. Alphasäure

Auch hinsichtlich der Gehalte an Alphasäure unterschieden sich alle bewässerten Varianten signifikant mit 14,3 % ($\pm 1,1$ %) in der unbewässerten Kontrolle, 16,9 % ($\pm 0,5$ %) in der Variante AB_intensiv, 16,7 % ($\pm 1,1$ %) in der Variante NB_intensiv und 16,1 % ($\pm 1,1$ %) in der Variante ZB_intensiv, getestet mittels mehrfaktorieller ANOVA ($F = 9,6$, $p < 0,001$) und anschließendem SNK-*posthoc*-Test.

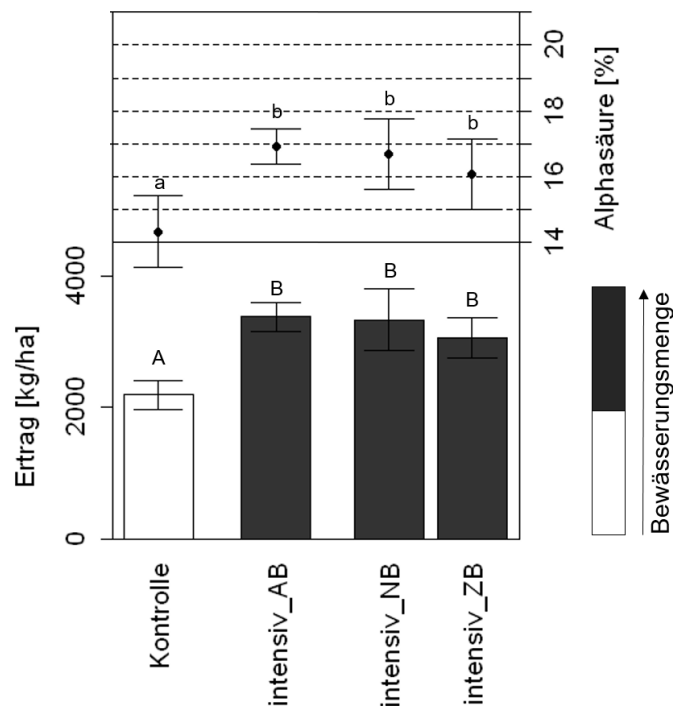


Abbildung 31: Mittlerer Ertrag [kg/ha] und Alphasäuregehalt [%] der intensiv bewässerten und unbewässerten Varianten am Sandbodenstandort Karpfenstein im Jahr 2015. Die Erträge sind als Balkendiagramm mit STABW und die Alphasäuregehalte als Punktdiagramm mit STABW eingezeichnet. Statistische Unterschiede wurden mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA getestet ($F_{\text{Ertrag}} = 22,2$, $p_{\text{Ertrag}} < 0,001$, $F_{\text{Alpha}} = 9,6$, $p_{\text{Alpha}} < 0,001$). Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede im Ertrag und Kleinbuchstaben hinsichtlich der Alphasäuregehalte nach ermitteltem *posthoc*-Test. Die Graufärbung der Balken gibt die theoretische Bewässerungsmenge in Bezug auf die anderen Varianten an.

3.1.3. Bewässerungsversuche mit induzierter Trockenheit

3.1.3.1. Klimatische Situation

3.1.3.1.1. 2012

In der Nähe beider Versuche an der Wetterstation „Hirnkirchen“ des Hopfenring e.V. wurden im gesamten Jahr 2012 775,5 mm Niederschläge registriert. Dabei fielen im Versuchszeitraum Mai bis einschließlich Juli insgesamt 260,4 mm. Anfang August wurden die Versuchsreihen der Sorte Perle mit Folien abgedeckt. Die Sorte Herkules erhielt bis zum Abdecken der Flächen am 13. August noch 31,3 mm an Niederschlägen.

3.1.3.1.2. 2013

Im Jahr 2013 fielen am Standort Hirnkirchen insgesamt 797,0 mm an Niederschlägen. Bis zum Abdecken der Versuchsparzelle der Sorte Perle am 01. August konnten 334,2 mm gemessen werden. Bis zum Abdecken der Parzellen der Sorte Herkules am 07. August wurden noch weitere 3,7 mm gemessen, sodass dort bis zur Ernte 337,9 mm an Niederschlag fielen.

3.1.3.2. Ausgebrachte Wassermengen

3.1.3.2.1. Sorte Herkules

Die Variante „28“ erhielt im Jahr 2012 insgesamt 8,3 mm, die Variante „21“ 17,3 mm, die Variante „14“ 25,1 mm und die Variante „Kontrolle“ 39,0 mm an Beregnung.

Im Jahr 2013 wurde die Variante „28“ insgesamt mit 20 mm, die Variante „21“ mit 36 mm, die Variante „14“ mit 51,5 mm und die Variante Kontrolle insgesamt mit 83,0 mm bewässert.

3.1.3.2.2. Sorte Perle

2012 erhielten die Variante „28“ in der Sorte Perle 5,4 mm, die Variante „21“ 10,6 mm, die Variante „14“ 19,0 mm und die Variante „Kontrolle“ insgesamt 35,2 mm an Bewässerung. Im Jahr 2013 wurden in der Variante „28“ 16,0 mm, in der Variante „21“ 32,0 mm, in der Variante „14“ 47,5 mm und in der Kontrolle 79,0 mm ausgebracht.

3.1.3.3. Ertrags- und Alphasäureermittlungen

3.1.3.3.1. Sorte Herkules

In Abbildung 32 sind die mittleren Erträge der Varianten „28“, „21“, „14“ und Kontrolle mit STABW für die Jahre 2012 und 2013 als Balkendiagramm dargestellt. Die Alphasäuregehalte sind als Punktdiagramm ebenfalls mit STABW eingefügt. Die unterschiedliche Graufärbung der Balken steht für die kumulierte Beregnungsmenge der Varianten. Die genauen Werte der Erträge und der Alphasäure sind Tabelle 21 im Anhang zu entnehmen.

3. ERGEBNISSE

3.1.3.3.1.1. Ertrag

In den untersuchten Flächen der Sorte Herkules wurden im Jahr 2012 keine signifikanten Ertragsunterschiede zwischen den Varianten festgestellt ($F = 0,01$ und $p = 0,99$). Dabei wurden in allen Varianten etwa 3500 kg/ha pro Variante festgestellt (s. Abb. 32).

Wie dargestellt hatte die Variante Kontrolle im Jahr 2013 mit 4120 kg/ha (± 260 kg/ha) zwar tendenziell den höchsten Ertrag, doch konnte diese Tendenz nicht statistisch abgesichert werden ($F = 1,2$ und $p = 0,35$), sodass sich die Varianten statistisch gleichen.

3.1.3.3.1.2. Alphasäure

Hinsichtlich des Gehalts an Alphasäure konnten im Jahr 2012 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen mit Werten zwischen 17 und 18 % festgestellt werden ($F = 0,68$ und $p = 0,59$).

Im Jahr 2013 lagen die mittleren Alphasäuregehalte der unterschiedlichen Behandlungen zwischen 16,7 und 18,3 % (s. Abb. 32). Die Unterschiede konnten allerdings ebenfalls nicht statistisch abgesichert werden ($F = 1,7$ und $p = 0,24$).

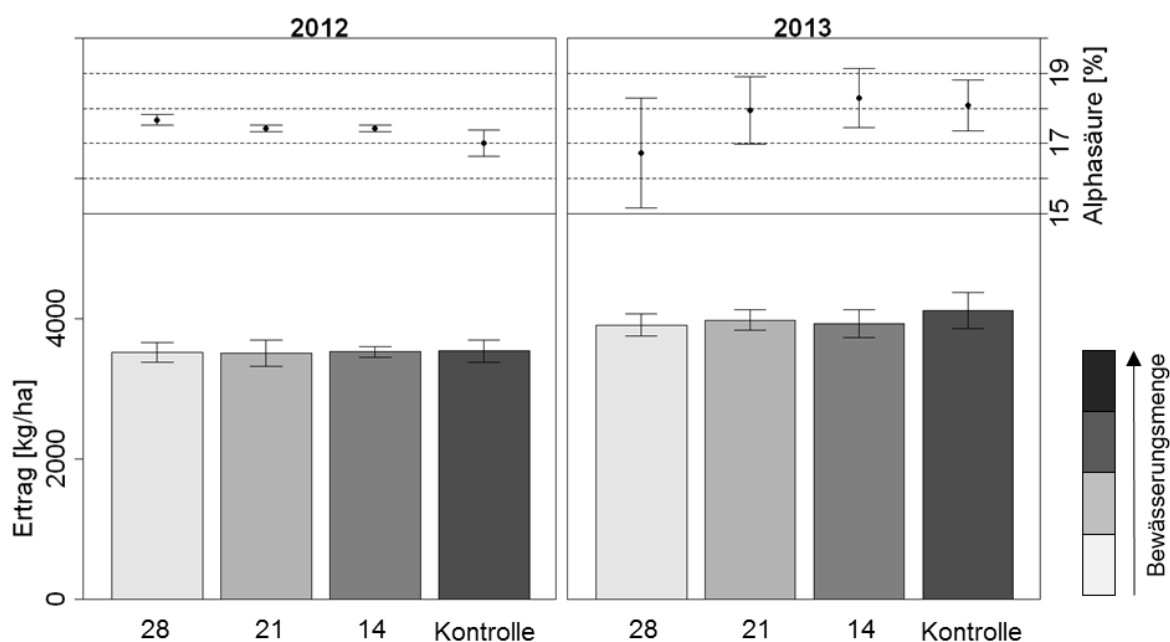


Abbildung 32: Mittlerer Ertrag [kg/ha] und Alphasäuregehalt [%] der einzelnen Behandlungen in den Jahren 2012 und 2013 an der Sorte Herkules. Die Erträge sind als Balkendiagramm und die Alphasäuregehalte als Punktdiagramm jeweils mit STABW eingezeichnet. Statistische Untersuchungen auf Unterschiede wurden mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA getestet (2012: $F_{\text{Ertrag}} = 0,01$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,99$, $F_{\text{Alpha}} = 0,68$, $p_{\text{Alpha}} = 0,59$, 2013: $F_{\text{Ertrag}} = 1,2$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,35$, $F_{\text{Alpha}} = 1,7$, $p_{\text{Alpha}} = 0,24$). Die Graufärbung der Balken gibt die Bewässerungsmenge in Bezug auf die anderen Varianten an. Die exakten Werte der einzelnen Behandlungen sowie die verabreichten Bewässerungsmengen der einzelnen Varianten sind dem Anhang (Tab. 21) zu entnehmen. Die Ergebnisse von 2012 sind nach Stampfl (2013).

3.1.3.3.2. *Sorte Perle*

Die mittleren Erträge und die mittleren Alphasäuregehalte der Sorte Perle der Jahre 2012 und 2013 der vier Behandlungen sind jeweils mit STABW in Abbildung 33 dargestellt. Dabei sind die Erträge als Balken- und die Alphasäuregehalte als Punktdiagramm abgebildet. Die genauen Werte sind in der Tabelle 22 im Anhang aufgelistet.

3.1.3.3.2.1. *Ertrag*

Hinsichtlich des Ertrages konnten im Jahr 2012 keine statistisch abgesicherten Unterschiede zwischen den Behandlungen festgestellt werden (getestet mittels Kruskal-Wallis-Test mit $\text{Chi}^2 = 6,0$ und $p = 0,11$).

Allerdings sind tendenzielle Mehrerträge in Abhängigkeit der Bewässerungsmengen feststellbar. Dabei liegen die Werte für den Ertrag zwischen 2290 kg/ha (± 170 kg/ha) bei der Variante „28“ und 2550 kg/ha (± 80 kg/ha) bei der Kontrolle.

Im Jahr 2013 waren die Ertragswerte mit Werten zwischen minimal 1740 kg/ha (± 160 kg/ha) bei der Kontrolle und maximal 2130 kg/ha (± 330 kg/ha) bei der Variante „21“ niedriger. Eine Abhängigkeit von der Bewässerungsmenge, bedingt durch die unterschiedlichen Trockenstressbehandlungen, war allerdings nicht ersichtlich. Auch konnten keine statistischen Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden ($F = 2,0$ und $p = 0,17$).

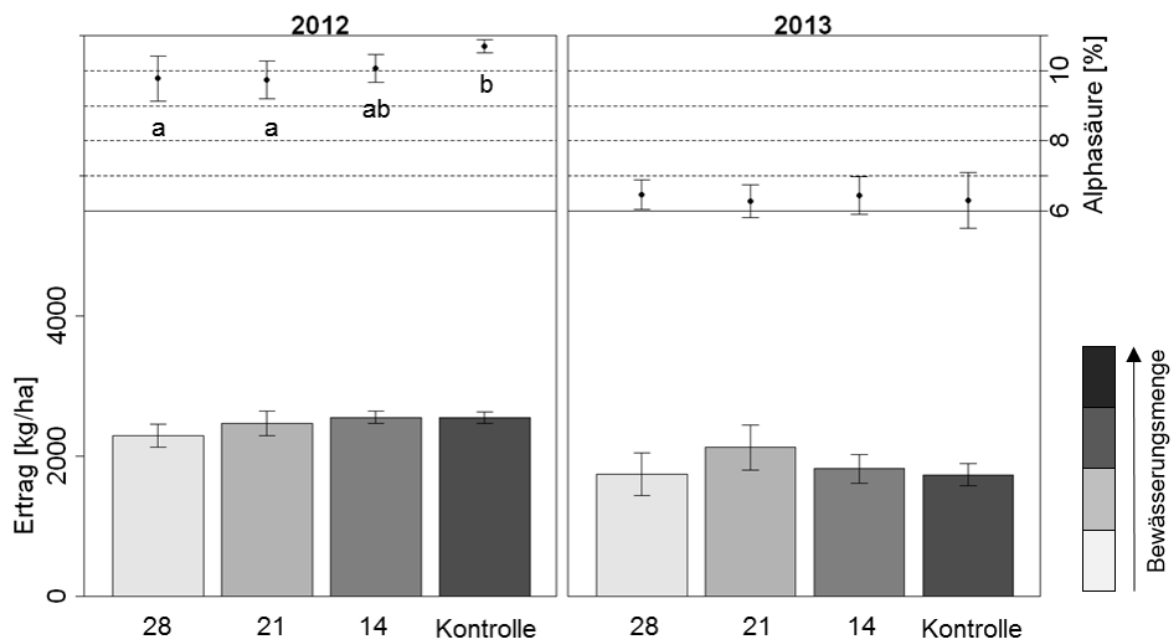


Abbildung 33: Mittlerer Ertrag [kg/ha] und Alphasäuregehalt [%] der einzelnen Behandlungen in den Jahren 2012 und 2013 an der Sorte Perle. Die Erträge sind als Balkendiagramm und die Alphasäuregehalte als Punktdiagramm jeweils mit STABW eingezeichnet. Statistische Untersuchungen auf Unterschiede wurden 2012 beim Ertrag mittels einem Kruskal-Wallis-Test durchgeführt und in den weiteren Fällen mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA getestet (2012: $\text{Chi}^2_{\text{Ertrag}} = 6,0$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,11$, $F_{\text{Alpha}} = 3,7$, $p_{\text{Alpha}} < 0,05$, 2013: $F_{\text{Ertrag}} = 2,0$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,17$, $F_{\text{Alpha}} = 0,3$, $p_{\text{Alpha}} = 0,90$). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede hinsichtlich der Alphasäuregehalte nach durchgeführtem *posthoc*-Test. Die Graufärbung der Balken gibt die Bewässerungsmenge in Bezug auf die anderen Varianten an. Die exakten Werte der einzelnen Behandlungen sind dem Anhang (Tab. 22) zu entnehmen. Die Ergebnisse von 2012 sind nach Stampfl (2013).

3. ERGEBNISSE

3.1.3.3.2.2. *Alphasäure*

Die mittleren Alphasäuregehalte der Sorte Perle lagen im Jahr 2012 in der Variante „28“ bei 9,8 % ($\pm 0,6$ %), in der Variante „21“ bei 9,7 % ($\pm 0,5$ %), in der Variante „14“ bei 10,1 % ($\pm 0,4$ %) und in der Kontrolle bei 10,7 % ($\pm 0,2$ %). Die statistische Untersuchung mittels ANOVA ($F = 3,7$ und $p < 0,05$) und SNK-*posthoc*-Test deckte hierbei signifikante Unterschiede zwischen den Varianten „28“ und „21“ auf, welche im Vergleich zur Kontrolle niedriger waren. Im Jahr 2013 lagen die mittleren Werte der Alphasäure aller Behandlungen zwischen 6 % und 7 %. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ($F = 0,3$ und $p = 0,90$).

3.1.4. Bewässerung mit unterschiedlicher Applikation gleicher Wassermengen

3.1.4.1. Klimatische Situation

Das Jahr 2014 war mit 781,9 mm Niederschlag relativ regenreich, aber lag etwas unter dem 10-jährigen Mittel. Dabei fielen im Monat Mai 129,8 mm und im Monat Juni nur 48,8 mm. Die Monate Juli mit 162,7 mm und August mit 109,7 mm sorgten für ausreichend Niederschläge in der Hauptwachstumsphase. Bis zur Ernte Mitte September fielen noch 16 mm an Niederschlägen, sodass innerhalb der Vegetationsperiode 467 mm gemessen wurden.

Das Jahr 2015 war hingegen mit insgesamt 663,5 mm ein trockenes Jahr. Vor allem in der Vegetationszeit von Hopfen fielen von Anfang Mai bis Mitte September insgesamt nur 324,7 mm. Zudem war die Verteilung mit 113,7 mm im Mai und 112,9 mm im Juni mehr auf den Beginn der Vegetationsperiode konzentriert. Mit 27,6 mm im Juli und 43,3 mm im August waren die Sommermonate sehr trocken und mit Maximaltemperaturen von 36,6 °C im Juli und 37,1 °C im August ungewöhnlich heiß.

3.1.4.2. Ausgebrachte Wassermengen

Im Versuchsjahr 2014 wurden in allen Varianten AB3, AB12, NB3 und NB12 112,6 mm Bewässerungswasser verabreicht. Im Jahr 2015 wurde dieser Wert mit 146,3 mm noch gesteigert. Die applizierte Wassermenge war in allen Varianten gleich.

3.1.4.3. Ertrags- und Alphasäureermittlungen

Abbildung 34 zeigt die mittleren Erträge [kg/ha] der einzelnen Varianten für die Jahre 2014 und 2015 als Balkendiagramm inklusive STABW. Des Weiteren sind die mittleren Gehalte an Alphasäure in % als Punktdiagramm eingefügt. Für die exakten Werte s. Anhang Tabelle 23.

3.1.4.3.1. *Erträge*

In der unbewässerten Kontrolle wurden 2014 durchschnittlich 3970 kg/ha (\pm 430 kg/ha) verzeichnet. Die Variante AB3 kam auf durchschnittlich 4160 kg/ha (\pm 310 kg/ha), während in der Variante NB3 4050 kg/ha (\pm 90 kg/ha) ermittelt wurden. In den Varianten AB12 und NB12, wo die Wassergaben alle vier Tage verabreicht wurden, wurden 4190 kg/ha (\pm 320 kg/ha) und 4160 kg/ha (\pm 470 kg/ha) geerntet. Eine mehrfaktorielle ANOVA ergab hierbei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten ($F = 0,25$ und $p = 0,91$).

Im Jahr 2015 wurden in allen Varianten insgesamt durchschnittlich weniger Erträge erzielt. So kam es in der unbewässerten Kontrolle zu durchschnittlich 3190 kg/ha (\pm 300 kg/ha). In den Varianten AB3 und NB3 wurden jeweils 3320 kg/ha (\pm 410 kg/ha) und 3300 kg/ha (\pm 70 kg/ha) gemessen. In den Varianten AB12 und NB12 waren es durchschnittlich jeweils 3370 kg/ha (\pm 250 kg/ha) und 3170 kg/ha (\pm 310 kg/ha). Die statistische Untersuchung mittels ANOVA ergab auch hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten ($F = 0,37$ und $p = 0,83$).

3.1.4.3.2. *Alphasäure*

Im Jahr 2014 wurden mittlere Alphasäuregehalte zwischen 17 % und 19 % erzielt (s. Abb. 34). So wurden in der unbewässerten Kontrolle durchschnittlich 18,5 % (\pm 0,6 %) und bei den bewässerten Varianten in den täglich bewässerten Varianten AB3 und NB3 jeweils durchschnittlich 18,9 % (\pm 0,6 %) und 17,7 % (\pm 0,7 %) festgestellt. In den Varianten AB12 und NB12 waren es jeweils 19,0 % (\pm 0,7 %) und 18,9 % (\pm 0,9 %). Eine statistische Untersuchung ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen ($F = 2,6$ und $p = 0,09$).

Für das Jahr 2015 wurden durchschnittlich in allen Varianten sehr ähnliche Werte für die Alphasäure gemessen. So kamen in der unbewässerten Kontrolle durchschnittlich 17,0 % (\pm 0,5 %) vor. In den täglich bewässerten Varianten AB3 und NB3 wurden je 16,9 % (\pm 0,4 %) und 17,2 % (\pm 0,2 %) registriert. Untersuchungen in den Varianten AB12 und NB12 ergaben durchschnittlich 17,0 % (\pm 0,2 %) und 16,8 % (\pm 0,6 %). Die Untersuchung mittels mehrfaktorieller ANOVA ergab keine statistischen Unterschiede zwischen den Behandlungen ($F = 0,59$ und $p = 0,68$).

3. ERGEBNISSE

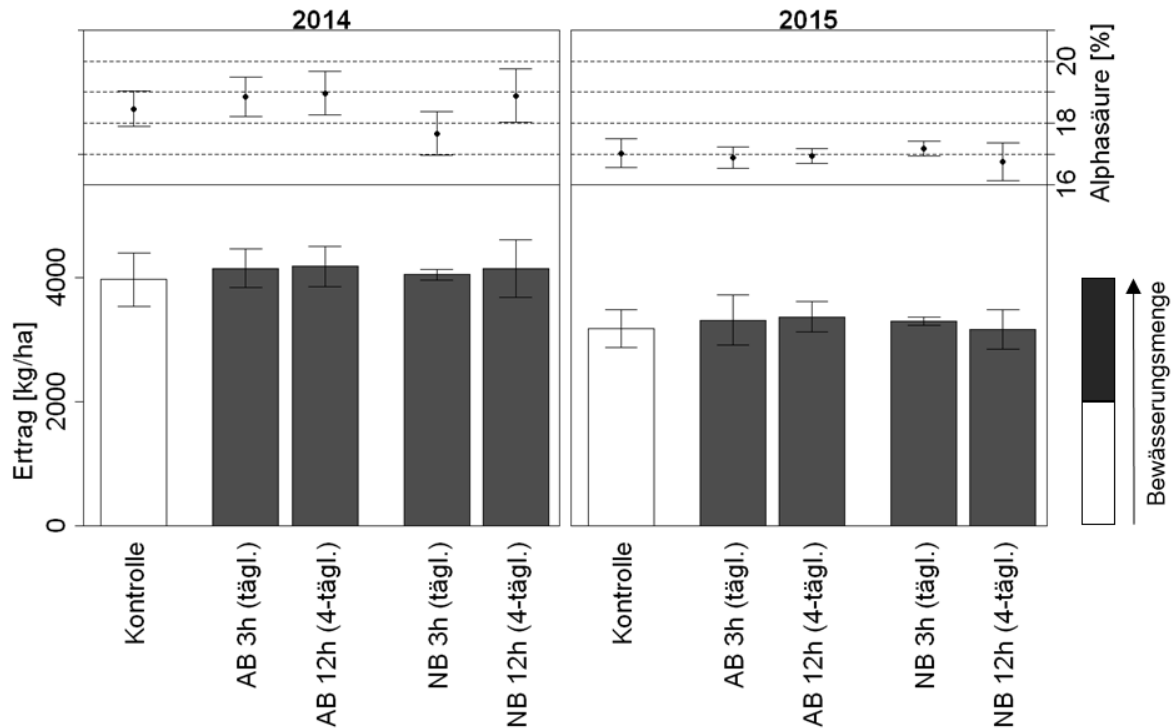


Abbildung 34: Mittlerer Ertrag [kg/ha] und Alphasäuregehalt [%] der einzelnen Behandlungen im Versuch unterschiedliche Applikation gleicher Wassermengen an der Sorte Herkules in den Jahren 2014 und 2015. Die Erträge sind als Balkendiagramm und die Alphasäuregehalte als Punktdiagramm jeweils mit STABW eingezeichnet. Statistische Untersuchungen auf Unterschiede wurden mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA getestet und ergaben in allen Fällen keine signifikanten Unterschiede (2014: $F_{\text{Ertrag}} = 0,25$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,91$, $F_{\text{Alpha}} = 2,6$, $p_{\text{Alpha}} = 0,09$, 2015: $F_{\text{Ertrag}} = 0,37$, $p_{\text{Ertrag}} = 0,83$, $F_{\text{Alpha}} = 0,59$, $p_{\text{Alpha}} = 0,68$). Die Graufärbung der Balken gibt die Bewässerungsmenge in Bezug auf die Kontrolle an. Die exakten Werte der einzelnen Behandlungen sind dem Anhang (Tab. 23) zu entnehmen.

3.2. PHYSIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AN HOPFEN

3.2.1. Lichtkurven

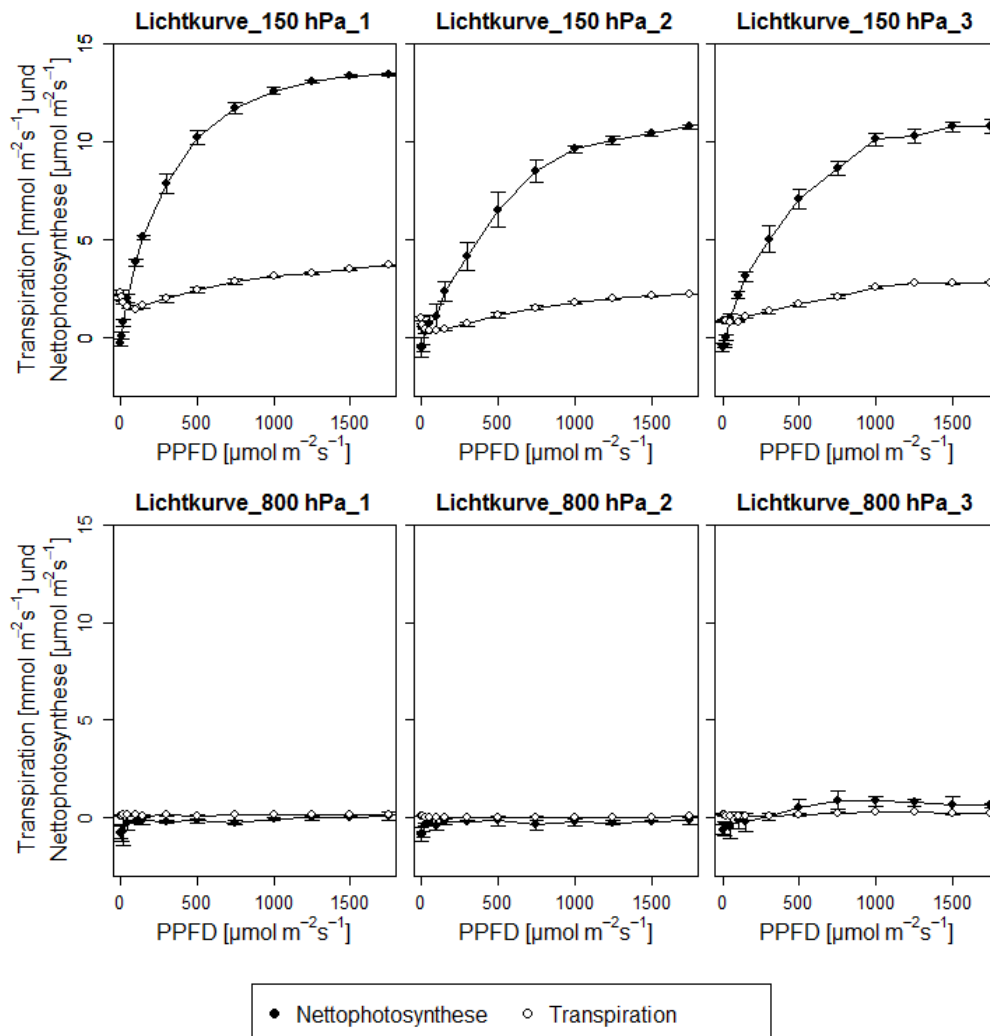


Abbildung 35: Lichtkurven an Jungpflanzen von *Humulus lupulus* cv. Herkules im Gewächshaus. An jeweils drei bewässerten, mit einer im Topf gemessenen Saugspannung (15 cm Tiefe) von ca. 150 hPa und an drei unbewässerten Pflanzen mit einer gemessenen Saugspannung von ca. 800 hPa wurde mittels der Gaswechsellanlage ADC LC Pro die Lichtstärke (PPFD) mit den Schritten 0, 10, 20, 50, 100, 150, 300, 500, 750, 1000, 1250, 1500 und 1750 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erhöht und dabei die Nettophotosyntheseleistung und die Transpiration gemessen. Dabei wurde nach einer Vorlaufzeit von zwei Minuten jede Lichtstärke 5 Minuten gemessen und jede Minute geloggt. Aus den 5 Messwerten wurde ein Mittelwert mit Standardabweichung gebildet.

In Abbildung 35 sind die Ergebnisse der Lichtkurven an *Humulus lupulus* cv. Herkules im Gewächshaus dargestellt. Dabei stellen die oberen drei Graphen die Ergebnisse der gut gewässerten Pflanzen mit einer Saugspannung von 150 hPa dar, während die untere Reihe die Ergebnisse der trockengestressten Pflanzen mit Werte über 800 hPa darstellen. Man erkennt, dass sich die Ergebnisse der bewässerten und trockengestressten Pflanzen stark unterscheiden und die Pflanzen sehr sensitiv auf die Trockenheit reagieren.

Während die bewässerten Pflanzen mit steigender Eingangslichtstärke ebenfalls in der Nettophotosynthese und der Transpiration ansteigen, ist an den trockengestressten Pflanzen

3. ERGEBNISSE

beinahe keine Reaktion durch die Lichtgabe erkennbar. Dabei wurden bei den bewässerten Pflanzen maximale NP-Werte von $13,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und maximale Transpirationswerte von $3,7 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im Durchschnitt gemessen. Dies geschah bei der maximalen Lichtsättigung von $1750 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Im Vergleich dazu waren die durchschnittlichen NP-Werte der trockengestressten Pflanzen mit $0,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $0,3 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für die Transpiration marginal. Der Lichtkompensationspunkt der bewässerten Hopfenpflanzen liegt bereits bei ca. $10 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ab hier ist die Aufnahme von Kohlenstoffdioxid höher als die Abgabe bei der Atmung.

Ebenfalls erkennbar ist die beschränkte Zunahme der NP der Blätter. Dabei ist ab einer Lichtstärke von ca. $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ eine Sättigung erkennbar. Ab hier ist eine Zunahme in der CO_2 -Aufnahme nur sehr geringfügig. Die Lichtstärke von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ wurde für die nachfolgenden Vergleichsmessungen zwischen bewässerten und unbewässerten Pflanzen im Freiland verwendet.

3.2.2. Potentielle Nettophotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung

3.2.2.1. 2012

In Abbildung 36 sind die Vergleichsmessungen der Nettophotosynthese [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und der Transpiration [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] zwischen den bewässerten und unbewässerten Behandlungen des Jahres 2012, sowie die meteorologischen Bedingungen (Globalstrahlung [W/m^2], relative Luftfeuchte [%] und Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]) an den jeweiligen Tagen dargestellt. Zusätzlich eingetragen im Schaubild sind die mittels 10HS-Bodenfeuchtesensoren ermittelten absoluten Werte der Bodenfeuchte [%] sowie die an den bewässerten Pflanzen ausgelösten Bewässerungsgaben [mm].

Die Mittelwerte der NP und der Transpiration wurden aus jeweils neun Werten ($n=9$) gebildet. Für jeden Tag wurde zwischen den behandelten Gruppen ein Mittelwertvergleich mittels eines studentischen t-Tests oder eines Mann-Whitney U-Tests durchgeführt. Im Falle einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ für die Nullhypothese des t-Tests, dass beide Mittelwerte aus der gleichen Grundgesamtheit stammen, wurde dies unabhängig vom p-Wert mittels eines Sternchens (*) im Schaubild angegeben.

Für die NP schwanken die Werte sehr tagesabhängig, im Falle der bewässerten Pflanzen zwischen minimal durchschnittlich $3,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 1,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) am 02. August und maximal $13,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am 02. und am 04. Juli ($\pm 2,4$ bzw. $\pm 2,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Die Werte der unbewässerten Pflanzen variierten zwischen minimal $0,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) am 02. August und maximal $14,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 2,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) am 04. Juli. Die Mittelwerte

zwischen den Behandlungen unterschieden sich an insgesamt elf von 33 Tagen, wobei die bewässerten Pflanzen tendenziell stets höhere Werte erreichten. Für die verwendeten Tests und die erhaltenen p-Werte s. Tabelle 24 im Anhang.

Hinsichtlich der Transpiration war der Verlauf ähnlich wie bei der NP. Hier lieferten die Messungen der bewässerten Pflanzen Werte zwischen minimal $0,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($\pm 0,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) und maximal $3,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ am 28. und 30. Juni ($\pm 1,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $\pm 0,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Die unbewässerten Pflanzen lieferten bei der vorgegebenen Lichtstärke von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ durchschnittliche Werte zwischen minimal $0,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($\pm 0,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) am 02. August und maximal $2,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($\pm 0,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) am 04. Juli.

Insgesamt unterschieden sich die Behandlungen hinsichtlich der mittleren potentiellen Transpiration an 12 von 33 Untersuchungstagen signifikant voneinander (s. Anhang Tab. 24). Dabei erreichten die bewässerten Pflanzen in den meisten Fällen höhere Werte als die unbewässerten. Die Werte der NP und der Transpiration wurden nachfolgend für die Multiplen Regressionsanalysen in 3.2.2.3. verwendet.

Der kumulierte Wassernutzungskoeffizient der bewässerten Pflanzen über alle Tage war mit $4,6 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ niedriger als bei den unbewässerten mit $5,0 \mu\text{mol}/\text{mmol}$.

3. ERGEBNISSE

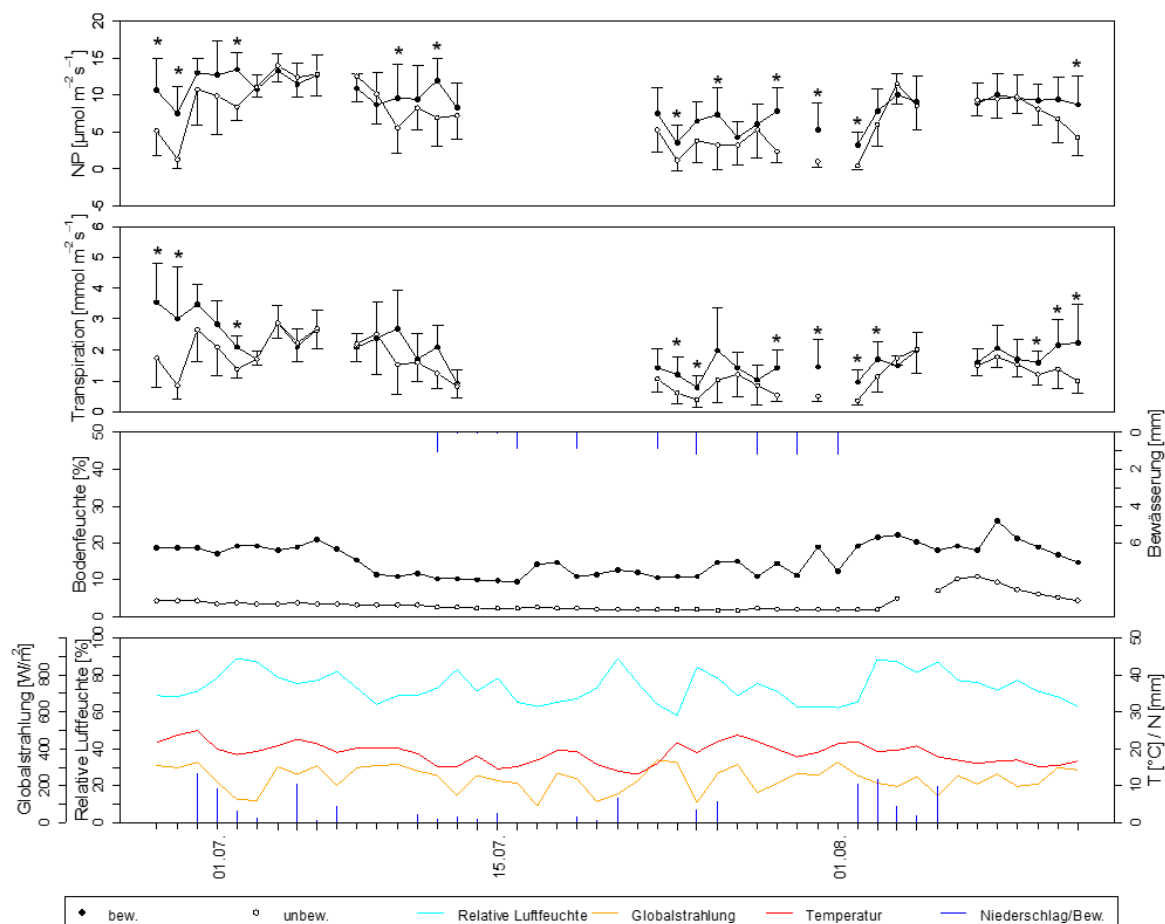


Abbildung 36: Potentielle Nettophotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung im Jahr 2012. Im Zeitraum vom 28.06. bis zum 13.08.12 wurde an insgesamt 33 Tagen die potentielle Nettophotosynthese- und Transpirationsleistung von bewässertem und unbewässertem Hopfen mit der Gaswechselanlage ADC BioScientific LC Pro gemessen. Dabei liegt jedem Messwert ein Mittelwert von neun Messungen mit einer Beleuchtungsstärke von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ an insgesamt neun Blättern zugrunde, die zur besseren Übersicht nur mit halber Standardabweichung dargestellt sind. Ebenso aufgetragen sind die Bodenfeuchte in 30 cm Tiefe in den jeweiligen Parzellen, die Bewässerungsgaben [mm] der bewässerten Pflanzen sowie die meteorologischen Daten der Globalstrahlung [W/m^2], relative Luftfeuchte [%], Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] und die gefallenen Niederschläge [mm] in diesem Zeitraum. Die Auswirkung der meteorologischen Parameter sind mittels multipler Regressionen untersucht worden und in Tabelle 10 aufgelistet.

3.2.2.2. 2013

Im Jahr 2013 war in beiden Behandlungen sowohl für die Assimilation als auch für die Transpiration ein Abwärtstrend der potentiellen Werte bei einer Lichtstärke von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ über den Untersuchungszeitraum erkennbar (s. Abb. 37). Des Weiteren unterscheiden sich die Werte, wenn auch nicht immer signifikant, darin, dass die bewässerten Pflanzen tendenziell höhere Werte erreichten.

Dabei wurden in der bewässerten Behandlung durchschnittliche Werte für die Nettophotosynthese zwischen minimal $1,5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 1,0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) am 27. Juli und maximal $15,9 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 2,8 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) am 05. Juli gemessen.

Bei den unbewässerten Pflanzen variierten die Werte zwischen durchschnittlich minimal $0,8 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 0,9 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) am 27. Juli und maximal $16,2 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 2,6 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) am 04. Juli. Dies ist zusätzlich der Tag, an dem die unbewässerten Pflanzen höhere

potentielle NP-Werte erreichen als die bewässerten. Dieser Trend kehrte sich nach diesem Tag um. Danach erreichten die bewässerten Pflanzen meist höhere Werte als die unbewässerte Behandlung. In zehn von 30 Tagen unterschieden sich die Mittelwerte signifikant voneinander (vgl. Tab. 25).

Hinsichtlich der Transpiration waren wieder ähnliche Kurven sichtbar, wie bereits bei der NP. Dabei transpirierten die bewässerten Pflanzen bis auf wenige Ausnahmen tendenziell mehr als die unbewässerten. Die Werte der bewässerten Pflanzen nahmen dabei durchschnittliche Werte von minimal $1,3 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 0,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) am 27. Juli und maximal $4,1 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 1,3 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) am 10. Juli an.

Die unbewässerten Pflanzen erreichten hinsichtlich der Transpiration durchschnittliche Werte von minimal $1,0 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 0,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) am 27. Juli. Das Maximum mit $4,2 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 0,6 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) wurde am 04. Juli gemessen.

Die Mittelwerte der Transpiration unterschieden sich zwischen den Behandlungen signifikant mit einem p-Wert kleiner als 0,05 an insgesamt sieben von 30 Tagen (vgl. Tab. 25).

Der errechnete Wassernutzungskoeffizient für die bewässerten Pflanzen über den Messzeitraum war mit $3,3 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mmol}$ etwas höher als bei den unbewässerten mit $3,1 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mmol}$.

3. ERGEBNISSE

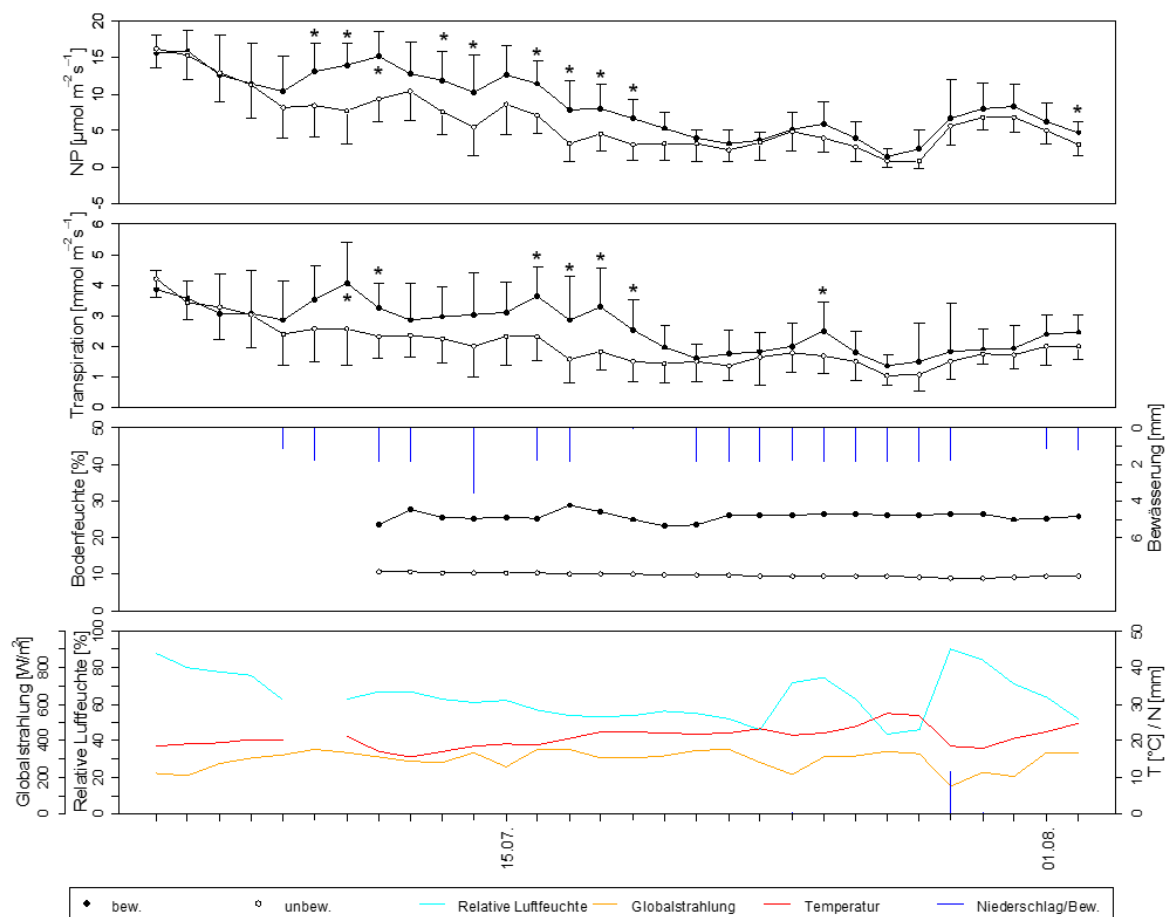


Abbildung 37: Potentielle Nettophotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung im Jahr 2013. Im Zeitraum vom 04.07. bis 02.08.13 wurde an insgesamt 30 Tagen die potentielle Nettophotosynthese- und Transpirationsleistung von bewässertem und unbewässertem Hopfen mit der Gaswechsellanlage ADC BioScientific LC Pro gemessen. Dabei liegt jedem Messwert ein Mittelwert von neun Messungen mit einer Beleuchtungsstärke von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ an insgesamt neun Blättern zugrunde, die zur besseren Übersicht nur mit halber Standardabweichung dargestellt sind. Ebenso aufgetragen sind die Bodenfeuchte in 30 cm Tiefe (ab 11.07.) in den jeweiligen Parzellen, die Bewässerungsgaben [mm] der bewässerten Pflanzen sowie die meteorologischen Daten der Globalstrahlung [W/m^2], relative Luftfeuchte [%], Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] und die gefallenen Niederschläge [mm] in diesem Zeitraum. Die Auswirkung der meteorologischen Parameter sind mittels Multipler Regressionen untersucht worden und in Tabelle 10 aufgelistet.

3.2.2.3. Multiple Regression

Neben den Vergleichen zwischen den Behandlungen untereinander, wurden die Daten ebenfalls mittels multiplen Regressionen in Vergleich zu den wichtigsten meteorologischen Parameter, welche vor Ort mittels einer Wetterstation aufgezeichnet wurden, gestellt. Hierfür wurde für die Abhängigen Variablen `Assimilation_bewässert`, `Assimilation_unbewässert` und `Transpiration_bewässert` und `Transpiration_unbewässert` je ein Modell mittels step-backward Selektion erstellt, deren Ergebnisse in Tabelle 10 aufgelistet sind. Die Voraussetzungen der Multikollinearität wurden mittels einer Korrelationsmatrix nach Pearson ermittelt und sind dem Anhang (Tab. 26) zu entnehmen. Das Austauschen der Parameter relative Luftfeuchte und Temperatur gegen die VPD erbrachte keine besseren Modelle.

Mit den aufgelisteten Parametern lassen sich die Daten der Assimilation der unbewässerten Behandlung am besten durch die Globalstrahlung, Temperatur und relative Luftfeuchte

erklären, während in allen Fällen die Werte signifikant von Null verschieden sind (s. p_F -value). Dabei erreicht das Modell ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,41.

Für die Transpiration der unbewässerten Behandlung wurde ein Modell mit einem R^2 von 0,35 ermittelt. Dabei blieben hier die Umweltparameter Globalstrahlung, relative Luftfeuchte und die Bodenfeuchte als erklärende Variablen im Modell und gelten mit einem p_F -value $<0,001$ alle als höchst signifikant von Null verschieden.

Für die Assimilation und die Transpiration der bewässerten Pflanzen kann weniger der Varianz durch die Regressionsmodelle erklärt werden. Diese ergeben ein Bestimmtheitsmaß R^2 von je 0,33 und 0,24. Dabei gehen im Modell der Assimilation die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte als signifikant von Null verschieden ins Modell ein und erklären am besten die Werte der Assimilation. Bei den Werten der Transpiration ist das Modell mit den Parametern Globalstrahlung, Temperatur und relative Luftfeuchte das beste Modell zur Erklärung der Varianz.

Tabelle 10: Multiple Regressionen mit den Werten der potentiellen Nettophotosynthese und Transpirationmessungen der Jahre 2012 und 2013 (n=63). In das Modell wurden die Parameter Globalstrahlung, Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchte, Bodenfeuchte unbewässert/bewässert, Windgeschwindigkeit und im Falle der bewässerten Pflanzen auch die Bewässerungen als erklärende Variablen (je n=63) in das Modell eingefügt und das beste Modell mittels step-backward Selektion ausgewählt. Die relative Luftfeuchte wurde aufgrund von Multikollinearität wurzeltransformiert (s. Anhang Tab. 26). Die Modelle wurden mittels Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung der Residuen und mittels visueller Auswertung die Homoskedastizität der Residuen überprüft.

| Abhängige Variable | Umweltparameter (erklärende Variablen) | Schätzwert | F-value | p_F -value | Güte des Modells |
|---------------------------|---|------------|---------|--------------|-------------------------|
| Assimilation unbewässert | Globalstrahlung | 0,02 | 6,63 | $<0,05$ * | $R^2=0,41$ |
| | Temperatur | -0,28 | 11,37 | $<0,01$ ** | p-value |
| | relative Luftfeuchte | 4,31 | 26,68 | $<0,001$ *** | $<0,001$ *** |
| Transpiration unbewässert | Globalstrahlung | 0,01 | 7,34 | $<0,01$ ** | $R^2=0,35$ |
| | relative Luftfeuchte | 0,71 | 10,81 | $<0,01$ ** | p-value |
| | Bodenfeuchte_unbew | 0,03 | 13,52 | $<0,001$ *** | $<0,001$ *** |
| Assimilation bewässert | Temperatur | -0,43 | 23,15 | $<0,001$ *** | $R^2=0,33$ |
| | relative Luftfeuchte | 1,72 | 8,31 | $<0,01$ ** | p-value $<0,001$ *** |
| Transpiration bewässert | Globalstrahlung | 0,01 | 12,08 | $<0,001$ *** | $R^2=0,24$ |
| | Temperatur | -0,03 | 2,44 | 0,12 | p-value |
| | relative Luftfeuchte | 0,53 | 7,71 | $<0,01$ ** | $<0,001$ *** |

3.2.3. Tagesgang

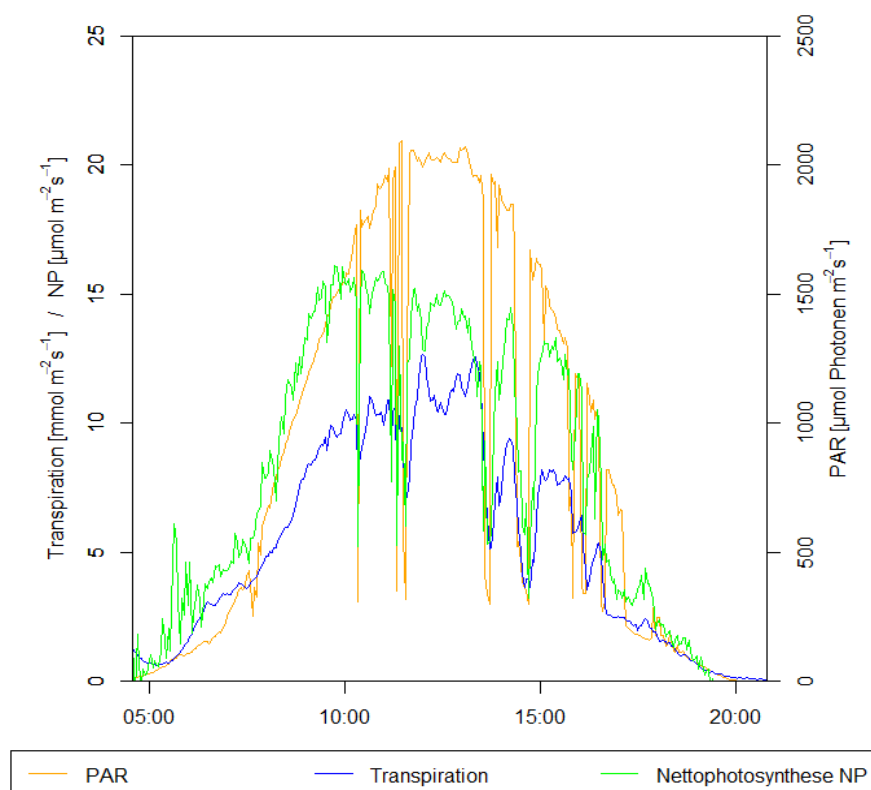


Abbildung 38: Tagesgang von *Humulus lupulus* cv. Herkules gemessen am 17.07.14. Dargestellt ist die eingefallene Sonneneinstrahlung PAR [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$], die dabei gemessene Transpiration [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und die Nettphotosynthese NP [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]. Der Tag kann als sonnig mit wenigen Wolkenfeldern bezeichnet werden. Diese zeigen sich in zeitweiligen Abfällen der Sonneneinstrahlung und damit verbunden der Transpiration und der NP. Die Daten wurden an einem Blatt im oberen Drittel der Pflanze mittels der Gaswechsellanlage LC Pro ADC BioScientific Inc. alle drei Minuten erfasst.

Die Tagesgangmessung zur Transpiration und der Nettphotosyntheseleistung sind in Abbildung 38 gegen die Uhrzeit auf der x-Achse abgebildet. Die gelbe Linie stellt dabei die gemessene Sonneneinstrahlung PAR [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$] am Blatt dar. Die Messwerte sind auf der sekundären y-Achse dargestellt.

Man erkennt, dass es sich um einen sonnigen Tag mit vereinzelt Wolkenfeldern (erkennbar an den zeitweise stark abfallenden Messwerten der PAR) handelte. Der Verlauf der PAR nimmt im Tagesverlauf eine typische Glockenform an. Zu Beginn der Messung erreichte die PAR Werte von ca. $10 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Mit Sonnenaufgang kurz nach Beginn der Messung stiegen die Werte kontinuierlich an. Dabei wurden zur Mittagszeit Maximalwerte von knapp über $2000 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemessen. Ab ca. 13:00 Uhr fielen die Werte wieder ab und erreichten gegen Abend um 20:00 Uhr wieder minimale Werte von $0 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Das längste Wolkenfeld trat dabei in der Zeit zwischen 14:20 Uhr und 14:45 Uhr auf. Hier fiel die PAR zeitweise auf Werte von $300 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ab, erreichte nach aufklarendem Himmel aber wieder Werte von über $1600 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Ähnlich zum Verlauf der PAR spiegelt sich auch der Verlauf der gemessenen Transpiration (blaue Linie) wider. Diese ist nach einem kurzen Abfall nach Beginn der Messung von einem starken Aufwärtstrend geprägt. Dabei ist erkennbar, dass die Werte der Transpiration stark mit der Sonneneinstrahlung korrelieren ($R^2 = 0,93$). Dabei wurden die höchsten Werte von $11,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bereits um 10:30 Uhr und noch höhere Werte von $12,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ um 12:00 Uhr und $12,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ um 13:20 Uhr gemessen. Daraufhin fiel die Transpiration wieder gemäß der Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf ab und erreichte zum Ende der Messung um 20:50 Uhr Werte von $0,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Laut Pearson Korrelationstest wurde kein Zusammenhang zum VPD für die Transpiration festgestellt ($R^2 = 0,14$). Die Transpirationswerte korrelieren mit einem Koeffizienten von $R^2 = 0,95$ allerdings stark mit der Nettophotosynthese.

Im Verlauf der Nettophotosynthese (grüne Linie) wurden in Betrachtung des Tagesverlaufs bereits wesentlich früher Maximalwerte von über $15 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ um 9:20 Uhr gemessen. Zu dieser Zeit lag die PAR bei $1290 \text{ } \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, während ein Transpirationswert von $8,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gemessen wurde. Der insgesamt höchste Wert des Tages der NP wurde um 9:45 Uhr mit $16,1 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ registriert. Daraufhin war die NP von einem Abwärtstrend geprägt, während die Transpiration noch bis 13:20 Uhr einem Aufwärtstrend folgte. Ab 19:30 Uhr wurden bei Lichtstärken unter $30 \text{ } \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nur noch negative Werte für die NP, also die Dunkelatmung registriert. Auch der Tagesgang der Nettophotosynthese korreliert laut Pearsons Korrelationstest mit einem $R^2 = 0,91$ stark mit der PAR, allerdings mit $R^2 = 0,07$ nicht mit dem VPD.

In der Zeit von 7:30 Uhr bis 16:00 Uhr wurde bezogen auf die Tagesmessung 84 % an H_2O transpiert sowie 85 % an CO_2 assimiliert. Die höchste WUE erreichte das Blatt gegen 16:00 Uhr mit 2,0 bei einer PAR von ca. $1170 \text{ } \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

3.2.4. Nettophotosynthese und Transpiration bei gegebenen Lichtverhältnissen

3.2.4.1. Ermittlung der Blattfläche

Die Ermittlung der Blattfläche anhand der Untersuchungstermine nach Engelhard *et al.* (2011) lieferte sigmoidale Kurven mit hohen Bestimmtheitsmaßen R^2 (s. Abb. 39). So konnte im unteren Bereich ein Verlauf mit $R^2 = 0,62$ im mittleren mit $R^2 = 0,96$ und im oberen Bereich ein $R^2 = 0,81$ bestimmt werden. Die genauen Blattflächen [m^2] für die Höhenstufen sind dem Schaubild 39 zu entnehmen. Die ermittelten Werte dienten für die Hochrechnung der tatsächlichen Verdunstung an den Untersuchungstagen in Tabelle 13. Eine kumulierte Darstellung der Blattfläche aller Höhenstufen sind im Anhang Abbildung 61 aufgeführt.

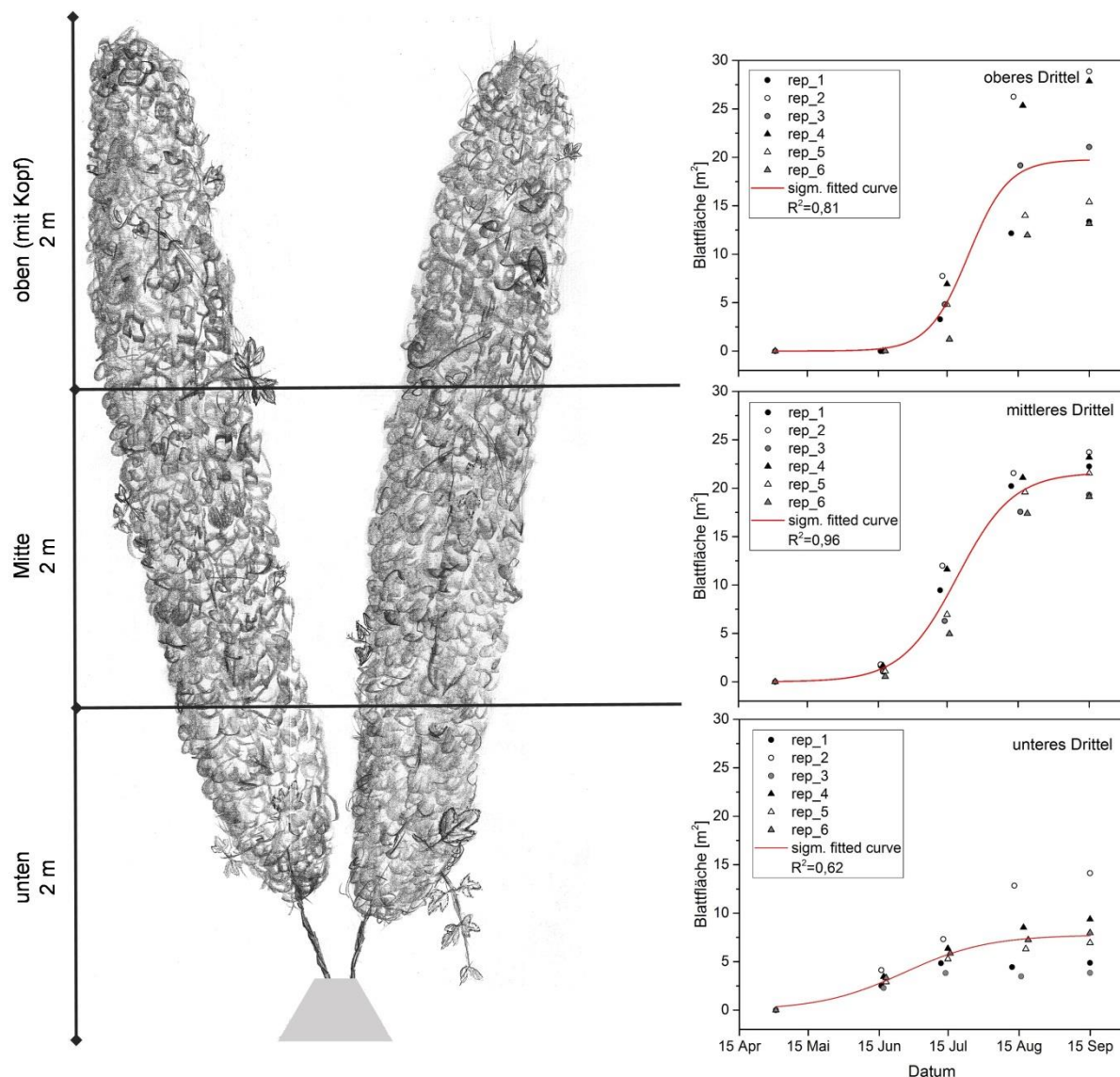


Abbildung 39: Blattflächenentwicklung der Sorte Herkules in den drei unterteilten Bereichen (unten, Mitte, oben) zur Extrapolation der tatsächlichen Transpiration. Die Daten wurden nach Engelhard *et al.* (2011), übernommen und wie folgt verändert. Bekannt waren: Mittelwert, Standardabweichung sowie Stichprobenanzahl zu den Terminen: 16. bis 18.06., 12. bis 16.07. und 12. bis 19.08.2010. Mit der Annahme, dass am 01. Mai das Wachstum beginnt und es zwischen der letzten Blattflächenermittlung und der Ernte am 15.09. noch einen Blattflächenzuwachs von 10 % gibt, wurden für alle drei Bereiche sigmoide Kurven entworfen, mit denen zu jedem Zeitpunkt die Blattfläche in den jeweiligen Bereichen bestimmt werden kann. Der Korrelationskoeffizient R^2 gibt die Genauigkeit der Kurve an.

3.2.4.2. Meteorologie während den Untersuchungen

Die Wetterbedingungen an den sieben Untersuchungstagen stellten für diese Jahreszeit typische Wetterbedingungen dar (s. Abb. 40, obere Reihe). So lagen die Temperaturen zwischen 20 und 30 °C; die relative Luftfeuchtigkeit sank tagsüber auf Werte zwischen 40 und 60 %, erreichte in der Nacht aber stellenweise wieder Werte bis 100 %. Der erste Tag war sehr bewölkt, was an den geringen maximalen PAR Werten erkennbar ist. Dies war auch der einzige Tag, an dem minimale Niederschläge am Abend fielen. Der zweite und dritte Tag (16. und 23. Juli) waren relativ heiß und sonnig, obwohl auch hier vereinzelte Wolken aufgezogen sind. Bezieht man

sich auf die errechneten ET_0 Werte der Wetterstation, so waren dies die Tage mit den höchsten Verdunstungswerten (vgl. Tab. 13) mit 4,8 mm am 16. Juli und 4,6 mm am 23. Juli.

3.2.4.3. Verteilung der Sonneneinstrahlung und erhobene Gaswechselfdaten

3.2.4.3.1. PAR

Die im Bestand mittels des Fotosensors an der Gaswechselanlage gemessene Sonneneinstrahlung war an allen Tagen im oberen Drittel am höchsten, und der Unterschied zu den unteren zwei Dritteln der Pflanzen fiel am größten aus (s. Abb. 40, orangene Boxplots). Dabei wurden beispielsweise je nach Bewölkungsgrad Mediane zwischen maximal $1811,5 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ am 16. Juli bei der bewässerten Behandlung und minimal $153,0 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ am 31. Juli in der unbewässerten Behandlung gemessen. Unterschiede zwischen den Bereichen unten und Mitte waren nur geringfügig erkennbar. Hier schwankten die gemessenen Mediane zwischen Werten von minimal $13 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$, gemessen in der bewässerten Behandlung im unteren Bereich am 06. August, und maximal $103,5 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$, gemessen am 16. Juli in der Mitte der unbewässerten Pflanzen.

Umso sonniger oder wolkiger ein Tag war, umso weniger streuten die Daten der PAR im oberen Drittel, was an der Höhe des oberen und unteren Quartils um den Median vor allem am 16. Juli (sonnig) und am 31. Juli und 05. August (beide wolkig) erkennbar ist. Teilweise sind leichte Unterschiede im Boxplot der PAR zwischen den Varianten bewässert und unbewässert erkennbar (z. B. 6. und 7. August). Statistische Untersuchungen mittels Mann-Whitney U Tests zwischen den Behandlungen ergaben im unteren Bereich signifikante Unterschiede an vier von sechs Tagen. Im mittleren und oberen Drittel unterschieden sich die Werte jeweils nur an einem der Tage (s. Tab. 11).

3.2.4.3.2. Assimilation

Ähnlich zur gemessenen PAR verhielten sich die Messungen der Assimilation, was die Verteilung zwischen den drei Pflanzabschnitten unten, Mitte und oben betrifft (s. Abb. 40, grüne Boxplots). Zwar sind die Quartile um den Median verhältnismäßig etwas größer als bei der PAR, doch lassen sich auch hier klar höhere Werte im oberen Drittel der Pflanze erkennen. Die Werte im unteren Drittel schwankten zwischen minimal $0,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am 23. Juli an den bewässerten Pflanzen und maximal $2,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am 05. August in der unbewässerten Behandlung. In der Mitte wurden Werte zwischen minimal $1,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am 31. Juli bei den unbewässerten Pflanzen und maximal $4,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemessen, was mit einer Differenz von $2,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bezogen auf die Summe der Messungen sehr geringe Unterschiede darstellt. Im oberen Bereich waren die Schwankungen der Mediane mit minimal $4,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am

3. ERGEBNISSE

31. Juli in der unbewässerten Variante, und maximal $16,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am 06. August bei den bewässerten Pflanzen, dagegen deutlich höher. Im Vergleich der Höhenstufen zeigt sich damit eine klare Zunahme der Assimilation von unten nach oben.

Statistische Vergleiche der täglichen Messwerte zwischen den Behandlungen zeigte an fünf von sechs Tagen Unterschiede im unteren Bereich und an einem Tag im mittleren Bereich der Pflanzen (s. Tab. 11).

3.2.4.3.3. *Transpiration*

Hinsichtlich der Transpiration zeigt sich die Zunahme über die Höhenstufen noch klarer. So erkennt man an den einzelnen Tagen eine beinahe lineare Zunahme der Mediane der Transpiration von unten nach oben, unabhängig von der Behandlung (s. Abb. 40, blaue Boxplots).

Die Werte der Mediane im unteren Bereich schwanken an den sieben Messtagen im Bereich von minimal $0,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ermittelt am 08., 23. und 31. Juli) in der bewässerten Variante und Maximalwerten von $2,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gemessen am 16. Juli bei den unbewässerten Pflanzen. Im mittleren Bereich liegen die Werte zwischen $1,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ am 29. August bei der bewässerten Behandlung und $3,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ am 16. Juli in der unbewässerten.

Im Kronenbereich der Pflanzen traten, vergleichbar zu den beiden vorgehenden Parametern, ebenfalls die größten Differenzen zwischen den Medianen der Transpiration auf. So wurden mit minimal $1,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ am 08. Juli und $6,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ am 16. Juli Unterschiede von bis zu $4,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ registriert. Außerdem wurde der höchste Wasserverlust der Pflanzen mit $6,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in der bewässerten Behandlung und $5,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in der unbewässerten Behandlung am Tag mit der höchsten gemessenen Verdunstung ET_0 der Wetterstation verzeichnet (vgl. Tab. 13).

Während sich insgesamt zeigt, dass die Datenverteilung der Sonneneinstrahlung sich sehr mit der der Assimilation deckt, ist erkennbar, dass die Transpiration sich etwas anders verhält. Hier sind auch schon bei sehr geringer Sonneneinstrahlung im unteren und mittleren Drittel relativ zur Krone höhere Transpirationswerte erkennbar. Statistisch unterschieden sich die Behandlungen unten an fünf von sechs Untersuchungstagen. In der Mitte wurden immer noch vier statistische Unterschiede zwischen den Behandlungen ermittelt. Im oberen Bereich, wo die absoluten Werte am höchsten waren, unterscheiden sich die Messergebnisse beider Behandlungen allerdings nur an einem Tag (s. Tab. 11).

3.2.4.4. Assimilation und Transpiration von Hopfen in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung PAR

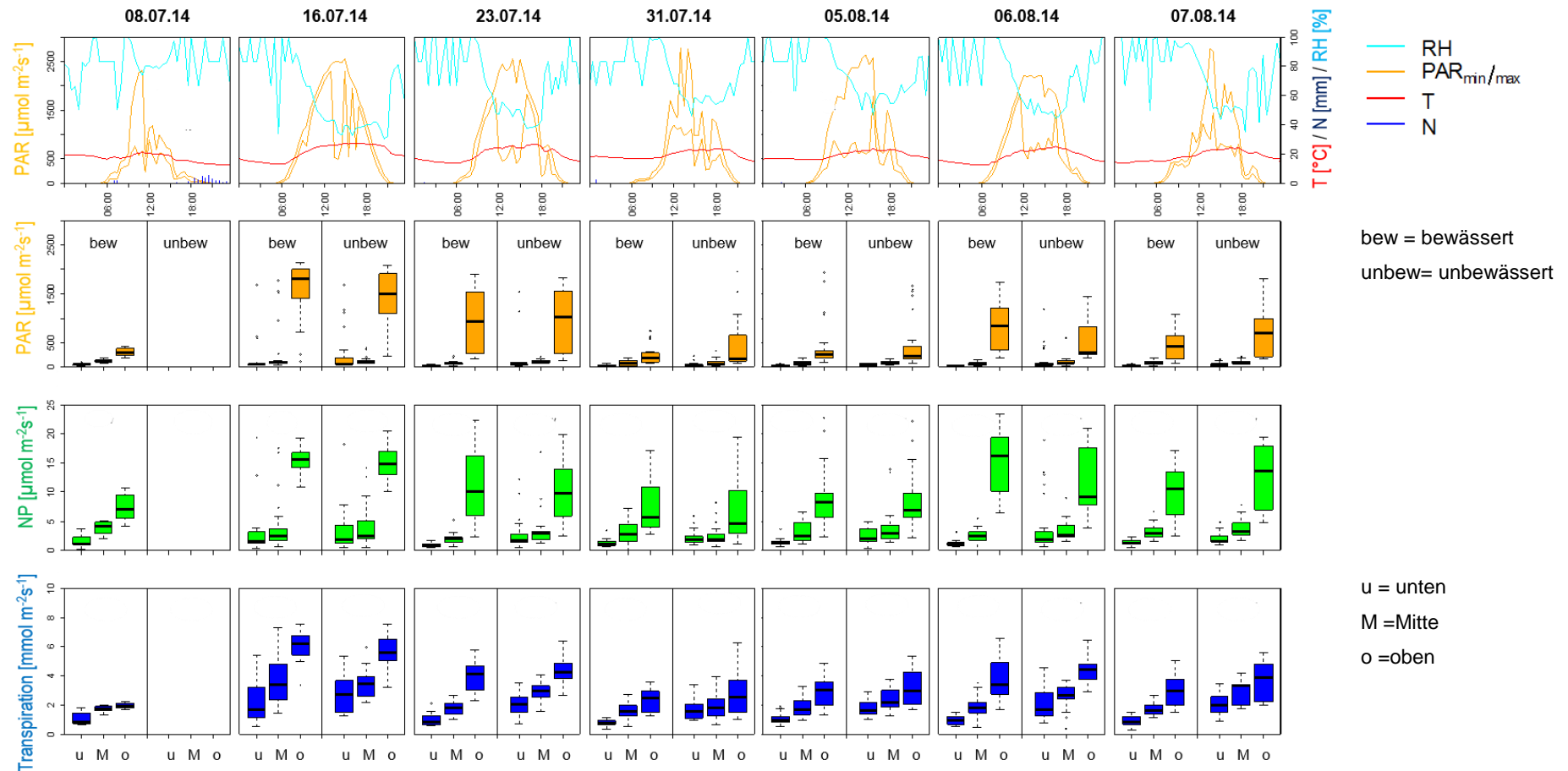


Abbildung 40: Nettophotosynthese- und Transpirationsleistung am 08.07., 16.07., 23.07., 31.07. und 05.08. bis 07.08.14. Die Messungen fanden jeweils zwischen 7:30 Uhr und 16:00 Uhr jeden Tages statt. Die gemessene Sonneneinstrahlung $PAR_{\min/\max}$ [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$], die Temperatur T [$^{\circ}\text{C}$], relative Luftfeuchte RH [%] und Niederschlag N [mm] sind als Stundenwerte gegen die Uhrzeit aufgetragen. Mit der Gaswechselanlage ADC BioScientific LC Pro wurde direkt im Bestand sowohl an bewässertem (bew) als auch an unbewässertem (unbew) Hopfen im Wechsel und auf den Höhenstufen unten „u“, Mitte „M“ und oben „o“ die einfallende Strahlung PAR [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$], die Nettophotosynthese NP [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] und die Transpiration [$\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$] gemessen. Die ermittelten Daten sind als Boxplots dargestellt, wobei die Box das untere und das obere Quartil, also 50 % der Daten beschreibt und den Median als Strich beinhaltet. Die Whisker beschreiben das 1,5 fache des Interquartilabstandes, wobei das Ende den äußersten Wert zeigt, der sich noch in diesem Bereich befindet. Die Punkte stellen die Außreißer dar, wobei diese als Extremwerte betrachtet werden können. So kommt es theoretisch selbst im schattigen Bestand in unterer Höhe auch mal vor, dass ein voll sonnenexponiertes Blatt gemessen wird.

3. ERGEBNISSE

Tabelle 11: Ergebnisse der statistischen Untersuchungen der gemessenen Parameter PAR, Assimilation und Transpiration zwischen den Behandlungen (vgl. Abb. 40) mittels Mann-Whitney U Tests. Signifikanzen sind je nach Signifikanzniveau mit Sternchen * gekennzeichnet, während keine aufgefundenen Signifikanzen mit dem Kürzel n.s. (nicht signifikant) dargestellt sind.

| Position | Parameter | 16.07. | 23.07. | 31.07. | 05.08. | 06.08. | 07.08. |
|----------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| unten | PAR | 0,29 n.s. | <0,001 *** | 0,22 n.s. | <0,001 *** | <0,001 *** | 0,03 * |
| | Assimilation | 0,29 n.s. | <0,001 *** | <0,001 *** | <0,001 *** | <0,001 *** | 0,005 ** |
| | Transpiration | 0,13 n.s. | <0,001 *** | <0,001 *** | <0,001 *** | <0,001 *** | <0,001 *** |
| Mitte | PAR | 0,09 n.s. | <0,001 *** | 0,79 n.s. | 0,35 n.s. | 0,054 n.s. | 0,34 n.s. |
| | Assimilation | 0,45 n.s. | 0,007 ** | 0,38 n.s. | 0,65 n.s. | 0,22 n.s. | 0,24 n.s. |
| | Transpiration | 0,91 n.s. | <0,001 *** | 0,31 n.s. | 0,03 * | <0,001 *** | <0,001 *** |
| oben | PAR | 0,16 n.s. | 0,93 n.s. | 0,57 n.s. | 0,54 n.s. | 0,055 n.s. | 0,045 * |
| | Assimilation | 0,57 n.s. | 0,69 n.s. | 0,31 n.s. | 0,41 n.s. | 0,08 n.s. | 0,13 n.s. |
| | Transpiration | 0,11 n.s. | 0,19 n.s. | 0,93 n.s. | 0,37 n.s. | 0,18 n.s. | 0,012 * |

Abbildung 41 zeigt die Zusammenhänge der erhobenen Gaswechseldaten zum VPD. Hierfür wurden die Messungen in die Tagesabschnitte morgens, mittags und nachmittags eingeteilt und im Zusammenhang mit den jeweiligen VPD-Werten der Tagesabschnitte der sechs Untersuchungstage dargestellt.

Es zeigt sich dabei, dass die Transpiration einen engen Zusammenhang zum VPD hat, welcher von unten nach oben zunimmt (vgl. R^2 -Werte). Dabei verhalten sich die Behandlungen bewässert und unbewässert zum VPD weitestgehend identisch, auch wenn im unteren und mittleren Pflanzenabschnitt höhere Transpirationswerte der unbewässerten Pflanzen zu verzeichnen sind. Hinsichtlich der Assimilation sind keine Zusammenhänge zum VPD zu erkennen, wie die Regressionskoeffizienten zeigen (vgl. Abb. 41).

Tabelle 12 gibt die dazu gehörigen Werte der WUE der Höhenstufen in Abhängigkeit der Tagesabschnitte an. Diese war bei den unbewässerten Pflanzen mit Werten zwischen 0,9 und 3,2 meistens geringer als bei den bewässerten mit Werten zwischen 1,0 und 3,7, und zwar in allen Höhenabschnitten der Pflanze. Am deutlichsten unterschieden sie sich in der Mitte der Pflanze. Die höchste WUE war bei beiden Behandlungen im oberen Bereich der Pflanze am Morgen zu verzeichnen. Im Verlauf des Tages nahm diese im Mittel ab.

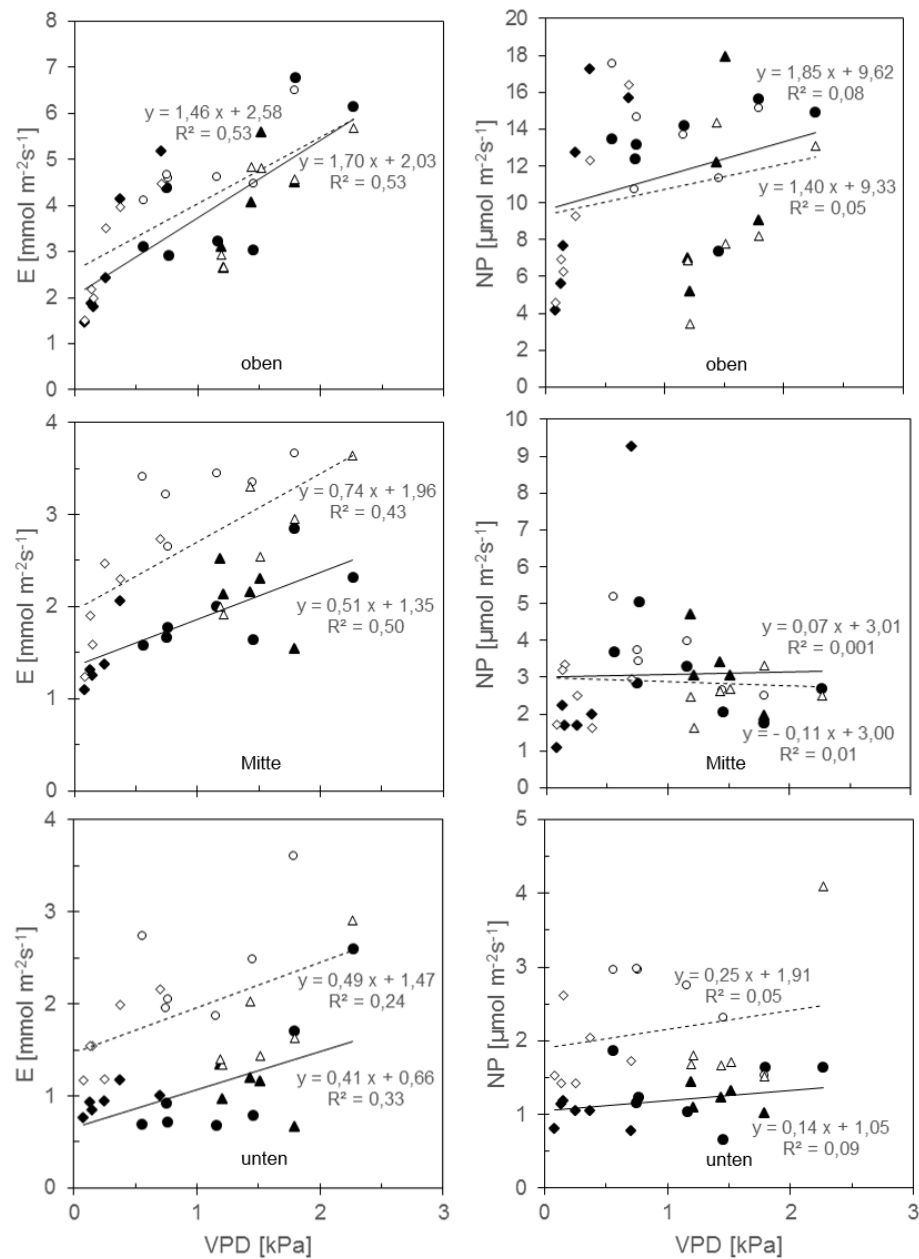


Abbildung 41: Zusammenhang von VPD zu Transpiration E [mmol m⁻²s⁻¹] und Assimilation A [μmol m⁻²s⁻¹] bei gegebener Lichtstärke über die Höhenstufen unten, Mitte und oben der Behandlungen bewässert (ausgefüllte Symbole) und unbewässert (nicht ausgefüllte Symbole). Die Messungen wurden nach Tagesabschnitten (morgens 07:00 bis 10:00 Uhr = Raute, mittags 10:00 bis 13:00 Uhr = Kreis und nachmittags 13:00 bis 16:00 Uhr = Dreieck) aufgelöst und gegen den Mittelwert des VPD dieser Zeit aufgetragen. Korrelationskoeffizient R² gibt die Zusammenhänge nach linearen Regressionen der Trendlinie (schwarze Linie = bewässert, gestrichelte Linie = unbewässert) mit Formel aus.

Tabelle 12: Wassernutzungseffizienz WUE der bewässerten und unbewässerten Hopfenpflanzen in den Höhenstufen unten Mitte und oben der Pflanzen bezogen auf alle sechs Untersuchungstage und die Tagesabschnitte morgens (7:00 bis 10:00 Uhr), mittags (10:00 bis 13:00 Uhr) und nachmittags (13:00 bis 16:00 Uhr).

| Höhenstufe | unten | | Mitte | | oben | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| | bew | unbew | bew | unbew | bew | unbew |
| morgens | 1,1 | 1,1 | 2,5 | 1,3 | 3,7 | 3,2 |
| mittags | 1,4 | 1,1 | 1,6 | 1,1 | 3,3 | 2,9 |
| nachmittags | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 0,9 | 2,5 | 2,1 |

3.2.4.5. Extrapolation des Wasserverbrauchs

Ausgehend von den tatsächlichen Transpirationswerten, wurde der Wasserverbrauch der Pflanzen für die jeweiligen Untersuchungstage extrapoliert. Hierzu wurden die Messergebnisse der bewässerten und unbewässerten Behandlungen kombiniert und daraus neue Mediane gebildet, um einen größeren Stichprobenumfang für die Hochrechnung zu bekommen (s. Tab. 13). Der kumulierte Wasserverbrauch einer einzelnen Pflanze variierte während der Messungen stark. So verlor eine Hopfenpflanze zwischen minimal 9,3 l (08. Juli) und 55,8 l (06. August) Wasser pro Tag, mit zunehmender Tendenz im Laufe der Messungen abhängig von der Witterung. Zu Beginn der Messungen, an den ersten beiden Tagen, war der am stärksten transpirierende Teil der Pflanze in der Mitte. Später zeigten die oberen Blätter die höchsten Transpirationswerte. Den stärksten Einfluss auf die Summe an verdunstetem Wasser nahm dabei die errechnete Blattfläche ein. Denn obwohl der höchste Median für die Transpiration am Tag mit der ebenfalls höchsten ET_0 Werte mit $5,8 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ am 16. Juli gemessen wurde, war der kumulierte Wasserverbrauch von 34,2 Litern aufgrund der geringen Blattfläche von $18,6 \text{ m}^2$ noch relativ gering. Die Ermittlung der Korrekturfaktoren für die sieben Untersuchungstage lieferte Werte zwischen 0,8 und 3,2. Durch das arithmetische Mittel der jeweiligen Korrekturfaktoren für den Zeitraum des zweiten bis zum letzten Untersuchungstag ergab sich ein gemittelter Korrekturfaktor von 2,3.

Tabelle 13: Extrapolation des Wasserverbrauchs der Sorte Herkules basierend auf Abb. 39 und 40. Für die Hochrechnung wurden die Mediane der bewässerten und unbewässerten Pflanzen kombiniert, um die Stichprobenanzahl (n) zu erhöhen. Anhand der Mediane der Transpiration wurde mittels der Zeit und Blattfläche ein durchschnittlicher Wasserverbrauch pro Pflanze hochgerechnet, welcher in Kombination mit den ermittelten potentiellen Verdunstungswerten ET_0 vor Ort näherungsweise Tages-Korrekturfaktoren für die Sorte Herkules ergab. Der Mittelwert aus den Tagen 16.07. bis 7.08. ergab einen durchschnittlichen Korrekturfaktor von 2,3 für die Hauptwachstumsphase von Hopfen. Die Werte der Transpiration und der Blattfläche sind gerundet angegeben.

| Datum | Position | Transpiration E | | Blattfläche [m ²] | E in 8 h [mmol] | Wasserverbrauch pro Pflanze | | ET _{Hopfen} [mm] | ET ₀ [mm] | k _c |
|----------|----------|-----------------------------------|----|----------------------------------|--------------------|-----------------------------|------|------------------------------|-------------------------|----------------|
| | | Median [mmol/m ² s] | n | | | [l] | [l] | | | |
| 08. Juli | unten | 0,8 | 13 | 4,9 | 116370 | 2,1 | 9,3 | 1,9 | 2,4 | 0,8 |
| | Mitte | 1,8 | 14 | 5,4 | 278137 | 5,0 | | | | |
| | oben | 1,9 | 12 | 2,2 | 119444 | 2,2 | | | | |
| 16. Juli | unten | 2,0 | 45 | 5,6 | 321170 | 5,8 | 34,2 | 6,8 | 4,8 | 1,4 |
| | Mitte | 3,4 | 52 | 8,4 | 818901 | 14,7 | | | | |
| | oben | 5,8 | 52 | 4,6 | 762058 | 13,7 | | | | |
| 23. Juli | unten | 1,2 | 48 | 6,2 | 217000 | 3,9 | 33,5 | 6,7 | 4,6 | 1,5 |
| | Mitte | 2,2 | 49 | 11,3 | 707410 | 12,7 | | | | |
| | oben | 4,2 | 48 | 7,8 | 938979 | 16,9 | | | | |
| 31. Juli | unten | 1,0 | 48 | 6,6 | 191666 | 3,4 | 31,3 | 6,3 | 3,1 | 2,0 |
| | Mitte | 1,6 | 49 | 14,6 | 675596 | 12,2 | | | | |
| | oben | 2,5 | 47 | 12,1 | 873093 | 15,7 | | | | |
| 05. Aug. | unten | 1,3 | 48 | 6,9 | 253667 | 4,6 | 44,6 | 8,9 | 3,5 | 2,5 |
| | Mitte | 2,1 | 48 | 16,3 | 969695 | 17,5 | | | | |
| | oben | 3,0 | 50 | 14,5 | 1247289 | 22,5 | | | | |
| 06. Aug. | unten | 1,1 | 48 | 6,9 | 223418 | 4,0 | 55,8 | 11,2 | 3,5 | 3,2 |
| | Mitte | 2,3 | 50 | 16,6 | 1088639 | 19,6 | | | | |
| | oben | 4,2 | 48 | 14,9 | 1788795 | 32,2 | | | | |
| 07. Aug. | unten | 1,3 | 48 | 6,9 | 260654 | 4,7 | 50,5 | 10,1 | 3,2 | 3,2 |
| | Mitte | 2,0 | 48 | 16,9 | 971743 | 17,5 | | | | |
| | oben | 3,6 | 48 | 15,3 | 1572287 | 28,3 | | | | |

3.3. RHIZOSPHÄRE VON HOPFEN

Die Kenntnis der Morphologie des Wurzelsystems von *Humulus lupulus* erlaubt es, Fragen in Bezug auf eine optimale Bewässerung zu beantworten. Im Durchschnitt lag das durchwurzelte Bodenvolumen bei 5 m³. Dabei wurden stets charakteristische Wurzelformationen vorgefunden, die im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden. Auf die detaillierten Ergebnisse der fünf durchgeführten Grabungen wird in Kapitel 3.3.2. eingegangen.

3.3.1. Wurzeltypen

Allgemeingültig wurden bei den Grabungen der verschiedenen Hopfenpflanzen drei verschiedene Wurzeltypen entdeckt, die sich in Alter, Wachstumsrichtung und Ursprung unterschieden. Dabei war die Einteilung unabhängig von der untersuchten Sorte.

3.3.1.1. Mehrjährige Wurzeln

Eine wichtige Gruppe bildeten alte mehrjährige Wurzeln, welche sich direkt um den Wurzelstock entwickelten und dabei sozusagen das Gerüst des Wurzelsystems darstellten. Sie waren durch einen großen Durchmesser und ein sehr ausgeprägtes Wachstum gekennzeichnet. Die Epidermis dieser Wurzeln war lignifiziert. Sie erreichten dabei in ihrer Form Durchmesser von über zwei Zentimetern, wobei dieser in Wachstumsrichtung abnahm, und Längen von über 3,5 m (vgl. Abb. 23). Das Wachstum fand dabei vorwiegend in zwei Richtungen statt. Zum einen verliefen die Wurzeln in horizontaler Richtung unter der Bodenoberfläche um das Rhizom herum. Der Verlauf dieser Wurzeln beschränkte sich dabei häufig auf eine Tiefe von ca. 10 bis 50 cm und reichte teils bis in die Fahrgassenmitte, also ca. 1,6 m entfernt vom Wurzelstock und sogar darüber hinaus. Zum anderen wurde eine weitere Kategorie dieser Wurzeln durch eine nach unten gerichtete Wachstumsrichtung gebildet. Dabei ist der Ursprung ebenfalls in der Nähe des Wurzelstocks anzusehen. Die Ansammlung dieser Wurzeln wurde als nach unten gerichteter Quader definiert, welcher erhebliche Bereiche an Boden erschließen ließ. Dabei wurden Tiefen von über 3,7 m festgestellt.

3.3.1.2. Junge weiße Wurzeln

Eine weitere Kategorie an Wurzeltypen bildeten junge weiße Wurzeln, welche aus den mehrjährigen Wurzeln wuchsen. Diese Wurzeln nutzen dabei vornehmlich alte bereits durchdrungene Gänge älterer Wurzeln oder Wurmgänge, um sich im Boden auszubreiten. Dabei schien es keine klare Abgrenzung zu geben, wo diese an den mehrjährigen Wurzeln gebildet wurden. Vielmehr waren die untersuchten mehrjährigen Wurzeln in der Lage, an jeder Position junge Wurzeln zu entwickeln, um somit neue Bodenbereiche zu erschließen.

3.3.1.3. Wurzeln im Bifangbereich

Eine dritte Kategorie bildeten ebenfalls junge weiße Wurzeln, welche sich im künstlich angehäuften Bifang entwickelten. Diese unterschieden sich von den vorher beschriebenen Wurzeln hauptsächlich in ihrem Ursprung. Dieser ist, anders als zuvor, nicht in den vom Rhizom entspringenden Wurzeln, sondern direkt an der Sprossachse. So wurden die Wurzeln, die im Bifang gefunden wurden, direkt aus dem Gewebe der nach oben gerichteten Reben gebildet. Die Wurzeln werden ebenfalls durch eine junge weiße Struktur charakterisiert und verlaufen im Bifang in alle Richtungen. Dabei nutzen sie die künstlich aufgeschüttete Erde, um weitere Bodenbereiche zu erschließen. Am Ende der Wurzeln, welche Längen von über einem Meter erreichen konnten, wurden verstärkt Verzweigungen und feine Wurzelhaare gebildet.

3.3.2. Sorte Herkules

3.3.2.1. Sandboden

Das Wurzelbild der Sorte Herkules am Sandbodenstandort Karpfenstein war von der einführenden Beschreibung geprägt. Die Darstellung eines Transversalschnitts durch den Bifang zeigt die drei typischen Bereiche (s. Abb. 42 a).

Im Bifang fand eine Ausbreitung der Wurzeln in alle Richtungen statt, wobei die meisten Wurzeln in Richtung des Bifangs wuchsen und diesen voll erschlossen. Bei einer Höhe von 30 cm, einer Breite von 40 cm und einer Länge von 1,6 m wurde ein Volumen von 0,1 m³ errechnet, das die Pflanze in diesem Bereich durchwurzelte.

Die horizontal verlaufenden mehrjährigen Wurzeln bildeten in ihrer Ausprägung einen um den Wurzelstock gerichteten Wurzelteller, welcher sich kreisförmig und bis in eine Tiefe von ca. 40 cm ausbreitete und, wie beschrieben, das gesamte Volumen mit frischen Wurzeln durchzog (s. Abb. 42 b). Das gesamte dort erschlossene Volumen, errechnet über die Form eines Zylinders mit einem Radius von 1,6 m, erstreckte sich mit Ausnahme der Überschneidungen mit Nachbarpflanzen über insgesamt 2,0 m³.

Hinzu kamen die nach unten gerichteten Wurzeln, die bis in eine Tiefe von ca. 1,7 m reichten. Auch hier fanden sich über die gesamte Länge zahlreiche junge Wurzeln, die aus den verholzten Wurzeln entsprangen und diesen Bereich erschlossen. Insgesamt wurden hier über die Form eines Quaders mit einer Breite von 1,3 m, einer Tiefe von 1,2 m und einer Höhe von 1,3 m weitere 2,0 m³ an durchwurzeltem Bodenvolumen erfasst, sodass die Pflanze insgesamt über ein ausgedehntes Wurzelwerk von 4,1 m³ Volumen verfügte. Bezieht man dieses Volumen auf die nutzbare Feldkapazität von 13,5 Vol.-%, können insgesamt 553,5 Liter an potentiell pflanzenverfügbarem Wasser angerechnet werden, wenn man von Feldkapazität ausgeht.

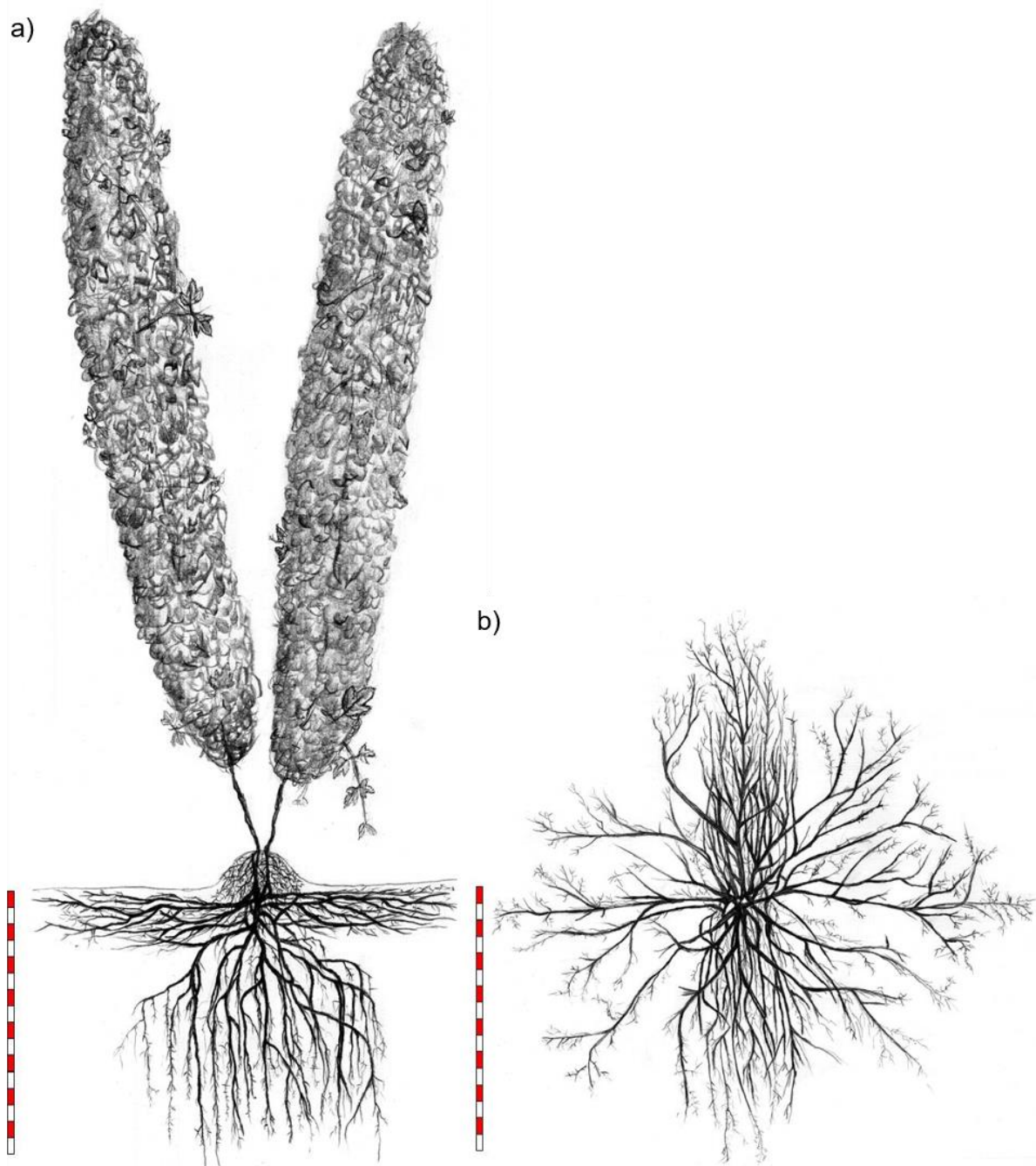


Abbildung 42: Morphologie des Wurzelsystems von *Humulus lupulus* cv. Herkules auf Sandboden. a) Transversalschnitt durch den Bifang. b) Aufsicht von oben. Das Bild zeigt die Wurzelausprägung einer fünf Jahre alten Hopfenpflanze mit einem durchschnittlichen Ertragspotential von 2800 bis 3500 kg/ha, welche im Sommer oberirdisch bewässert wurde. Insgesamt wurden drei Bereiche definiert. Der Bifang mit einjährigen jungen Wurzeln umfasst ein Bodenvolumen von $0,1 \text{ m}^3$. Der zweite Bereich, gebildet durch die horizontal verlaufenden lignifizierten Wurzeln und daraus entspringenden jungen Wurzeln, erfasst abzüglich des Volumens, welches mit Nachbarpflanzen geteilt wird, ein Volumen von $2,0 \text{ m}^3$. Die nach unten gerichteten Wurzeln, geometrisch als Quader definiert, und ebenfalls von mehrjährigen und jungen Wurzeln durchzogen, erreichen eine Tiefe von $1,7 \text{ m}$ und erschließen weitere $2,0 \text{ m}^3$ an Boden. Kumuliert ergibt sich ein Gesamtvolumen von $4,1 \text{ m}^3$, was bei einer Feldkapazität von $13,5 \text{ Vol.-%}$ $535,5 \text{ Liter}$ an theoretisch verfügbarem Wasser ergibt. Die Länge der Maßstäbe beträgt $1,6 \text{ m}$, wobei ein rotes bzw. weißes Rechteck je 10 cm entspricht.

3.3.2.2. Lehm Boden

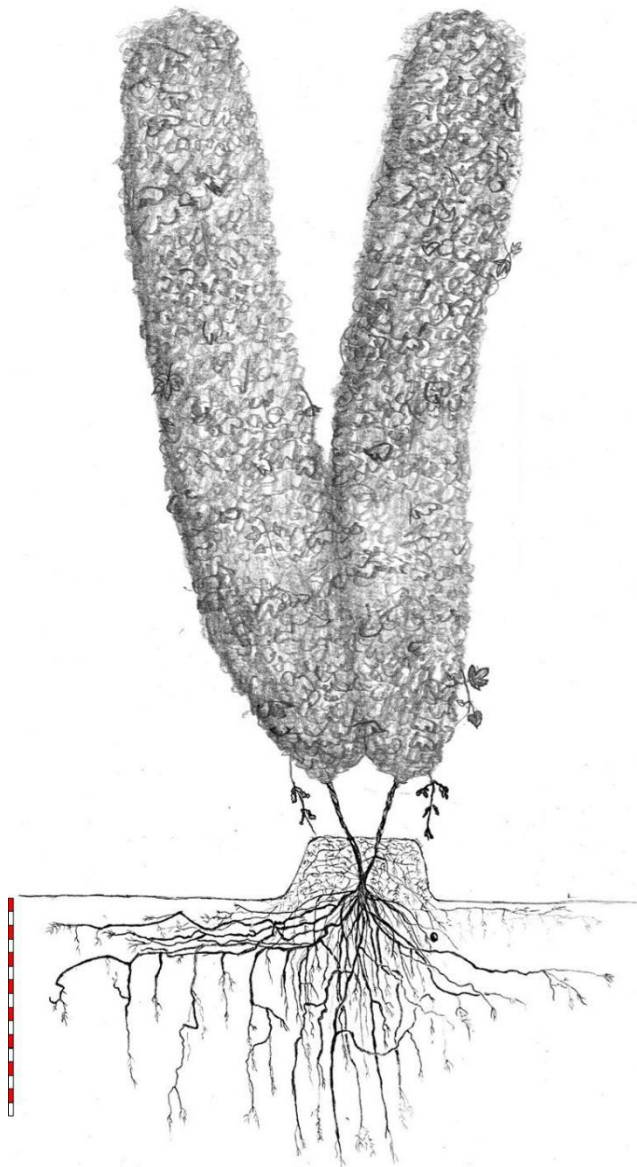


Abbildung 43: Morphologie des Wurzelsystems von *Humulus lupulus* cv. Herkules auf Lehm Boden. Transversalschnitt durch den Bifang. Das Bild zeigt die Wurzelausprägung einer fünf Jahre alten Hopfenpflanze mit einem durchschnittlichen Ertragspotential von 3740 bis 4000 kg/ha, welche unterirdisch in 30 cm Tiefe bewässert wurde. Insgesamt wurden drei Bereiche definiert. Der Bifang mit einjährigen jungen Wurzeln umfasst ein Bodenvolumen von $0,6 \text{ m}^3$. Der zweite Bereich, gebildet durch die horizontal verlaufenden lignifizierten Wurzeln und daraus entspringenden jungen Wurzeln, erfasst abzüglich des Volumens, welches mit Nachbarpflanzen geteilt wird, ein Volumen von $2,0 \text{ m}^3$. Die nach unten gerichteten Wurzeln, geometrisch als Quader definiert, und ebenfalls von mehrjährigen und jungen Wurzeln durchzogen, erreichten auf einer Breite von $2,1 \text{ m}$ eine Tiefe von $1,4 \text{ m}$ und erschließen weitere $3,7 \text{ m}^3$ an Boden. Kumuliert ergibt sich ein Gesamtvolumen von $6,6 \text{ m}^3$, was bei einer Feldkapazität von 19 Vol.-% 1254 Liter an theoretisch verfügbarem Wasser ergibt. Die Länge der Maßstäbe beträgt $1,6 \text{ m}$, wobei ein rotes bzw. weißes Rechteck je 10 cm entspricht.

Das Wurzelbild der fünfjährigen Hopfenpflanze der Sorte Herkules auf Lehm Boden (s. Abb. 43) glich in der Ausbreitung grundsätzlich der Wurzelmorphologie, die im Sandboden beschrieben wurde. Allerdings wurde hier insgesamt ein größeres Volumen an Boden erschlossen. Dabei konnten wieder die drei Bereiche Bifang, horizontal und vertikal verlaufende Wurzeln definiert werden, auch wenn die Abgrenzung nicht ganz so scharf wie am Sandboden war.

Der Bifang war vollständig von jungen Wurzeln durchzogen, welche hauptsächlich horizontal in Richtung der Reihe verliefen. Der angehäuften Bifang mit einer Länge von $1,6 \text{ m}$, einer Höhe von $0,4 \text{ m}$ und einer Breite von $1,0 \text{ m}$ ergab ein durchwurzeltes Bodenvolumen von $0,6 \text{ m}^3$.

Die horizontal verlaufenden Wurzeln waren in ihrer Ausprägung auf der nicht bewässerten Seite, in Abbildung 43 die linke Seite, stärker ausgeprägt als auf der bewässerten. Die horizontale Ausbreitung fand bis in einer Tiefe von 50 cm statt und reichte bis über die Fahrgassenmitte hinaus. Die längste horizontal verlaufende Wurzel wies eine Länge von über $2,0 \text{ m}$ auf. Bei einer Höhe von $0,4 \text{ m}$ und einem Radius von $1,6 \text{ m}$ errechnet sich für die horizontal verlaufenden Wurzeln ein Bodenvolumen von $2,0 \text{ m}^3$ exklusive der Überschneidung mit Nachbarpflanzen.

Die nach unten gerichteten Wurzeln zeigten keine so klare Abgrenzung, wie in 3.3.2.1.

3. ERGEBNISSE

beschrieben. So kam es an diesem Standort vor, dass auch von den horizontal verlaufenden Wurzeln vertikal gerichtete Wurzeln gebildet wurden, die in größerer Entfernung zum Rhizom einem nach unten gerichteten Wurzelwachstum folgten. Eine klare Abgrenzung war an diesem Standort schwieriger. Das durchwurzelte Volumen dieses Bereichs verlief über eine Breite von 2,1 m und dies über die gesamte Länge von 1,6 m bis zur nächsten Nachbarpflanze. Unterhalb der horizontal verlaufenden Wurzeln reichten die Wurzeln bis in eine Tiefe von 1,7 m, was eine räumliche Ausdehnung der vertikalen Wurzeln in Form eines Quaders von 4,0 m³ Volumen ergab.

Insgesamt konnte die untersuchte Pflanze ein Volumen von 6,6 m³ an Boden erschließen. Bei der vorherrschenden Bodenart mit einer nutzbaren Feldkapazität von 19 Vol.-% lag somit ein Reservoir von 1254 Litern an pflanzenverfügbarem Wasser bei Wassersättigung des Bodens vor.

3.3.3. Sorte Perle

3.3.3.1. Sandboden

Die morphologische Ausbreitung des Wurzelbilds der Sorte Perle auf Sandboden folgte ebenfalls der definierten Einteilung in die drei beschriebenen Bereiche. So grenzten sich hier der Bifang sowie die Bereiche der horizontal und vertikal verlaufenden Wurzeln klar voneinander ab (s. Abb. 44).

Der Bifang umfasste dabei mit einer Höhe von 0,4 m und einer Breite von 1,0 m ein Volumen von 0,3 m³. Auch hier verliefen die Wurzeln hauptsächlich in Richtung der Reihe, allerdings war der gesamte aufgeschüttete Bereich mit jungen Wurzeln durchzogen. Den Ursprung hatten die Wurzeln direkt an den nach oben wachsenden Sprossen. An den Enden fanden sich feine Wurzelhaare. Die horizontal verlaufenden Wurzeln bildeten einen zylinderförmigen Wurzelteller mit einem Radius von 1,6 m um den Wurzelstock (s. Abb. 44 b). Dieser befand sich in einer Tiefe bis zu etwa 0,4 m und summiert sich unter Berücksichtigung der Nachbarpflanzen auf ein Volumen von 2,0 m³ auf.

Die nach unten verlaufenden Wurzeln endeten in einer Tiefe von ca. 1,4 m. Nach links und rechts erreichte die Ausdehnung eine Breite von 1,5 m. Das gleiche Ausmaß konnte in der Tiefe festgestellt werden, sodass sich ein Volumen von 2,2 m³ für diesen Bereich ergab.

Insgesamt durchwurzelt die Pflanze somit ein Bodenvolumen von 4,5 m³. Bei einer nutzbaren Feldkapazität von 13,5 Vol.-% ergeben sich somit 607,5 Liter an pflanzenverfügbarem Wasser bei Feldkapazität.

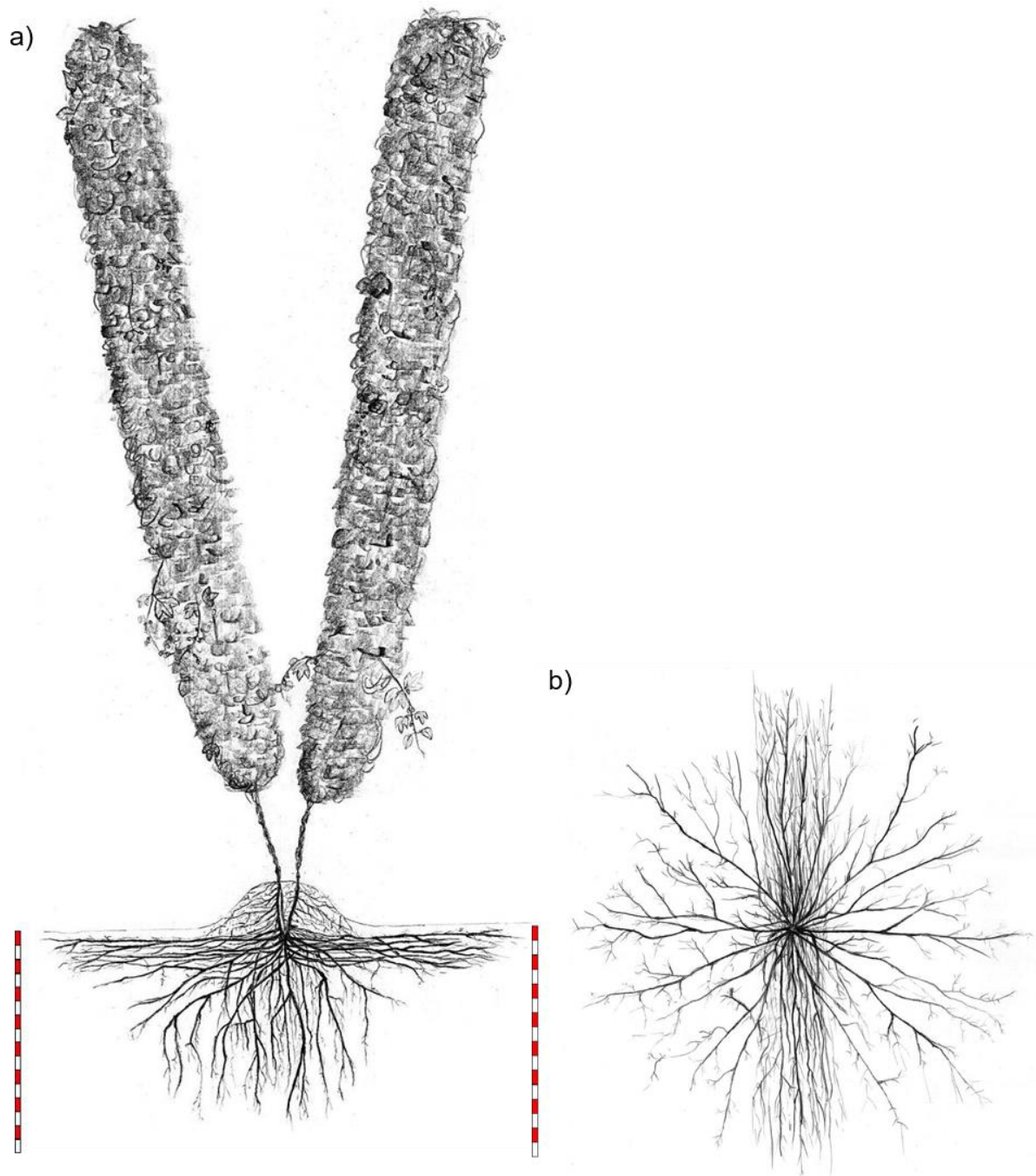


Abbildung 44: Morphologie des Wurzelsystems von *Humulus lupulus* cv. Perle auf Sandboden. a) Transversalschnitt durch den Bifang. b) Aufsicht von oben. Das Bild zeigt die Wurzelausprägung einer sechs Jahre alten Hopfenpflanze, welche im Sommer oberirdisch bewässert wurde und ein durchschnittliches Ertragspotential von 1800 bis 2200 kg/ha aufweist. Insgesamt wurden drei Bereiche definiert. Der Bifang mit einjährigen jungen Wurzeln umfasst ein Bodenvolumen von 0,3 m³. Der zweite Bereich, gebildet durch die horizontal verlaufenden lignifizierten Wurzeln und daraus entspringenden jungen Wurzeln, erfasst abzüglich des Volumens, welches mit Nachbarpflanzen geteilt wird, ein Volumen von 2,0 m³. Die nach unten gerichteten Wurzeln, geometrisch als Quader definiert und ebenfalls von mehrjährigen und jungen Wurzeln durchzogen, erreichen eine Tiefe von 1,4 m und erschließen weitere 2,2 m³ an Boden. Kumuliert ergibt sich ein Gesamtvolumen von 4,5 m³, was bei einer Feldkapazität von 13,5 Vol.-% 607,5 Liter an theoretisch verfügbarem Wasser ergibt. Die Länge der Maßstäbe beträgt 1,6 m, wobei ein rotes bzw. weißes Rechteck je 10 cm entspricht.

3.3.3.2. Lehmboden

3.3.3.2.1. Unbewässerte Pflanze, Alter 4 Jahre

Die Teilausgrabungen der Wurzeln der beiden unterschiedlich behandelten Hopfenpflanzen der Sorte Perle auf Lehmboden verliefen ohne Schwierigkeiten und zeigten ebenso wie die Totalausgrabungen den Verlauf der Wurzeln auf. Dabei unterschieden sich die gefundenen Wurzelbilder stark in ihrer Ausbreitung im Boden (s. Abb. 45).

Die unbewässerte Pflanze erreichte enorme Ausmaße sowohl in horizontaler als auch vor allem in vertikaler Wuchsrichtung (s. Abb. 45 a), obwohl diese mit einem Alter von vier Jahren zwei Jahre weniger Zeit für das Wachstum hatte als die Vergleichspflanze.

Dabei konnten die drei Bereiche Bifang, horizontal verlaufende und nach unten gerichtete Wurzeln klar voneinander unterschieden werden. Allerdings waren auch hier, wie schon bei der Grabung auf Lehmboden in 3.3.2.2., die Grenzen etwas ungenauer. Dies zeigte sich in Wurzeln, die noch in weiter Entfernung zum Stock eine Wachstumsänderung in vertikaler Richtung vornahmen. Teilweise konnte hier sogar nach oben gerichtetes Wachstum bzw. Wachstum in Kurvenform beobachtet werden. Die horizontalen Wurzeln verliefen dabei hauptsächlich in einer Tiefe von 20 bis 60 cm und erreichten ebenfalls Längen von über 1,6 m, was bedeutet, dass die Wurzeln über die Fahrgassenmitte hinaus in den Bereich der Nachbarreihe wuchsen. Bei einer Höhe von 40 cm und einem Radius von 1,6 m ergab sich für die horizontal verlaufenden Wurzeln, unter der Berücksichtigung geteilter Bereiche mit Nachbarpflanzen, ein Volumen von ca. 2,0 m³.

Im Bifang wuchsen die Wurzeln in alle Richtungen. Dabei erschlossen sie den gesamten Bifang auf einer Länge von 1,6 m (Entfernung zwischen den Stöcken). Mit einer Höhe von 40 cm und einer Breite von 60 cm, wurde für diesen Bereich ein Volumen ca. 0,2 m³ errechnet.

Nach unten konnten mehrere Wurzeln bis in Tiefen von über 2,4 m verfolgt werden. Eine Wurzel reichte sogar bis in eine Tiefe von 3,7 m. Diese Wurzeln erreichten im Durchmesser Größen von über 1 cm. Des Weiteren konnten in allen Abschnitten junge Wurzeln beobachtet werden, die aus den mehrjährigen Wurzeln entsprangen. Bei einer angesetzten Höhe von 2,0 m und einer Ausbreitung von 1,6 m in der Tiefe und der Breite errechnet sich ein durchwurzeltes Bodenvolumen der vertikal gerichteten Wurzeln von 5,1 m³, sodass die gesamte Pflanze ein Bodenvolumen von ca. 7,4 m³ erschließt. Somit ergibt sich bei Feldkapazität ein potentiell Reservoir von 1480 Litern an pflanzenverfügbarem Wasser.



Abbildung 45: Morphologie des Wurzelsystems von *Humulus lupulus* cv. Perle auf Leimboden a) unbewässert, Alter 4 Jahre: Die bewässerte Pflanze konnte in drei Bereiche (Bifang, horizontale und vertikale Wurzeln) unterteilt werden. Diese erreichten kumuliert ein Volumen von 7,4 m³. Dabei waren alle Bereiche von jungen Wurzeln durchzogen. Unterhalb der Schneidsohle bildeten die mehrjährigen Wurzeln das typische Wurzelbild. b) unterirdisch in einer Tiefe von 30 cm mittels Tröpfchenbewässerung bewässert, Alter 6 Jahre. Insgesamt war das Wachstum der Wurzeln sehr gestört. Sie litten stark unter sog. Stockfäule, welche durch Staunässe und Sauerstoffmangel begünstigt wird. Somit war hier keine klare Abgrenzung zwischen den Wurzeln (in Wachstumsrichtungen) erkennbar. Das errechnete Volumen erreichte ein Ausmaß von 2,2 m³. Die Standorte waren 20 m voneinander entfernt und wurden laut Angaben des Landwirtes bis auf die Bewässerung gleich behandelt. Die Länge der Maßstäbe beträgt 1,6 m, wobei ein rotes bzw. weißes Rechteck je 10 cm entspricht.

3. ERGEBNISSE

3.3.3.2.2. *Bewässerte Pflanze, Alter 6 Jahre*

Bei der unterirdisch bewässerten Pflanze fand sich ein sehr verkümmertes Wurzelbild vor (s. Abb. 45 b). Eine Unterteilung in die drei beschriebenen Bereiche war nicht möglich. Vielmehr schien es, als ob die Wurzeln strahlenförmig aus dem Rhizom in alle Richtungen wuchsen und nur in wenigen Fällen Bereiche, die weiter als 50 cm entfernt waren, erschlossen werden konnten. Dabei fiel vor allem der Bereich der horizontal verlaufenden Wurzeln weg. Die Wurzeln waren darüber hinaus von verkümmertem Wachstum und zum Teil von Verfaulung (sog. Stockfäule) geprägt. Dabei fielen über die Gesamtlänge abwechselnd starke Verdickungen und Einengungen des Gewebes an manchen Bereichen auf. Des Weiteren waren die Wurzeln an vielen Stellen sehr gestaucht, was ein verkrümmtes Wurzelwachstum zur Folge hatte.

Auf der Höhe des vergrabenen Tropfschlauchs (Abb. 45 b, angedeutet durch einen Punkt auf der rechten Seite in 30 cm Tiefe neben dem Bifang) konnten keine Unterschiede zum entgegengesetzten Bereich ohne Bewässerung festgestellt werden. Vielmehr wuchsen die Wurzeln an der Bewässerung vorbei und erschlossen auf dieser Seite gleich viele Bereiche, wie auf der Seite ohne Bewässerung.

Der Bereich der vertikal verlaufenden Wurzeln war in seiner Ausbreitungsmöglichkeit sehr eingeschränkt. So erreichten die Wurzeln dort eine maximale Tiefe von 1,4 m. Dabei erreichten die Wurzeln nur sehr geringe Durchmesser von unter 1,0 cm. In die Breite und in die Tiefe wuchsen die Wurzeln mit Ausmaßen von je ca. 1,2 m, sodass dieser Bereich ein Bodenvolumen von ca. 2,0 m³ ausmachte.

Der Bifang war der einzige Bereich, in dem die Wurzeln, wie gewohnt, ein starkes Wachstum aufwiesen. So war dies der einzige Bereich der untersuchten Pflanze, wo ein normales Wachstum der Wurzeln beobachtet werden konnte. Das Ausmaß von einer Breite von ca. 60 cm, einer Höhe von 40 cm und die Länge des Bifangs bis zur anstehenden Nachbarpflanze mit 1,6 m ergeben für diesen Bereich ein zusätzliches Volumen von ca. 0,2 m³.

Somit erreichte die Pflanze ein durchwurzelttes Bodenvolumen von ca. 2,2 m³, was bei Feldkapazität einer Wasserverfügbarkeit von 440 Litern entspricht.

3.4. RETROSPEKTIV ERSTELLTE WASSERBILANZEN IN DER HALLERTAU

3.4.1. Verdunstungsraten ET_0

Abbildung 46 gibt die Verdunstungsraten ET_0 nach Penman-Monteith der sechs Wetterstationen Eschenhart, Hüll, Dietrichsdorf, Stadelhof, Sandharlanden und Baumannshof der Hallertau für das Trockenjahr 2003 und die Jahre des Projektes 2012 bis 2015 wieder. Dabei zeigt die x-Achse die Vegetationsperiode von Hopfen vom 01. Mai bis 15. September. Die y-Achse gibt die Verdunstung ET_0 in mm aus.

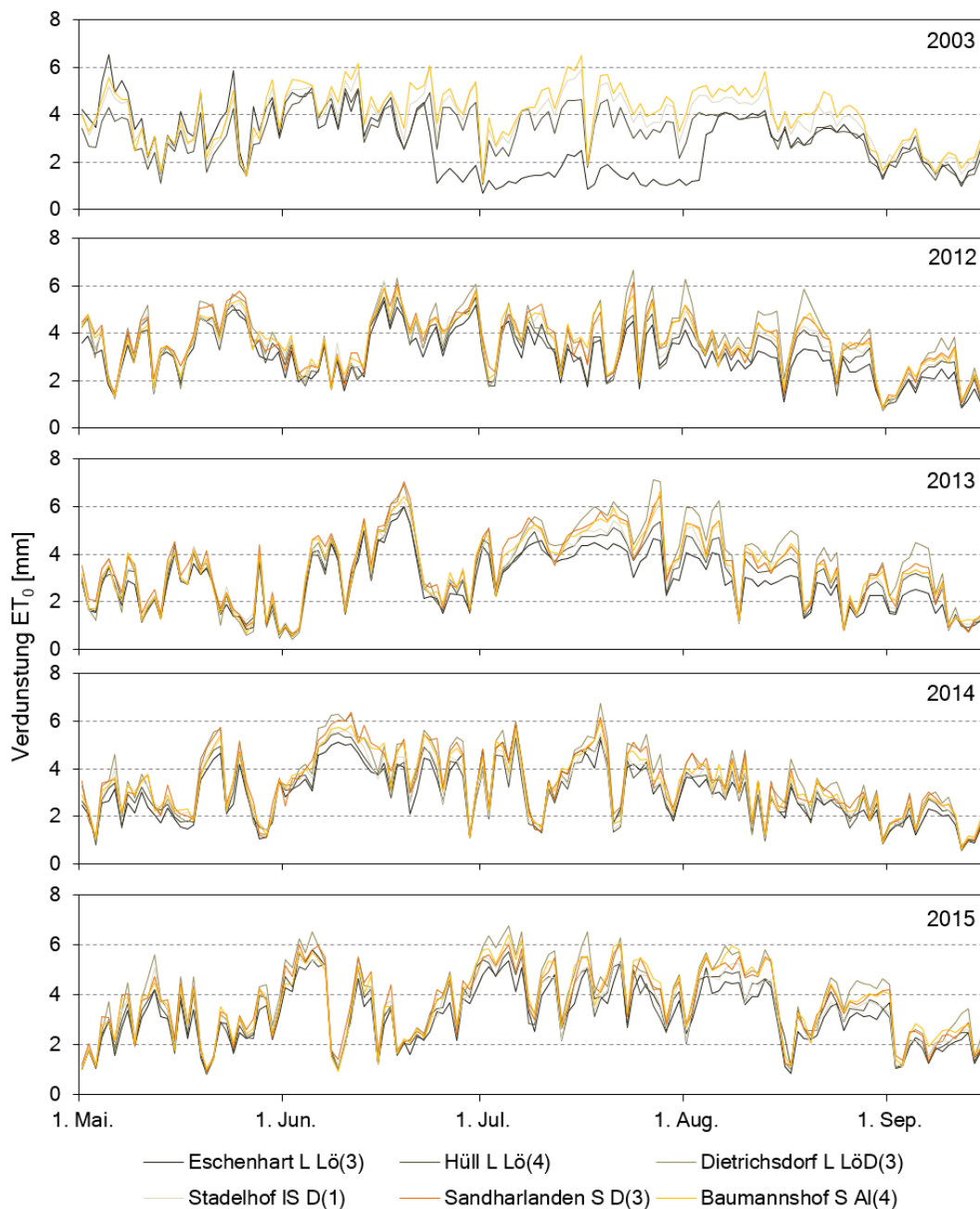


Abbildung 46: Verdunstungsrate ET_0 über Gras nach Penman-Monteith, ausgegeben an den Wetterstationen Eschenhart, Hüll, Dietrichsdorf, Stadelhof, Sandharlanden und Baumannshof für die Jahre 2003 und 2012 bis 2015. Hinter den Namen der Wetterstationen sind die Bodenarten mit Entstehungsart und Zustandsstufe aufgetragen. Man erkennt mit wenigen Ausnahmen, dass die Verdunstungsraten in der Hallertau identisch verlaufen. Für das Jahr 2003 liegen keine Daten für die Wetterstationen Dietrichsdorf und Sandharlanden vor.

3. ERGEBNISSE

Man erkennt, dass die Verdunstungsraten der einzelnen Standorte in den Jahren relativ identisch verlaufen und maximale Abweichungen von ca. 1 mm zwischen den Standorten vorkommen. Eine einzige Ausnahme bildet dabei die Wetterstation Eschenhart im Jahr 2003. Dort waren zeitweise Differenzen von 3 mm zur Wetterstation Baumannshof erkennbar. Dies lag an besonderen klimatischen Bedingungen, die in diesem Jahr in der Region um Eschenhart herrschten. So kam es dort zu Niederschlägen, verbunden mit stärkerer Bewölkung, welche einen negativen Einfluss auf die Verdunstungsraten mit sich zog, die in diesem Jahr zu den besonderen Abweichungen führten. Man erkennt für diese Station das besondere Klima im Vergleich zu den übrigen Stationen auch daran, dass hier fast in allen Jahren die geringsten Verdunstungswerte herrschten.

Des Weiteren liegen die Verdunstungsraten an den einzelnen Standorten zu Beginn der jeweiligen Anbauphase im Mai bei ca. 2 bis 4 mm, was abhängig von der Witterung ist. Zwischen Anfang Juni und Mitte August schwanken die Werte zwischen 2 und 6 mm. Eine Ausnahme bildet die Wetterstation Dietrichsdorf im Jahr 2013. Hier wurden am 27. und 28. Juli sogar Werte von 7,1 mm errechnet. Wenige Tage zuvor, Mitte Juli, lagen die Werte der einzelnen Stationen teilweise stark auseinander, was ebenfalls auf wechselnde Wetterverhältnisse in der Region Hallertau in dieser Zeit schließen lässt.

Ab Mitte August fielen die Verdunstungswerte im Schnitt wieder ab und erreichten an allen Wetterstationen nur noch Verdunstungswerte von ca. 4 mm. Einen Monat später, zur Hopfen-ernte Mitte September, waren dann meist nur noch sehr geringe Verdunstungswerte von ca. 2 mm zu verzeichnen.

3.4.2. Verdunstungsraten für Hopfen ET_{Hopfen}

Die Verdunstungswerte für Hopfen ET_{Hopfen} schwankten zwischen minimal 264,4 mm am Standort Eschenhart im Jahre 2003 und maximal 422,9 mm am Standort Dietrichsdorf im Jahre 2015 (s. Tab. 14). Dies war auch gleichzeitig der Standort mit den für die Jahre höchsten Verdunstungswerten für Hopfen. Die geringsten Werte traten, mit Ausnahme des Jahres 2014, in Eschenhart auf. Im Jahr 2014 wurden die geringsten Verdunstungswerte mit 317,1 mm in Hüll verzeichnet.

Tabelle 14: Kumulierte Verdunstung von Hopfen ET_{Hopfen} [mm] in der Hallertau für die Vegetationszeit 01.Mai bis 15. September der Jahre 2003 und 2012 bis 2015. Als Berechnungsgrundlage wurden die mittels der Stationen ausgegebenen Verdunstungswerte ET_0 sowie die vorgeschlagenen Korrekturfaktoren der FAO nach Allen *et al.* (1998) verwendet. Für das Jahr 2003 liegen keine Daten für die Wetterstationen Dietrichsdorf und Sandharlanden vor.

| Standort | Verdunstungswerte ET_{Hopfen} [mm] | | | | |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 2003 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| Eschenhart L Lö(3) | 264,4 | 327,0 | 320,1 | 318,4 | 346,6 |
| Hüll L Lö(4) | 347,5 | 352,2 | 353,0 | 317,1 | 368,0 |
| Dietrichsdorf L LöD(3) | - | 410,5 | 414,0 | 373,6 | 422,9 |
| Stadelhof S D(3) | 408,1 | 379,8 | 374,9 | 334,0 | 379,3 |
| Sandharlanden S D(3) | - | 396,0 | 396,5 | 368,1 | 404,8 |
| Baumannshof S AI(4) | 437,7 | 394,5 | 391,2 | 358,1 | 412,6 |

3.4.3. Pflanzenverfügbares Wasser bei unterschiedlichen Bodenarten

Ausgehend von den Verdunstungen der in Abbildung 46 dargestellten Verdunstungsraten an sechs Standorten der Hallertau, wurde das pflanzenverfügbare Wasser [%] für Hopfen mit den Korrekturfaktoren der FAO in Abhängigkeit der jeweiligen Bodenart und der vor Ort gefallenen Niederschläge für eine Wurzeltiefe von 1 m errechnet. Für Hopfen ausschlaggebend ist dabei die Vegetationsphase von Mai bis Mitte September.

Dabei erkennt man in Abbildung 47 einerseits, wie unterschiedlich stark die verschiedenen Bodenarten über die Saison austrocknen, und andererseits, wie sich die einzelnen Anbaujahre hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit unterschieden haben.

Gerade die Standorte mit lehmigen Böden (Eschenhart, Hüll, Dietrichsdorf und Stadelhof), im Schaubild als braune Linien gekennzeichnet, trockneten langsamer aus als die Sandböden (Sandharlanden und Baumannshof), im Schaubild orange unterlegt. Vor allem in den heißen und trockenen Jahren 2003, 2013 und 2015 wird deutlich, wie schnell die Sandböden rechnerisch kein Wasser mehr zur Verfügung hatten.

So waren am Standort Baumannshof jährlich bereits spätestens im Juli die Vorräte an Wasser erschöpft. Ähnlich verhielt es sich für die Wetterstation Sandharlanden. In der Region dieser Wetterstation waren im Jahr 2012 zum 01. August, im Jahr 2013 bereits Mitte Juli, 2014 im ersten Monatsdrittel des Monats August und im Jahr 2015 bereits im letzten Drittel des Monats Juli die Wasserreserven für Hopfen erschöpft. Zwar fielen an beiden Standorten nach der Austrocknung nochmals Niederschläge, sodass rechnerisch wieder höhere Werte für das PVW erreicht wurden, doch stiegen diese nur selten und dann meist auch nur für kurze Perioden auf 60 % an.

3. ERGEBNISSE

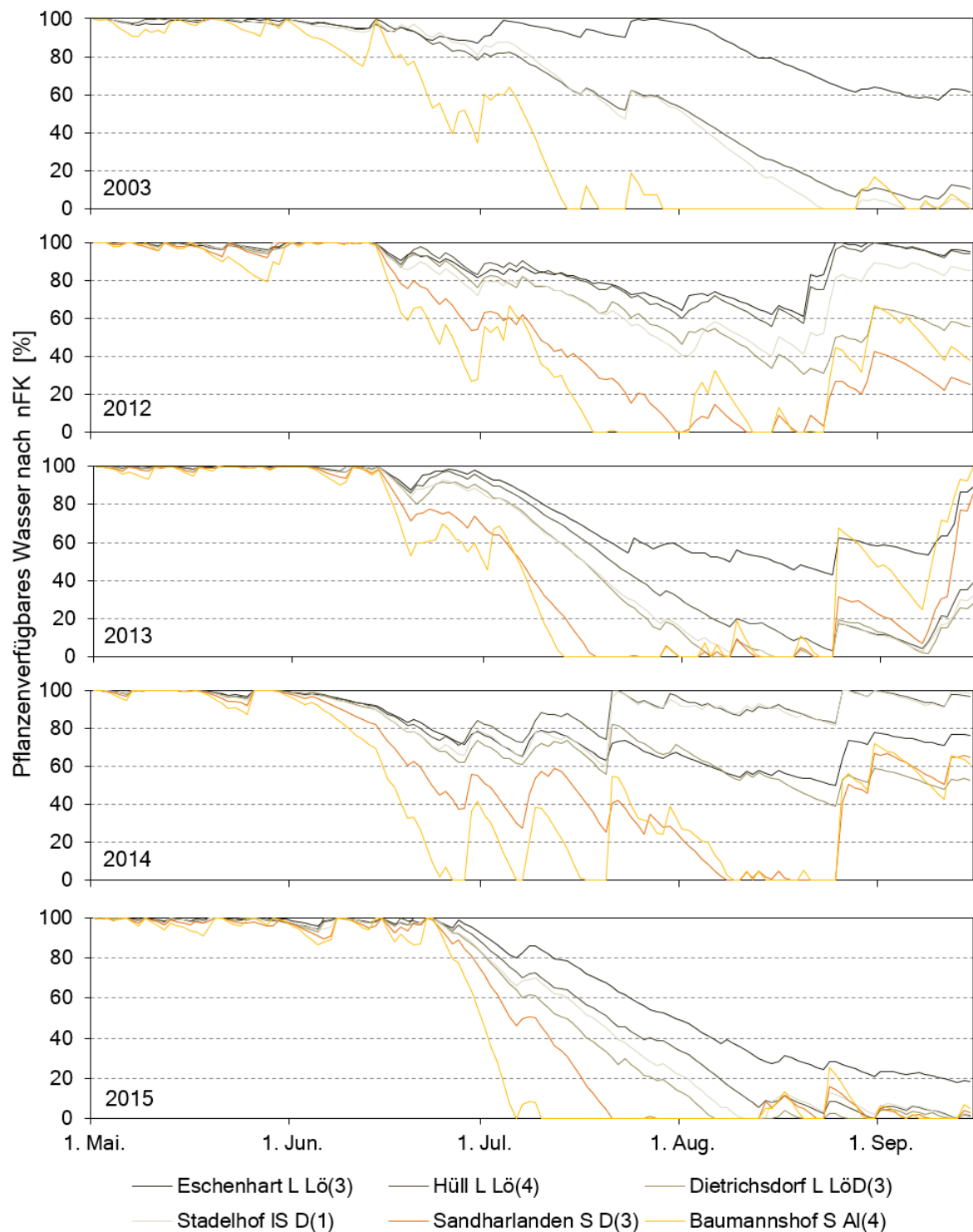


Abbildung 47: Pflanzenverfügbares Wasser der einzelnen Standorte für die Jahre 2003 und 2012 bis 2015 ermittelt nach ET_{Hopfen} und angepasst an die jeweilige Bodenart bei 1 m Wurzeltiefe. In jeder Berechnung wurde die vor Ort erhaltene Wasserbilanz, also die Summe aus den gefallen Niederschlägen und $ET_0 \times K_c\text{-Hopfen}$, mit Werten der FAO berücksichtigt und über die Saison für Hopfen ausgegeben. Als Startwert wurde von 100 % nFK ausgegangen. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass der Boden nicht mehr als 100 % und weniger als 0 % erreichen kann und dass die Pflanzen die Transpiration unabhängig vom PVW nicht verändern. Für das Jahr 2003 liegen keine Daten für die Wetterstationen Dietrichsdorf und Sandharlanden vor.

Anders verhielt es sich auf den Standorten mit Lehmböden. Während am Standort Eschenhart die Werte nur im Jahr 2015 ab 06. August Minimalwerte unter 40 % erreichten, war hier rein rechnerisch in allen Jahren mehr als 60 % an PVW im Boden vorhanden. In den Jahren 2012 und 2014, in denen durchschnittlich viel Niederschlag fiel, zeigt sich eine klare Abgrenzung zwischen den Bodenarten Sand und Lehm. Hier erreichten nur die Werte der Station Dietrichsdorf im Jahr 2012 minimale Werte knapp über 30 % am 20. August, während alle anderen Standorte mit lehmigen Böden stets darüber blieben.

Darüber hinaus wird deutlich, wie stark eine Beeinträchtigung auf den Hopfenbau in den Jahren 2003 und 2015 stattgefunden hat. In diesen Jahren kam es an allen Standorten zu starken Abfällen des pflanzenverfügbaren Wassers, was nur mit geringen Niederschlägen zeitweise unterbrochen wurde. Vor allem 2015 wird die Unterschiedlichkeit in der Wasserhaltefähigkeit der verschiedenen Bodenarten klar deutlich. Während zuerst die Sandbodenstandorte kein Wasser mehr zur Verfügung hatten, trockneten auch die Lehmböden nach und nach vollständig aus, mit Ausnahme des Standortes Eschenhart.

Man erkennt zudem, wie sich die drei unterschiedlichen Korrekturfaktoren auf das PVW auswirken. Meist sind die Böden bis Mitte, teilweise sogar bis Ende Juni weitestgehend wassergesättigt. Erst mit Einsetzen des höheren Korrekturfaktors, mit einem Sprung von 0,3 auf 1,05 am 16. Juni, kam es zu einer rechnerischen starken Abnahme des PVW an den einzelnen Standorten. Ende August wird dieser Abfall wieder etwas verlangsamt. Zu diesem Zeitpunkt wird der Korrekturfaktor von Hopfen wieder auf 0,85 reduziert. Allerdings fielen in dieser Periode in den untersuchten Jahren ohnehin meist ausreichend Niederschläge, sodass diese Korrekturveränderung nicht so deutlich erkennbar wird wie die vorhergehende.

3.4.4. Simulation einer optimalen Bewässerung

Ausgehend vom PVW der einzelnen Standorte wurden Bewässerungsszenarien simuliert, in denen der Wasservorrat der einzelnen Standorte nach Erreichen des Schwellenwertes von 60 % PVW, abhängig vom jeweiligen Wasserhaltevermögen der Böden, wieder auf 90 % aufgefüllt wurde (Abb. 48 und Tab. 15).

Abbildung 48 gibt exemplarisch den Wasserverlauf auf der y-Achse für die Standorte Hüll und Baumannshof, mit den dafür benötigten Bewässerungsmengen [mm] auf der sekundären y-Achse im Zeitraum 01. Mai bis 15. September an. In Tabelle 15 sind die erforderlichen Gesamtmengen [mm] und in Klammer die die dafür notwendigen Frequenzen der Bewässerungsgaben für alle Standorte aufgelistet. Dabei zeigen sich starke Differenzen der benötigten Bewässerungsmengen über die verschiedenen Regionen und Bodenarten der Hallertau.

3. ERGEBNISSE

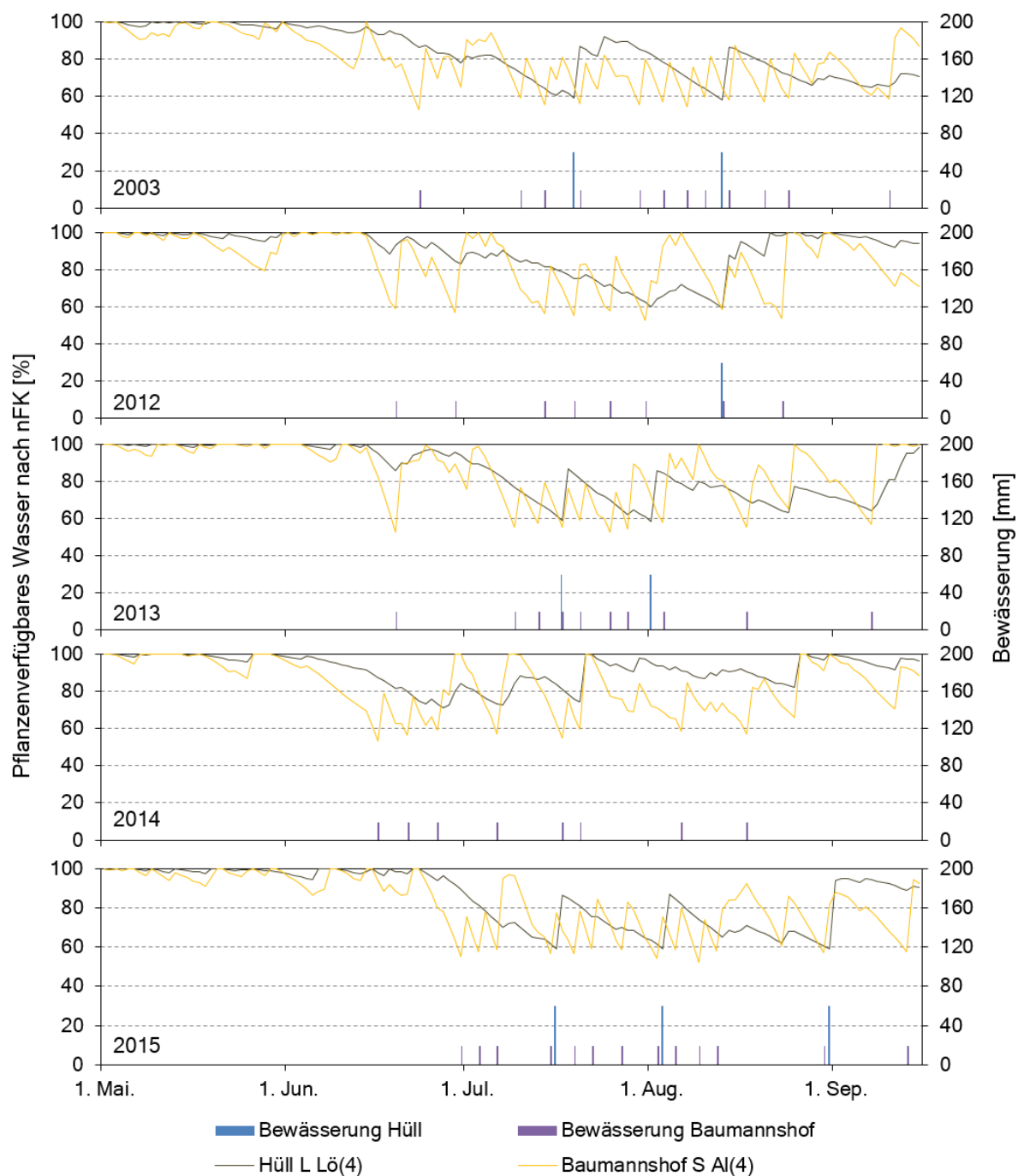


Abbildung 48: Simulation einer optimalen Bewässerung mit Auffüllen der Bodenschicht von 60 % auf 90 % nFK an den Standorten Hüll und Baumannshof. Ausgehend von der vorherrschenden Witterung wurde für die Jahre 2003 und 2012 bis 2015 eine optimale Bewässerung simuliert. Die genauen errechneten Bewässerungsmengen und die Simulation an den übrigen Stationen sind der Tabelle 15 zu entnehmen.

Tabelle 15: Simulierte Bewässerungsmengen ausgehend von der vorherrschenden Witterung und davon ausgehenden Wasserbilanzen in den Jahren 2003 und 2012-2015 an den Wetterstationen der Hallertau. Als Korrekturfaktor dienten die Werte nach Allen *et. al* (1998). Es wurde eine Bewässerung mit einem Auffüllen der Bodenwasservorräte von 60 auf 90 % nFK simuliert. Dargestellt ist die Gesamtmenge mit der Frequenz pro Jahr sowie die abhängig von der Bodenart benötigte Wassermenge je Gabe in mm.

| Standort | Gesamtmenge [mm] Bewässerung (und Frequenz) | | | | | mm je Gabe |
|-------------------------------|---|---------|----------|---------|----------|---------------|
| | 2003 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | |
| Eschenhart L Lö(3) | 68 (1) | 0 (0) | 68 (1) | 68 (1) | 135 (2) | 67,7 |
| Hüll L Lö(4) | 120 (2) | 60 (1) | 120 (2) | 0 (0) | 180 (3) | 59,9 |
| Dietrichsdorf L LöD(3) | - | 57 (1) | 170 (3) | 113 (2) | 227 (4) | 56,6 |
| Stadelhof S D(3) | 163 (3) | 54 (1) | 163 (3) | 0 (0) | 163 (3) | 54,3 |
| Sandharlanden S D(3) | - | 102 (3) | 204 (6) | 136 (4) | 204 (6) | 34,1 |
| Baumannshof S Al(4) | 231 (12) | 154 (8) | 193 (10) | 154 (8) | 251 (13) | 19,3 |

So wäre im Jahr 2012 in Eschenhart und im Jahr 2014 in Hüll und in Stadelhof nach diesen Simulationen gar keine Bewässerung nötig gewesen, während in Baumannshof sogar 8 bis 13 Mal eine Bewässerung mit einer Gabe von jeweils 19,3 mm, also insgesamt ca. 154 bis hin zu 251 mm, gefordert worden wäre (s. Abb. 48 und Tab. 15).

In Eschenhart mit einer nutzbaren Feldkapazität von 22,6 Vol.-% (vgl. Tab. 6) war demnach zwar am meisten Wasser gespeichert, im Falle einer Auffüllung dieses Speichers von 60 auf 90 %, wären, mit jeweils 67,7 mm, allerdings auch enorm hohe Mengen an Wassergaben notwendig gewesen. Dabei hängen die geforderten Gaben je Bewässerungsvorgang ausschließlich von der nutzbaren Feldkapazität des jeweiligen Bodens ab und sinken mit dieser entsprechend (s. Tab. 15).

Am Standort Baumannshof mit einer nFK von 6,43 Vol.-% sind demnach Gaben von 19,3 mm nötig, um die geforderte Auffüllung zu erreichen. Im Durchschnitt liegen die Gaben gerade bei den in der Hallertau häufig vorhandenen Lehmböden bei über 50 mm je Gabe.

4. DISKUSSION

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der Frage, inwieweit sich eine zusätzliche Bewässerung in Form von Tröpfchenbewässerung auf den Ertrag und den Gehalt am wertgebenden Inhaltsstoff Alphasäure in Deutschland, speziell im größten Hopfenanbaugebiet der Welt, der Hallertau, auswirkt und ob eine Aussage über die optimale Positionierung der Tropfschläuche getroffen werden kann.

Im Freiland wurde dabei unter Realbedingungen in vier Anbaujahren (2012 bis 2015) der Einfluss in unterschiedlichen Feldversuchen erforscht. Dabei wurde auch geprüft, ob sich induzierter Trockenstress positiv auf den sekundären Pflanzenstoff Alphasäure auswirkt. In einem dritten Versuch wurde von der gängigen Praxis, die Kultur mit täglich kleinen Gaben zu bewässern, abgewichen und untersucht, wie sich die Beregnung in höheren Gaben, allerdings mit Pausen zwischen den Applikationen, auf den Ertrag auswirkt. Außerdem wurde der Frage nachgegangen, wie sich eine Bewässerung von Hopfen automatisch steuern lässt. Hierzu wurden bereits vorgeschlagene Methoden getestet, die einerseits auf Sensormessungen und andererseits auf klimatischen Wasserbilanzierungen basierten.

Um einen Einblick in den Bewässerungseinfluss auf die Physiologie des Hopfens zu erlangen, wurde dieser anhand von Gaswechsellmessungen überprüft und statistisch auf Zusammenhänge mit meteorologischen Parametern geschlossen. Eine Extrapolation der ermittelten Transpirationswerte sollte den tatsächlichen Wasserverbrauch abschätzen und in Vergleich zu errechneten Modellen stellen.

Anhand von morphologischen Untersuchungen der Rhizosphäre an den Sorten Herkules und Perle wurden die vorhandenen Wasserreserven, aus denen Hopfen schöpfen kann, quantifiziert und so Grundlagen über den Phänotyp der Wurzel geschaffen, die für die Beantwortung einer optimalen Bewässerung wichtig sind.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde in retrospektiv angestellten Wasserbilanzrechnungen für verschiedene Standorte der Hallertau gezeigt, wie die Wasserverfügbarkeit in den letzten Jahren während der Saison ausgesehen hat.

In diesem Kapitel wird auf die Beobachtungen und deren Implikationen eingegangen und dabei ökologische Begründungen im empirischen Sinne diskutiert, wobei die im vorausgehenden Kapitel beschriebenen Ergebnisse wieder aufgegriffen und in einen allgemeinen wissenschaftlichen Kontext gestellt werden.

4.1. FELDVERSUCHE ZUR TÖPFCHENBEWÄSSERUNG

4.1.1. Einfluss auf den Ertrag und die Qualität von Hopfen

In vier Anbaujahren (2012 bis 2015) wurden dreizehn Bewässerungsversuche durchgeführt und ausgewertet. Elf Versuche wurden an der Bittersorte Herkules und zwei Versuche an der Aromasorte Perle durchgeführt. Der Versuch in Karpfenstein im Jahr 2013 wurde aufgrund eines Hagelschadens und damit verbundener Abweichung in der Ertragsermittlung (vgl. 2.1.1.9.1.) nur als bedingt repräsentativ angesehen.

Im Jahr 2015, welches im langjährigen Mittel als sehr trocken anzusehen ist, wurde auf Sandboden eine Ertragssteigerung von 35 % zwischen der unbewässerten Kontrolle und der Variante AB_intensiv festgestellt. Auch die Parzellen mit unterirdisch verlegtem Tropfschlauch, NB_intensiv und ZB_intensiv, erzielten 34 % und 29 % mehr Ertrag als die unbewässerte Variante. Die applizierte Wassermenge belief sich in allen Behandlungen auf 212,6 mm, während Niederschläge von insgesamt 269 mm verzeichnet wurden. Dies war das einzige Ergebnis, das eine klare Ertragserhöhung in Abhängigkeit von künstlich verabreichtem Wasser aufzeigte. Allerdings konnte im Jahr 2013, das mit sehr niederschlagsarmen Wochen in der Hauptwachstumszeit (vgl. 3.1.1.1. und 3.1.3.1.2.) ebenfalls als sehr trocken galt, in vier Bewässerungsversuchen kein Einfluss ermittelt werden. Auch in Hirnkirchen wurde im Jahr 2015 mit ebenfalls sehr geringen Niederschlägen kein signifikant erhöhter Ertrag in allen Varianten im Vergleich zur unbewässerten Kontrolle festgestellt (vgl. 3.1.4.3.).

In Bezug auf die Alphasäure wurde in drei Fällen ein positiver Einfluss durch die zusätzliche Bewässerung registriert.

An der Sorte Perle konnte gezeigt werden, dass sich Trockenstress in den letzten vier Wochen der Anbauzeit negativ auf die Akkumulation der Alphasäure auswirkte (vgl. Stampfl, 2013). Allerdings konnte dies im darauffolgenden Jahr mit gleichem Versuchsdesign nicht bestätigt werden. Dies widerlegt die Hypothese, dass der sekundäre Pflanzenstoff durch Trockenstress eine Steigerung erfährt.

Auf Lehmboden wurde im Jahr 2014 an der Sorte Herkules mit einer Gabe von 138,9 mm eine Erhöhung der Alphasäure von 18,9 % auf 19,8 % in der Variante AB150 erreicht.

Auch im Versuch des Jahres 2015 auf Sandboden, in dem eine Ertragssteigerung durch Bewässerung festgestellt wurde, konnte ein erhöhter Alphasäuregehalt in allen bewässerten Varianten festgestellt werden. Dabei wurden Erhöhungen von bis zu 2,5 % - Punkten ermittelt. Die Ergebnisse decken sich mit früheren Studien in Deutschland zur Bewässerung im Hopfenbau. So konnte in Bayern nur in vereinzelt Jahren ein positiver Einfluss der

4. DISKUSSION

Bewässerung auf den Ertrag und die Qualität von Hopfen festgestellt werden (LBP 2002 und 1981; Zattler und Maier, 1969). In Langzeitversuchen auf dem Hopfenversuchsfeld der Hopfenanbauregion Tettngang am Bodensee in Strass wurden an der Sorte „Tettnanger“ durch oberirdische Tröpfchenbewässerung in drei Jahren (2012, 2013 und 2015) leicht erhöhte Erträge, aber keine Erhöhung der Alphasäure festgestellt. Im Jahr 2014 waren beide Werte der unbewässerten Fläche höher (Landratsamt Bodenseekreis, 2011 bis 2015).

In Tschechien wurde durch Tröpfchenbewässerung über die Jahre 1988 bis 1990 eine durchschnittliche Ertragssteigerung von 26 % erzielt. Allerdings war der Einfluss auf die Alphasäure geringfügig (Kopecky, 1991). Im Zeitraum 1995 bis 1999 hingegen wurden die besten Erfolge mit Mikrosprinklern gemacht. In zwei Jahren wurden damit signifikant höhere Erträge festgestellt als bei Tröpfchenbewässerung, allerdings bei höherem Wasserverbrauch. In drei Jahren war kein Effekt ersichtlich (Slavik, 2000). Versuche aus den Jahren 2005 bis 2007 berichten von einer durchschnittlichen Steigerung von 21 % des Ertrages und von 7 % bei der Alphasäure (Svoboda *et al.*, 2008).

In den USA ist Hopfenanbau, welcher sich vornehmlich auf das Yakima Valley im Staat Washington konzentriert, aufgrund von sehr geringen Niederschlägen, nur mittels Zusatzbewässerung praktikierbar (Nakawuka, 2013). Allerdings werden hier mit bis zu 710 mm auch ca. siebenmal höhere Wassergaben ausgebracht (Evans, 2003) als in Deutschland mit durchschnittlich 100 mm, und einen direkten Vergleich zu unbewässerten Parzellen gibt es nicht. In einem auf zwei Jahre angelegten Experiment mit jeweils 57 mm und 52 mm Niederschlägen in der Hauptwachstumsphase wurden die höchsten Erträge mittels Tröpfchenbewässerung im Vergleich zur Furchenbewässerung erzielt (Wample und Farrar, 1983). Die ausgebrachten Wassermengen beliefen sich auf 298 mm und 513 mm bei der Tröpfchenbewässerung und auf 661 mm bis 803 mm bei der Furchenbewässerung.

Delahunty *et al.* (2011) fanden im Nordosten der USA bei zwei Sorten einen positiven Einfluss auf den Ertrag durch Tröpfchenbewässerung, während eine weitere Sorte weniger Erträge in der bewässerten Variante erzielte. Hier fielen die Niederschläge in der Wachstumsphase mit insgesamt 210 mm im Vergleich zur Hallertau ebenfalls sehr gering aus.

Die Ergebnisse von dieser und früheren Studien zeigen, dass es zu einem positiven Einfluss der Bewässerung auf den Ertrag und die Qualität von Hopfen in der Hallertau kommen kann. Allerdings vor allem in niederschlagsarmen Jahren und hauptsächlich auf Böden mit geringer Wasserhaltefähigkeit und eingeschränkter Durchwurzelbarkeit.

4.1.2. Positionierung der Tropfschläuche

Im Rahmen der Feldversuche wurde ober- mit unterirdischer Bewässerung verglichen. Wie die Ergebnisse zeigten, konnten in den meisten Versuchen tendenziell höhere Erträge in den oberirdischen Varianten (AB) mit auf dem Bifang ausgelegten Schlauch festgestellt werden (vgl. 3.1.1.4., 3.1.2.4. und 3.1.4.3.). Doch war dieses Ergebnis in keinem der Fälle statistisch signifikant verschieden von den unterirdischen und unbewässerten Varianten. Der Versuch in Attenhofen zeigte im Jahr 2013 sogar einen signifikant höheren Alphasäuregehalt in der Variante ZB300 im Vergleich zur Variante AB600, doch war dies eher auf grundsätzliche Unterschiede zwischen den Pflanzen zurückzuführen als auf die Positionierung, da sich die übrigen Varianten nicht voneinander unterschieden.

Auch in Hinsicht auf die Applikationsdauer mit unterschiedlichen Pausen konnte im Versuch in Hirnkirchen in den Jahren 2014 und 2015 kein eindeutiges Ergebnis festgestellt werden. Die Varianten unterschieden sich weder im Ertrag noch im Alphasäuregehalt. Allerdings war auch hier ein tendenziell positiver Einfluss auf den Ertrag durch die oberirdische Ausbringung ersichtlich, vor allem bei 12-stündiger Applikation mit drei Tagen Pause.

Dies zeigt, dass eine oberirdische Bewässerung mit höheren Wassergaben, aber geringeren Bewässerungsfrequenzen vorteilhaft ist. Durch die höhere Wassergabe wird ein größerer Bereich des Wurzelwerks befeuchtet, und es steht mehr Zeit zur Entnahme zur Verfügung, was vermutlich Sauerstoffmangel vermeidet und dadurch das natürliche Wurzelwachstum begünstigt (Meek *et al.*, 1983, Meyer *et al.*, 1985).

Im Trockenjahr 2015 konnten die untersuchten Pflanzen im Versuch in Karpfenstein allerdings bei allen drei Positionierungen (AB, NB und ZB) vom ausgebrachten Wasser profitieren, sodass davon auszugehen ist, dass in Trockenzeiten auch die unterirdischen Tropfschläuche die Pflanzen mit Wasser versorgen und Trockenphasen entgegenwirken. Allerdings war auch hier eine bessere Tendenz in der Variante AB ersichtlich.

Es zeigt sich demnach, dass die oberirdische Positionierung des Tropfschlauches auf dem Bifang, unabhängig von der Bodenart, die erfolgreichste der untersuchten Varianten war.

Oberirdisch verabreichte Wasserapplikationen im Bifang erreichen einen großen Teil der frisch gebildeten Adventivwurzeln. Außerdem besitzt der Bifang eine besondere Struktur. Da dieser jährlich aus Erde der Fahrgasse künstlich aufgeschüttet wird, besteht er vorwiegend aus lockerer, wenig verdichteter Erde. Dort verabreichtes Wasser kann sich demnach gut verteilen und ist für die dort zahlreichen Wurzeln leicht verfügbar. Die im Bifang befindlichen Wurzeln haben zudem einen anatomischen Vorteil. Aufgrund ihrer sprossbürtigen Entstehung (vgl. 3.3.) können das aufgenommene Wasser und die darin gelösten Nährstoffe direkt zu den im

4. DISKUSSION

Wachstum befindlichen Blattoorganen geleitet werden, ohne dabei einen langen Weg durch den Wurzelstock passieren zu müssen.

Neben den tendenziellen Vorteilen ist die Variante AB arbeitswirtschaftlich allerdings die ungünstigste Variante, da sie erhöhten Arbeitsaufwand durch jährliches Ausbringen und Einholung des Tropfschlauches bedeutet, von deren Komplikationen auch Kopecky (1991) berichtet. Damit entstehen höhere Kosten als bei unterirdischer Positionierung. Dies ist vor allem nachteilig, wenn man berücksichtigt, dass die Bewässerung nicht in allen Jahren benötigt wird.

Die Variante NB mit unterirdischem Schlauch ist nach einmaligem Einziehen arbeitswirtschaftlich unbedenklich. Zwar sind auch hier gelegentliche Arbeiten durch Wildverbiss oder Wurzeleinwachsen in die Tropfmittler erforderlich, doch ist der Aufwand geringer als bei oberirdischer Auslegung. Allerdings wird vermutet, dass bei überschüssiger Bewässerung unterirdisch Sauerstoffmangel und Verdichtungen in den Bodenschichten um den Tropfschlauch auftreten, welche wiederum nachteilig für das Pflanzenwachstum sind (Blokchina *et al.*, 2003; Bhattarai *et al.*, 2004).

Die Variante ZB, bei der die Tropfschläuche direkt in der Fahrgassenmitte verlegt waren, hatte die geringsten positiven Einflüsse sowohl auf den Ertrag als auch auf den Gehalt an Alphasäure. Im Jahr 2015 konnte allerdings gezeigt werden, dass auch hier die applizierten Wassergaben von den Pflanzen aufgenommen wurden und die Erträge stabilisiert haben (vgl. 3.1.2.4.). Die beiden Vergleichsvarianten erzielten aber bei gleicher Wassermenge höhere Erträge.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse kann keine eindeutige Empfehlung für eine optimale Positionierung der Tropfschläuche gegeben werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die oberirdische Variante die stärksten Einflüsse auf den Ertrag ausübt. Dieser ist in Trockenjahren aber nur geringfügig stärker als bei der unterirdischen Positionierung neben dem Bifang, welche arbeitswirtschaftliche Vorteile bringt. So wurde im Jahr 2015 bei gleicher Wassermenge derselbe Ertrag erzielt wie bei oberirdischer Bewässerung. Bei in der Fahrgasse vergrabenen Tropfschläuchen ist zu gewährleisten, dass die Pflanzenwurzeln bis dorthin wachsen. Bei Trockenheit konnte auch mit dieser Methode gezeigt werden, dass die Pflanzen das Wasser aufnahmen. Aufgrund von Sauerstoffmangel und Verdichtungen sollte in allen Fällen auf eine bedarfsgerechte Steuerung geachtet werden.

4.1.3. Nachteile durch Tröpfchenbewässerung

Hopfen wird meist ab dem ersten Anbaujahr bewässert, da der Effekt an jungen Pflanzen am stärksten ist. Da die Arbeitsschritte Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz gerade in der Hauptwachstumszeit von Hopfen viel Zeit beanspruchen (vgl. Tab. 1), wird in der Praxis bei oberirdischer Schlauchverlegung dieser meist Mitte Juni ausgelegt und angeschlossen. Aufgrund der limitierten Wassermenge wird häufig schon mit der Bewässerung begonnen, obwohl noch keine Notwendigkeit besteht (vgl. Abb. 47). Von dieser Vorgehensweise wird abgeraten. Wie sich in anderen Untersuchungen zeigte, beschränkt sich das Wurzelwachstum vor allem auf Bereiche, in denen eine gute Wasserversorgung gewährleistet ist (Goldberg *et al.*, 1971; Michelakis *et al.*, 1993). Es ist davon auszugehen, dass bewässerte Pflanzen somit langfristig nicht ihr volles Potential in das Wurzelwachstum stecken.

Aufgrund der Mehrjährigkeit der Kultur kann damit nach einigen Jahren ein verstärkt lokalisierendes Wurzelwachstum erfolgen, sodass die bewässerten Pflanzen stärker vom Bewässerungswasser abhängig sind und im Vergleich zu unbewässerten Pflanzen eine geringere Wurzelmasse aufweisen. Untersuchungen im Weinbau haben in direkten Vergleichen der Wurzelmasse unter Tröpfchen- und flächiger Bewässerung gezeigt, dass das Wurzelwerk bei Pflanzen, welche über eine Tröpfchenbewässerung bewässert wurden, grundsätzlich kleiner und mehr zu den Emittoren konzentriert war, als bei der flächigen Bewässerung (Araujo *et al.*, 1995; Stevens und Douglas, 1994).

Da die ausgebrachten Wassermengen nicht den vollen Pflanzenbedarf decken können (vgl. Tab. 13), muss die Pflanze weite Bereiche im Boden erschließen, um Niederschlagswasser aufnehmen zu können. Bei Standzeiten von 25 Jahren (LfL, 2011) wäre es vorteilhaft, dieses Wachstum nicht einzuschränken.

Ein weiteres Problem wird in der Nährstoffverfügbarkeit gesehen. Da Pflanzen ihre Makro- und Mikronährstoffe über das Wasser aus der Bodenlösung aufnehmen, ist die Wasseraufnahme eng an die Nährstoffversorgung der Pflanzen gekoppelt (Mengel *et al.*, 2001).

Aufgrund geringerer Leitungswiderstände nimmt die Pflanze ihr benötigtes Wasser verstärkt aus den Tropfstellen auf. Hierdurch kann es im Laufe der Saison von einer Verarmung an Nährstoffen vor allem im letzten Drittel bei der Doldenbildung kommen, wenn der Nährstoffbedarf nochmals hoch ist (Zattler, 1965). Zuvor über die gesamte Fläche ausgebrachte Nährstoffe (LfL, 2015), allen voran Stickstoff, aber auch andere Makro- und Mikronährstoffe, bleiben währenddessen ungenutzt im Boden zurück und können in Form von Nitrat durch Auswaschung das Grundwasser belasten (BMU, 2013).

Es wäre deshalb zu prüfen, inwiefern bei Tröpfchenbewässerung eine zusätzliche Ausbringung an Nährstoffen über das Bewässerungswasser („Fertigation“) durchgeführt werden kann, welche bei der Flächendüngung eingespart werden könnte. Zwar ist Fertigation gegenwärtig mit höheren Kosten verbunden, sodass zunächst eine ökonomische Betrachtung durchzuführen ist, doch zeigt sich in anderen Kulturen (Silber *et al.*, 2003; Hebbbar *et al.*, 2004) und auch an Hopfen (Delahunty und Johnston, 2014) ein mögliches Potential dieser Praxis, welche im Hopfenbau Deutschlands weiter untersucht werden sollte.

4.1.3.1. Alternative Bewässerungsformen

Grundsätzlich ist die Wassernutzung bei Tröpfchenbewässerung effektiver als bei flächig bewässernden Methoden, da es zu weniger Evaporation kommt (Wample und Farrar, 1983; Hansona *et al.*, 1997; Slavik, 2000; Michel und Sourell, 2014). Um die diskutierten Probleme, die durch eine Tröpfchenbewässerung bei der Hopfenproduktion entstehen können, zu vermeiden, sollten allerdings auch andere Bewässerungssysteme in Betracht gezogen werden. Dabei erscheinen vor allem solche Systeme als sinnvoll, welche die natürlichen Niederschläge imitieren, indem sie eine große Bodenfläche und somit das ganze Wurzelsystem befeuchten, wie zum Beispiel Mikrosprinkler.

Dies hätte zur Folge, dass das Wurzelwachstum nicht auf punktuelle Bereiche beschränkt wird und der Pflanze die im Boden befindlichen Nährstoffe bei der Aufnahme von Wasser gleichmäßig zur Verfügung stünden, womit das natürliche Wurzelwachstum in alle Bereiche gewährleistet wäre. Somit stünde langfristig mehr Bodenvolumen zur Verfügung, was eine größere Toleranz gegenüber Trockenheit zur Folge hätte und auch in niederschlagsreichen Jahren Vorteile brächte. Anders verhält es sich bei aridem Klima, wie im Yakima Valley der USA. Hier ist eine Tröpfchenbewässerung von Vorteil, da beinahe der gesamte Wasserbedarf über die Bewässerung gewährleistet wird.

Aus Tschechien wird von guten Erfahrungen mit Mikrosprinklern berichtet, die neben einer effektiven Wasserdarbietung zugleich eine thermoregulierende Kühlwirkung im Hopfengarten bewirken (Slavik, 2000). Diese Bedingungen sind bei der Photosynthese vorteilhaft, wie die Gaswechsellmessungen zeigten (vgl. Tab. 10).

Kopecky und Slavik (1997) erzielten gute Erfolge mit durchschnittlich 40 % höheren Erträgen in einem fünfjährigen Versuch mit Tropfschläuchen, welche oben im Gerüst über den Bifängen angebracht waren. Diese Vorgehensweise stellt eine gute Alternative zu den untersuchten Positionierungen dar, da hierbei sowohl das arbeitswirtschaftliche Problem als auch die punktuelle Verabreichung gelöst sind. Eine solche Anlage fand sich in einem praktizierenden Betrieb in

der Hallertau. Der Vorteil liegt vor allem in der Arbeitswirtschaftlichkeit, sodass der Schlauch nur einmalig installiert werden muss und bei Bedarf betrieben werden kann. Des Weiteren führt die Verabreichung des Wassers in Tropfenform aus sieben Metern Höhe zu breiter befeuchteten Flächen (s. Anhang Abb. 62), was einer Konzentration der Pflanzenwurzeln auf nur einen Bereich entgegenwirkt. Gleichzeitig wird flächig ausgebrachter Dünger gelöst und ist somit für die Pflanzen verfügbar, auch wenn Niederschläge ausbleiben.

Als Nachteil sind allerdings phytosanitäre Aspekte zu erwähnen. So werden Pilzkrankheiten durch feuchte Blätter begünstigt (LfL, 2015). Abhilfe könnte hierbei eine nächtliche Bewässerung schaffen, wenn die Blätter ohnehin durch Taubildung feucht und eine Infektion herabgesetzt ist (Royle und Thomas, 1973).

Auch die Befahrbarkeit des Hopfengartens ist bei dieser Maßnahme aufgrund möglicher Bodenverdichtungen eingeschränkt, insofern man auf eine tägliche Bewässerung angewiesen ist. Dies könnte durch höhere Bewässerungsgaben mit geringeren Frequenzen gelöst werden, sodass die bewässerten Böden ausreichend Zeit zur Infiltration des verabreichten Wassers hätten und diese für Pflanzenschutz- und Düngemaßnahmen wieder befahrbar wären. Ähnliche Probleme treten aber auch bei unterirdischer Bewässerung auf.

4.1.4. Bewässerungssteuerung

Neben dem Einfluss der Bewässerung wurden auch objektive Bewässerungssteuerungen im Hopfenbau getestet. Hierbei wurde zunächst eine Steuerung über Saugspannungssensoren verfolgt. Im weiteren Verlauf kam die Betrachtung von klimatischen Wasserbilanzen hinzu, welche sich als die bessere Methode erwies.

Als Begründung sind vor allem die Schwierigkeiten bei der Interpretation und einer nicht einheitlich definierbaren Positionierung der Sensoren im großen Wurzelbereich von Hopfen zu nennen. Da deren Einbau im Hopfengarten nur in Tiefen von bis zu maximal 60 cm störungsfrei zu bewerkstelligen ist, wird ein sehr großer Bereich des Wurzelwerks nicht erfasst. Zwar zeigten die Werte der Messungen durch die Watermark- und auch die Bodenfeuchtesensoren Unterschiede zwischen den bewässerten und unbewässerten Varianten sowohl in 30 cm als auch in 60 cm Tiefe, doch widerlegten die Ertragsermittlungen in mehreren Versuchen und Jahren eine zuverlässige Anwendbarkeit dieser Parameter als Steuerungsalgorithmen einer automatisiert betriebenen Steuerung. Selbst wenn im Bifang trockene Verhältnisse herrschten, konnten noch große Wassermengen aus dem Boden geschöpft werden (vgl. 3.3.).

4. DISKUSSION

Niederschläge, welche in eine Bewässerungsentscheidung miteinfließen sollten, wurden selbst in 30 cm Tiefe oft nicht durch die Sensoren registriert. Die dichte Belaubung von Herkules hat den Bifang möglicherweise abgeschirmt.

Des Weiteren kam eine häufige Nichtübereinstimmung der ermittelten Werte in identisch verbauten Sensoren hinzu, was die Repräsentativität der Messergebnisse in Frage stellt. Gerade in trockenen Jahren war der Verlauf der Messwerte von identisch installierten Sensoren ungleichmäßig, was bei schnell wechselnder Bodenfeuchte bekannt ist (McCann *et al.*, 1992). Aufgrund dessen haben die festgelegten Schwellenwerte nicht immer zu den theoretisch vorgesehenen Wassermengen der verschiedenen Varianten geführt (vgl. Tab. 8 und 9). Dies lag wahrscheinlich an Bodenunterschieden und unterschiedlichen Wurzeldichten in den einzelnen Messstellenwiederholungen, welche nur schwer *a priori* auszumachen sind, da die Sensoren laut Hersteller in ungestörte Bereiche des Bodens installiert werden müssen. Wie die Wurzelgrabungen zeigten, ist aber nicht immer von einer gleichmäßigen Durchwurzelung auszugehen (vgl. 3.3.). Sind die zu bewässernden Felder zusätzlich von Bodenheterogenität geprägt, wird eine bedarfsgerechte Steuerung anhand von Sensoren im Hopfenbau fragwürdig.

Die aufgeführten Schwierigkeiten könnten nur durch eine hohe Anzahl an Sensoren umgangen werden. Da die kabelgebundenen Sensoren aber aufgrund von Bodenbearbeitungsmaßnahmen im Hopfen nicht dauerhaft installiert werden können und Bewässerungsbetriebe meist viele unterschiedliche Hopfengärten bewässern und somit auf individuelle Messungen aus jedem Garten angewiesen sind, wird von dieser Art der Automatisierung auch aus arbeitswirtschaftlicher Sicht abgeraten.

Eine Steuerung nach klimatischer Wasserbilanz weist Vorteile in der Unabhängigkeit von Sensoren und damit verbundener höherer Arbeitswirtschaftlichkeit auf, wie auch in der Berücksichtigung von Wasservorräten im Wurzelbereich und dem Miteinbeziehen der Niederschläge über einen längeren (definierten) Zeitraum (Allen *et al.*, 1998; Paschold *et al.*, 2011).

Die Bilanzierung der Wasserverfügbarkeit ergab gute Resultate, wie der Versuch in Karpfenstein im Jahr 2015 zeigte. Allerdings wurde der Versuch, wie in der Praxis üblich, täglichen Bewässerungsgaben ausgesetzt (vgl. 2.1.2.1.) und nicht nach einem Schwellenwert bewässert (vgl. 3.4.4.). Normalerweise wird versucht, einen Schwellenwert des pflanzenverfügbaren Wassers im Wurzelraum von 60 %, je nach Kultur sogar 50 %, zu erreichen, bevor die Bewässerung einsetzt (Michel und Sourell, 2014; Sadras und Milroy, 1996). Dies hat den Vorteil, dass einerseits Niederschläge abgewartet werden können und andererseits die Pflanzen in ihrer natürlichen Wurzelausbreitung bei der Suche nach wasserführenden Stellen nicht beeinträchtigt werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist dies im Hopfenbau aufgrund der Limitierungen, die

durch die Wasserpumpen und die Tröpfchenbewässerung gegeben sind, aber schwer durchführbar, worauf in Kapitel 4.4.3. näher eingegangen wird.

4.1.5. Limitierungen der Feldversuche

Grundsätzlich sind ökologische Untersuchungen und vor allem Bewässerungsversuche immer vom vorherrschenden Wetter des Untersuchungsjahres abhängig. Wie der Vergleich zum langjährigen Mittel der Hallertau zeigte (vgl. Tab. 7), gab es in den Untersuchungsjahren bezüglich der Summe der Niederschläge in der Vegetationszeit sowohl durchschnittliche als auch trockene Jahre. Die meisten Effekte traten allerdings nur einmalig auf und waren nicht reproduzierbar, was eine Validierung erschwerte.

Außerdem wiesen die Doldenerträge in allen Versuchen starke Schwankungen auf, was in den hohen Standardabweichungen ersichtlich ist. Im Hopfenversuchswesen kann dies durch eine Ertragsermittlung aus 20 Reben pro Parzelle umgangen werden. Dennoch können Faktoren mit geringem Einfluss statistisch schwer erfasst werden.

Die Standorte wurden zu Beginn des Projektes nach festgelegten Kriterien ausgewählt (vgl. Tab. 16). Beim Sandbodenstandort Karpfenstein wurde während der Versuchszeit am hofnahen Brunnen in Wintermonaten ein Grundwasserstand von ca. 3 m Tiefe festgestellt. Zwar reichten die Wurzeln der Versuchspflanzen auf diesem Standort nur bis in eine Tiefe von ca. 1,7 m, dennoch ist nicht auszuschließen, dass auf einem Sandbodenstandort mit weiter entferntem Grundwasser stärkere Unterschiede aufgetreten wären. Deshalb sollte diesem Umstand in zukünftigen Untersuchungen bei der Standortwahl mehr Beachtung geschenkt werden, da bei einer Entfernung von 1 m zwischen der Grundwasseroberfläche und dem effektiven Wurzelraum je nach Bodenart Wassermengen von bis zu 1 mm pro Tag durch kapillaren Aufstieg hinzukommen können (Scheffer und Schachtschabel, 2010).

Auch die vorwiegend untersuchte Sorte Herkules könnte die Bewässerungsversuche erschwert haben. Zwar gilt Herkules als die ertragsreichste Sorte Deutschlands und weist den höchsten BFI bei Hopfen auf (Engelhard *et al.*, 2011), doch bedeutet großes Blattwerk neben einer großen Verdunstungsfläche auch starke Selbstbeschattung. Die Parameter Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung nehmen Einfluss auf den Öffnungsgrad der Stomata (Milburn, 1979), was durch die Gaswechsellmessungen bestätigt wurde (vgl. Tab. 10). Gerüstanlagen mit Sorten geringerer Blattfläche sind stärkeren Einflüssen durch Wind und Sonneneinstrahlung ausgesetzt, was den Grenzschichtwiderstand der Stomata herabsetzt (Larcher, 2001). Die Sorte Herkules mit ihrem dichten Blattwerk sorgt im Bestand für eine große Selbstbeschattung. Dies könnte das Bestandsklima begünstigen und die Verdunstung von Wasser zugunsten der Pflanze

4. DISKUSSION

beeinflussen (Sugimoto, 1973) und sie zu einer „trockenstresstoleranten“ Sorte machen. Ähnliches gilt auch für die Sorte Hallertauer Magnum, welche wie Herkules auch eine Bittersorte darstellt und in der Hallertau als sehr trockenstresstolerant gilt. Demnach wäre es ratsam, die Bewässerung zukünftig mehr auf die Aromasorten zu fokussieren, welche in der Regel eine geringere Blattfläche aufweisen (Engelhard *et al.*, 2011). Bestätigt wird diese Überlegung durch Aussagen von Landwirten, welche von einem höheren Einfluss durch Bewässerung auf Aromasorten berichten, auch wenn in den Versuchen an der Sorte Perle in Hirnkirchen keine Einflüsse auf den Ertrag durch Trockenstress erkennbar waren (vgl. 3.1.3.3.2.). Allerdings bedarf es weiterer Forschung in diesem Bereich, um diese Hypothese zu bestätigen.

4.2. PHYSIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AN HOPFEN

4.2.1. Lichtkurven

Bei den im Gewächshaus an Jungpflanzen durchgeführten Lichtkurven (vgl. 3.2.1.) konnte gezeigt werden, dass sich Gaswechsellmessungen eignen, um Trockenstresseinflüsse an Hopfen messtechnisch zu erfassen, was auch in vielen anderen landwirtschaftlichen Kulturen Anwendung findet (Giorio *et al.*, 1999; Chartzoulakis *et al.* 2002; Escalona *et al.*, 2000). So zeigten die Pflanzen bereits nach drei Tagen Trockenstress eine vollständig reduzierte Photosynthese und Transpiration auf, was bei Topfpflanzen zu erwarten war (Hnilíčková *et al.*, 2009; Korovetska *et al.*, 2014). Dahingegen konnten bei den bewässerten Pflanzen hohe Werte der NP festgestellt werden. Diese lagen mit einem Maximum von bis zu $13,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter dem Durchschnitt von Nutzpflanzen mit 20 bis $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Larcher, 2001), was aber vermutlich am Alter der untersuchten Pflanzen lag, wie die Messungen im Freiland zeigten (vgl. 3.2.4.4.).

Des Weiteren zeigten die gut bewässerten Pflanzen eine Lichtsättigung zwischen 1000 und $1500 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ für Hopfen, welche verglichen zu anderen langjährigen Kulturen wie *Vitis vinifera* mit einer Lichtsättigung bei 500 bis $1000 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Zufferey *et al.*, 2015; Düring, 1988) bzw. *Malus domestica* mit etwa $1000 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Cheng *et al.*, 2000) überdurchschnittlich hoch ist. Dies liegt vermutlich an der Vegetationsform und der Tatsache, als Kletterpflanze stets Bereiche mit hoher Sonneneinstrahlung zu erreichen, womit sich *Humulus lupulus* als eine photophile C_3 -Pflanze charakterisieren lässt. Der durchschnittliche Wert der Lichtsättigung von $1250 \mu\text{mol Photonen m}^{-2}\text{s}^{-1}$ diente unter Freilandbedingungen für weitere vergleichende Messungen.

4.2.2. Potentielle Nettophotosynthese und Transpiration bei Lichtsättigung

Die Untersuchungen an bewässerten und unbewässerten Pflanzen haben gezeigt, dass das Zusatzwasser die Produktivität von Hopfen steigert (vgl. 3.2.2.). So wiesen sie im Vergleich in rund einem Drittel der Messungen eine erhöhte potentielle NP bei Lichtsättigung im Vergleich zu den unbewässerten Pflanzen auf. Dabei verhielt sich die Transpiration ähnlich. Allerdings zeigte sich, dass die bewässerten Pflanzen gleichzeitig auch mehr Wasser verlieren und die erhöhte CO_2 -Aufnahme einen höheren Wasserverlust zur Folge hatte, da die Stomata nicht selektiv für die beiden Stoffwechselprodukte agieren (Von Willert *et al.*, 1995). Anders als in Kenny (2005) zeigten die Ertragsermittlungen in beiden Jahren, dass durch die gesteigerte Produktivität kein höherer Ertrag und kein höherer Alphasäuregehalt erzielt werden konnte (vgl. 3.1.1.4.). Vermutlich haben die unbewässerten Pflanzen in den Tagen, in denen sich die

4. DISKUSSION

Werte nicht unterschieden sowie im Reifeprozess, also wenige Wochen vor der Ernte, mögliche Defizite wieder ausgleichen können. Auch könnte das verabreichte Wasser und die damit einhergehende gesteigerte Produktivität weniger zu einer Erhöhung des generativen Wachstums als zu einer Erhöhung des vegetativen Wachstums geführt haben, wie es aus Arbeiten an Wein festgestellt worden ist (Heßdörfer, 2015; Hatch *et al.*, 2011) und in zukünftigen Versuchen stärker verfolgt werden sollte.

Die unbewässerten Pflanzen waren bereits bei geringen Niederschlagsereignissen, welche durch die Bodenfeuchtesensoren nicht erfasst wurden, schnell wieder in der Lage, ähnliche NP-Werte zu erreichen wie die bewässerten Pflanzen, was vor allem die Messungen im Jahr 2012 deutlich machen (vgl. Abb. 36). So führten die Niederschläge am 11., 13. und 25. Juli sowie die Niederschläge zu Beginn des Monats August zu einer raschen Angleichung der NP-Werte. Dies bestätigt, dass Sensormessungen zur Bestimmung des Bewässerungsbedarfs von Hopfen unzureichend sind.

Weiter zeigen die Messungen des Jahres 2013, in dem während des Messzeitraums nur an einem Tag Niederschlag zu verzeichnen war, dass ein Abfall der NP nicht durch die Bewässerung aufgehalten werden konnte (vgl. Abb. 37). Vermutlich haben die geringen Wassergaben von 2 mm nicht ausgereicht, um die andauernde Trockenheit abzufangen. Die Pflanzen waren gezwungen, ihren Wasserverlust, welcher in Zusammenhang zur Kohlenstoffdioxidaufnahme steht, trotz Bewässerung zu drosseln. Dies zeigt auf, dass die minimalen Bewässerungsgaben, wie sie über eine Tröpfchenbewässerung verabreicht werden, nicht zur Aufrechterhaltung der Assimilation beitragen.

Die Photosyntheseleistung ist abhängig von der relativen Luftfeuchte (Rawson *et al.*, 1977), was die multiple Regression mit den Tageswerten der NP und der Transpiration bestätigt hat. So war sie in allen Modellen zur Erklärung der Assimilation und der Transpiration beteiligt (vgl. Tab. 10). Daneben wurden die Effekte auch durch die Globalstrahlung und die Temperatur erklärt, welche ebenfalls einen starken Einfluss auf den Gaswechsel von Pflanzen nehmen (Larcher, 2001). Auch wenn die aufgeklärte Varianz von maximal 41 % zeigte, dass noch weitere (nicht aufgedeckte) Faktoren zur NP- und Transpirationsleistung beitragen, wurde die Unabhängigkeit zur Bodenfeuchte deutlich. Diese tauchte nur im Modell der Transpiration der unbewässerten Pflanzen auf, welches mit der Globalstrahlung und der relativen Luftfeuchte nur 35 % der Varianz erklären konnte. Dies bestätigt, dass die Messpunkte zur Bestimmung der Bodenfeuchte nicht den exakten Wasserstatus von Hopfen widerspiegeln, da die Bodenfeuchte normalerweise einen Einfluss auf die Photosynthese ausübt (Gollan *et al.*, 1985; Sadras und Milroy, 1996).

Die Wassernutzungseffizienz lag mit Werten zwischen 3 und 5 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ in einem vergleichbaren Bereich, wie bei Wein (Pou *et al.*, 2008) und anderen mesophytischen Kräutern (Larcher, 2001). Allerdings waren diese nicht grundlegend zwischen den Behandlungen verschieden. Im Jahr 2012 zeigten sie zudem, dass die unbewässerten Pflanzen eine höhere WUE besaßen als die bewässerten. Auch dieser Zusammenhang wurde schon an Wein berichtet (Pou *et al.*, 2008) und stärkt die Vermutung, dass Herkules eine sehr trockenstresstolerante Sorte ist. Zukünftig sollte vor allem in Hinblick auf die Hopfenzüchtung der WUE einzelner Sorten besondere Beachtung geschenkt werden, um wassersparende Sorten selektieren zu können.

Allerdings handelte es sich bei den Messungen um potentielle Werte bei einer unnatürlich starken Sonneneinstrahlung (Lichtsättigung) im unteren Bereich der Pflanze, was die niedrige Varianzerklärung der multiplen Regressionen erklären könnte. So wurde mit für den unteren Bereich unnatürlich hohen Lichtgaben das Mikroklima um die Blätter so stark verändert, dass es nicht das natürliche Abbild widerspiegeln konnte.

4.2.3. Tagesgang

Der Tagesgang gibt Aufschluss darüber, wie sich die Photosynthese und die Transpiration im oberen Bereich der Pflanze bei gegebener Sonneneinstrahlung verhalten.

Das Maximum der PAR lag an diesem sonnigen Julitag bei etwa 2000 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Man erkennt zum einen die in den Lichtkurven bereits festgestellte Lichtsättigung in einem Bereich um 1250 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Hier wurde die maximale NP bei einer PAR von 1290 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ festgestellt. Außerdem erkennt man, dass die starke Sonneneinstrahlung, eine Abnahme der NP ab einem Wert von ca. 1500 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zur Folge hatte (etwa ab 10:00 Uhr). Dieser Effekt wird als Photoinhibition bezeichnet und tritt auf, wenn ein Überangebot an Licht zu einer Verringerung der Quantenausbeute und somit zur Abnahme der Photosynthese führt. Zur gleichen Zeit bewirkt die starke Sonneneinstrahlung im Kronenbereich ein weiteres Öffnen der Stomata, sodass verstärkt H_2O -Moleküle verloren gehen (Larcher, 2001). So stieg die Transpiration bis zu einem Maximum von 12,6 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gegen 13:20 Uhr weiter an. Offensichtlich überlagerte in diesem Bereich der Pflanze (Krone) der Einfluss der PAR den des VPD, was die Korrelationstests bestätigt haben. Hopfen ist demnach bei leicht bewölktem Wetter mit Sonneneinstrahlungen von 1000 bis 1500 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ am effektivsten. Hier verliert die Pflanze prozentual am wenigsten Wasser pro aufgenommenem CO_2 , was auch durch die Analyse der WUE gezeigt werden konnte.

4.2.4. Nettophotosynthese und Transpiration bei gegebenen Lichtverhältnissen

Gaswechsellmessungen werden häufig zum Analysieren von Trockenstress bei Pflanzen verwendet (Fernández *et al.*, 2006; Flexas *et al.*, 2002; Chartzoulakis *et al.*, 2002). Die Messungen bei gegebener Lichtstärke über die gesamte Hopfenpflanze zeigten, dass sich die Werte kaum signifikant zwischen den Behandlungen unterschieden (vgl. 3.2.4.4.). Vor allem im oberen Bereich, wo die stärksten NP-Werte verzeichnet wurden, unterschied sich die NP in keinem der sechs Fälle (vgl. Tab. 11). Weiter waren aufgedeckte Unterschiede im unteren und mittleren Bereich meist durch eine unterschiedliche PAR begründet und nicht durch den Einfluss der Bewässerung. Dies zeigt, dass die unbewässerten Pflanzen im Zeitraum der Messungen keinen Trockenstress erlitten, auch wenn sie eine geringere WUE zeigten. Die Ertragsermittlungen der Parzellen zeigten keine Unterschiede zwischen den Behandlungen (vgl. 3.1.1.4.2.).

Interessanterweise war bei den Messungen eine exponentielle Zunahme der Assimilation von unten nach oben erkennbar, welche in Abhängigkeit zur Strahlungsattenuation im 7 m hohen Hopfengarten steht. So zeigt die PAR im Verlauf der Pflanze nach dem Lambert-Beer'schen Extinktionsgesetz vertikal nach unten eine exponentielle Abnahme (Larcher, 2001). Die Transpiration dahingegen folgte über die Höhe von unten nach oben eher einem linearen Anstieg, wie die Boxplots verdeutlicht haben (vgl. Abb. 40).

Dieser Zusammenhang ist vermutlich im hydrostabilen Konstitutionstyp (Kolenc *et al.*, 2016) und im Bestandsklima der Hopfenanlagen begründet. Ersteres impliziert, dass die Pflanze keinen starken Wasserpotentialgradienten über den Tagesverlauf und die Höhe aufweist (vgl. Fuß, 2014 und Thies, 2015) und ihre vorhandenen Wasserreserven bis zum theoretischen Erliegen voll ausschöpft. Dabei spielt auch der Wurzelndruck während der Nacht eine Rolle, da dieser den Transpirationssog des SPAC unterstützt (Lösch, 2003), was auch von Kürbisranken bekannt ist (Cary und Fisher, 1971). So kann auch ein langes „Ausbluten“ des Rebenstumpfes einer Hopfenpflanze nach dem Abtrennen der oberirdischen Sprossachse aus dem Boden erklärt werden. Ohnehin gelten Lianen als besondere Pflanzen hinsichtlich ihres Wasserhaushaltes, da sie aufgrund eines meist weitauslaufenden Wurzelsystems, verbunden mit geringen Leitungswiderständen in den Xylemgefäßen, große Mengen an Wasser mit hoher Geschwindigkeit leiten können (Lösch, 2003). Auch Hopfen hat einen sehr großen Anteil an Leitungsgefäßen, wie mikroskopische Untersuchungen von Sprossachsenquerschnitten zeigten (eigene unveröffentlichte Ergebnisse; Jupa *et al.*, 2013). Bezogen auf die erhobenen Daten hat dies zur Folge, dass die Transpiration über den Verlauf der Pflanze einen geringen Zusammenhang zur PAR

aufweist. Der zugrunde liegende Einfluss konnte hingegen über die Regressionsanalysen der x,y- Plots zum VPD gezeigt werden.

So bestätigen die in diesem Zusammenhang durchgeführten Regressionen eine Abhängigkeit der Transpiration zum Wasserdampfdruckdefizit, was bereits aus anderen Studien bekannt ist (Lange *et al.*, 1971; Franks und Farquhar, 1999; Fletcher *et al.*, 2007). Dieser wird aufgrund der Bestandsdichte eher einem linearen Anstieg von unten nach oben folgen. Für die Berechnungen konnte lediglich der Wert, der durch die Wetterstation im Feld generiert wurde, für alle Höhenstufen gleichermaßen verwendet werden. Mikroklimatische Messungen des VPD im Bestand über verschiedene Höhen könnten diese Vermutung stärken und den linearen Anstieg der Transpiration über die Höhe, wie er ähnlich auch von Hejnák *et al.* (2014) beobachtet wurde, verdeutlichen.

4.2.5. Hochrechnung des Wasserverbrauchs

Mit den Transpirationswerten der Gaswechsellmessungen war eine Hochrechnung des durchschnittlichen Wasserverbrauchs pro Pflanze möglich. Der Median der Transpiration pro Fläche und Zeit erwies sich dabei als der bessere Wert, um eine solche Hochrechnung durchzuführen, da dieser den am häufigsten gemessenen Wert widerspiegelt. Dem gegenüber steht das arithmetische Mittel, welches stark durch unverhältnismäßig hohe Sonneneinstrahlungen verzerrt werden kann. Die ermittelten Mediane der Transpirationswerte E bei natürlicher Sonneneinstrahlung sind mit Werten zwischen $0,5$ und $7,5 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ im Bereich anderer krautiger Pflanzen (Larcher, 2001).

Die Rechnungen ergaben, dass pro Tag ein Wasserverbrauch von bis zu 56 Litern zustande kommt, was bei 5 m^2 Bodenfläche $11,2$ Liter pro m^2 und somit eine ET_{Hopfen} von $11,2 \text{ mm}$ darstellt. Die zurückgerechneten Korrekturwerte beliefen sich zwischen $1,4$ und $3,2$ für den Zeitraum zwischen dem 15. Juli und dem 31. August, welcher als der Hauptkulturzeitraum angesehen wird und demnach den wichtigsten Korrekturfaktor widerspiegelt. Ein errechneter Mittelwert dieser Korrekturfaktoren ergab $2,3$ für diesen Zeitraum, der mehr als doppelt so hoch ist wie der vorgeschlagene Korrekturfaktor der FAO mit $1,05$ (Allen *et al.*, 1998), und den errechneten Wasserverbrauch sehr wahrscheinlich überschätzt. Hierzu sind mehrere Punkte als mögliche Begründung zu nennen.

Der wichtigste Aspekt ist, dass die Messungen in südöstlicher Ausrichtung und nur an einer der zwei Reben durchgeführt werden konnte. Es ist davon auszugehen, dass an der gegenüberliegenden Rebe mit nordwestlicher Ausrichtung geringere Werte erreicht wurden. In der Berechnung wurde dies allerdings nicht berücksichtigt.

4. DISKUSSION

Verstärkend kommt hinzu, dass Gaswechselfmessungen mit Luftströmen arbeiten, welche die Grenzschicht über den Stomata stören und somit ein höheres Wasserdampfdruckdefizit erzeugen. Dies liegt begründet im Messsystem, welches ständig neue Luft in die Messküvette leitet. Auch dadurch ist davon auszugehen, dass die ermittelten Werte für die Hochrechnung überhöht sind, was auch schon im Vergleich mit anderen Systemen, wie Saftflussstrommessungen und Eddy Covariance, diskutiert wurde und von einer 20%-igen Überschätzung der Gaswechselfmessungen ausgeht (Zhang *et al.*, 2014).

Auch die Blattfläche wurde für die Hochrechnung lediglich aus älteren Arbeiten übernommen und stellt somit nur eine Näherung dar, da sie weder im selben Jahr noch am selben Standort bestimmt wurden. Außerdem zeigen die Werte in Abbildung 39 durchaus große Streubereiche. Da die Blattfläche mit einem hohen Faktor in die Berechnung eingeht, stellt sie eine mögliche Fehlerquelle dar.

In der vorliegenden Hochrechnung wurden 8 Stunden angesetzt, da die Messungen einerseits immer in diesem Zeitraum durchgeführt wurden und andererseits die Messung des Tagesgangs zeigte, dass in diesem Zeitraum der Großteil der Transpiration stattfindet (vgl. 3.2.3.). Allerdings ist noch ein weiterer Teil zu berücksichtigen, der sowohl frühmorgendlich als auch noch abends stattfindet.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse ist zwar davon auszugehen, dass in der Hauptanbauzeit vom 15. Juli bis 31. August sogar mit höheren Korrekturfaktoren gearbeitet werden könnte, um den Wasserverbrauch von Hopfen zu errechnen. Die hier errechneten Werte von 2,3 werden allerdings als zu hoch angesehen und sollten in weiteren Bewässerungsversuchen und vor allem an weiteren Sorten überprüft werden.

Eine Eichung der Transpirationmessungen mittels einer exakten Messung der Wasserverluste über ein Lysimeter scheiterte bisher an der Tatsache, dass diese lediglich unter unnatürlichen Bedingungen in Containern, wo das typische Mikroklima des Bestandes fehlte, überprüft werden konnte. Die Installation von Lysimetern im Bestand eines Hopfengartens oder Messungen des Saftflusses könnten die Hochrechnungen validieren.

4.3. RHIZOSPHERE VON HOPFEN

Hopfen benötigt im Laufe seiner Vegetationsperiode große Mengen an Wasser, wie die Hochrechnungen der Transpiration und die kumulierten Evapotranspirationswerte der Wasserbilanzen gezeigt haben (vgl. Tab. 13 und Tab. 14). Die Wurzelgrabungen an Hopfen haben deutlich gemacht, dass auf gut durchwurzelbaren Standorten ein großes Reservoir an Bodenwasser zur Verfügung steht. So wurden durchschnittlich 5,0 m³ an durchwurzeltem Bodenvolumen gefunden. Das größte Volumen erschloss mit 7,4 m³ eine unbewässerte Pflanze der Sorte Perle.

Der Phänotyp der Wurzel von *Humulus lupulus* glich dem anderer Pflanzen aus der Ordnung der Urticales, wie *Urtica dioica* oder *Cannabis sativa*, welche, wenn auch kleiner in ihrer Ausprägung, ebenfalls in horizontal und vertikal verlaufende Wurzeln unterteilt werden können (Kutschera und Lichtenegger, 1992; Kutschera *et al.*, 2009).

Die horizontal verlaufenden Wurzeln ähnelten stark der Beschreibung, welche in den 50er Jahren in Großbritannien gemacht wurden (Beard, 1943). Deren Funktion ist vermutlich eine schnelle Aufnahme von Niederschlägen (und Nährstoffen). So zeigten die Messungen der potentiellen Assimilation der unbewässerten Pflanzen eine rasche Erhöhung der Assimilation wenige Stunden nach geringen Niederschlägen, die in 30 cm Tiefe nicht von den Bodenfeuchtesensoren registriert wurden (vgl. 3.2.2.).

Dahingegen fungieren die vertikal verlaufenden Wurzeln wohl als eine Art Versicherung in Trockenzeiten, um den großen Wasserverbrauch zu decken, wenn Niederschläge ausbleiben. Vermutlich wachsen diese dann auch in tiefere Bodenschichten.

Bei allen Grabungen wurde gezeigt, dass die mehrjährigen Wurzeln an jeder Stelle in der Lage sind, frische junge Wurzeln zu bilden. Dies geschieht in Notzeiten, verglichen mit der oberirdischen Wachstumsgeschwindigkeit von Hopfen, vermutlich sehr rasch.

4.3.1. Wasserreserven

Das pflanzenverfügbare Wasser hängt hauptsächlich von der Wasserhaltefähigkeit der Böden ab, wie die Ergebnisse zeigten. So ist die Verfügbarkeit von Wasser auf Lehmböden im Vergleich zu Sandböden wesentlich höher. Dies zeigten die Wurzelgrabungen an der Sorte Herkules, wo auf Lehmboden (vgl. Abb. 43) mit 1254 Litern an gespeichertem Bodenwasser mehr als doppelt so viel Wasser zur Verfügung steht als bei einer vergleichbaren Pflanze auf Sandboden (vgl. Abb. 42).

Die beschriebene Pflanze stammte aus demselben Hopfengarten in Hirnkirchen, in dem zwei der Bewässerungsversuche durchgeführt wurden (vgl. 2.1.3., 2.1.4. und 2.3.1.1.). In allen vier

Versuchsjahren (2012 bis 2015) wurde dabei kein Einfluss der Bewässerung festgestellt, was die Fähigkeit zur Selbstaufrechterhaltung der Pflanzen selbst in so trockenen Jahren wie 2015 unterstreicht.

Überraschend war, dass sich die Wurzel ausdehnung der Aromasorte Perle nicht von der der Sorte Herkules, welche oberirdisch einen stärkeren Habitus ausbildet, unterschied. Dabei wurde das größte durchwurzelte Bodenvolumen sogar bei der Sorte Perle gefunden. Somit kann die bereits erwähnte erhöhte Trockenstresstoleranz der Sorte Herkules nicht mit dem Wurzelwerk erklärt werden und muss eher auf physiologischer oder molekularer Ebene zu finden sein (Shinozaki und Yamaguchi-Shinozaki, 2007).

Da insgesamt nur fünf Grabungen durchgeführt wurden und die Einteilung der Rhizosphäre in geometrische Körper eine Vereinfachung darstellt, kann das pflanzenverfügbare Wasser der verschiedenen Wurzelbilder nur als ungefähre Richtwert angesehen werden. Weiterhin ist das Wurzelbild über die Zeit nicht statisch, wie in diesen Berechnungen angenommen, sondern mobil, insofern Wurzeln weitere Bereiche erschließen können und Wasser in angrenzenden Bereichen in Abhängigkeit von Diffusionsgradienten und der Leitfähigkeit des Bodens die Wasserreserven verändern kann (Scheffer und Schachtschabel, 2010).

Dennoch erweist sich der gemittelte Wert von 5,0 m³ durchwurzeltem Bodenvolumen auf den meisten Bodenarten als eine anwendbare Bezugsgröße (vgl. 4.4. und Allen *et al.*, 1998).

4.3.2. Konsequenzen auf produktionstechnische Schritte

Der Habitus einer Pflanze steht oft in Korrelation zu ihrer Wurzel (Cairns *et al.*, 1997; Masle und Passioura, 1987). Aus den Wurzelbildern können Schlussfolgerungen auf eine Bewässerung gezogen werden, die in Einklang mit den Feldversuchen stehen. So bewirkte Zusatzwasser in Form von Tröpfchenbewässerung nur in einem Fall (auf Sandboden während eines sehr trockenen Jahres) einen positiven Einfluss auf den Ertrag.

Überträgt man die Form der Befeuchtungszonen (vgl. Abb. 7) auf das große Wurzelwerk der Pflanze, wird deutlich, dass man nur einen geringen Teil der Wurzeln mit dem applizierten Zusatzwasser erreicht.

Wie bereits erläutert, kann die punktuelle Verabreichung des Wassers zu einem verminderten Wurzelwachstum führen, wie es im direkten Vergleich zwischen einer bewässerten und unbewässerten Hopfenpflanze festgestellt wurde (vgl. Abb. 45) und aus weiteren Arbeiten bekannt ist (Stevens und Douglas, 1994; Michelakis *et al.*, 1993; Araujo *et al.*, 1995). Zudem kann eine verstärkte Entnahme des Wassers an diesen Orten zu einer Nährstoffverarmung in der Gesamtbilanz der Pflanze führen.

Aus diesem Aspekt sollte eine Bewässerung nur durchgeführt werden, wenn die Pflanze in Trockenstress gerät und sie mit ihrem Wurzelwerk nicht mehr genügend Wasser aus dem Boden schöpfen kann.

Wurzeln nutzen häufig die bereits durch Verrottung älterer Pflanzenteile, Regenwurmgingen, oder Bodenrisse geschaffenen Makroporen für die Ausdehnung des Wurzelwerks (Edwards und Lofty, 1978; Whiteley und Dexter, 1982; Ehlers *et al.*, 1983). Durch organische Substanz im Boden steigt auch die Wasserspeicherfähigkeit der Böden (Renger *et al.*, 2008), gleichzeitig steigen die Wasserreserven für die Pflanzen. Weiteres Augenmerk sollte deshalb auch auf die Zuführung organischer Substanz in die Hopfengärten gelegt werden.

Zwischenfrüchte in den Reihen mindern das Erosionsrisiko und führen zu einer besseren Infiltration des Regens in die Böden. Ein Ansatz wäre hierbei, verwandte Zwischenfruchtsorten aus den natürlichen Vergesellschaftungen von *Humulus lupulus* zu erforschen.

Verdichtete Böden, welche vor allem durch schwere Maschinen hervorgerufen werden, haben einen negativen Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt und die Erträge von Pflanzen (Tardieu *et al.*, 1992; Oussible *et al.*, 1992; Stenitzer und Murer, 2003). Außerdem können Pflanzenwurzeln in verdichteten Böden weitaus schlechter wachsen (Barley *et al.*, 1965; Ehlers *et al.*, 1983; Materechera *et al.*, 1991).

Deshalb sollte große Vorsicht im Befahren mit schweren Maschinen, vor allem bei nassen Bodenverhältnissen, geboten sein, um durch Verdichtungen hervorgerufenem Trockenstress der Pflanzen vorzubeugen.

Die Wurzelgrabungen zeigten, dass Hopfen bei guten Wachstumsverhältnissen im Boden über große Wasserreserven verfügt. Da es sich allerdings nur um eine sehr geringe Stichprobenanzahl von fünf Grabungen handelt, sind weitere Grabungen notwendig, um die erhaltenen Ergebnisse zu bekräftigen.

So wären zukünftig ergänzende Wurzeluntersuchungen idealerweise an verschiedenen Sorten und verschiedenen Bodenarten durchzuführen. Auch interessant wären entsprechende Untersuchungen im Vergleich bewässerter (Tröpfchen- und Flächenbewässerung) und unbewässerter Flächen.

4.4. RETROSPEKTIV ERSTELLTE WASSERBILANZEN IN DER HALLERTAU

4.4.1. Verdunstungsraten ET_0 in der Hallertau

Klimatische Wasserbilanzierungen werden häufig für die Steuerung einer Bewässerung von ackerbaulichen Kulturen verwendet (Kool *et al.*, 2014). Der Vorteil liegt dabei in der Einfachheit der Anwendung. Neben einer Berechnung mit den jeweiligen Korrekturfaktoren, normalerweise in tabellarischer Form, müssen nur noch die vor Ort gefallenen Niederschläge registriert und in die Berechnungen eingepflegt werden. Auf das Verwenden von Sensoren kann verzichtet werden (Allen *et al.*, 1998).

An den Werten der ET_0 -Werte über die Hallertau erkennt man, dass die Schwankungen zwischen den einzelnen Stationen in den meisten Fällen nur geringfügig voneinander abweichen.

Dies zeigt, dass für Berechnungen klimatischer Wasserbilanzen in der Praxis sehr gut die nächstgelegene Wetterstation als objektives Steuerungskriterium herangezogen werden könnte. Bei einem maximalen Abstand von knapp 30 Kilometern zwischen den Stationen waren meist nur Abweichungen von 1 mm zu verzeichnen. Die Messdaten der Wetterstationen sind darüber hinaus unter der Homepage www.wetter-by.de (Stand Mai 2016) frei zugänglich. Des Weiteren gibt es viele Anbieter, welche eine vorgefertigte Benutzeroberfläche für Wasserbilanzberechnungen bereithalten.

4.4.2. Wasserbilanzen für Hopfen in der Hallertau

Für die Berechnung des pflanzenverfügbaren Wassers ist neben kulturspezifischen Korrekturfaktoren (k_c) auch eine genaue Angabe der Wurzeltiefe der jeweiligen Kultur nötig. Mit den durchschnittlichen 5,0 m³ Bodenvolumen, welche die Untersuchung der Rhizosphäre ergaben (vgl. 3.3.), ließen sich nachvollziehbare Berechnungen anstellen.

Die Übertragung der beobachteten 5,0 m³ Bodenvolumen auf 5,0 m² Bodenfläche, die beim Anbau von ca. 2000 Pflanzen/ha zur Verfügung stehen, resultiert in eine effektive Wurzeltiefe von 1,0 m. Auch Allen *et al.* (1998) gehen für Berechnungen an Hopfen von einem effektiven Wurzelraum von 1,0 bis 1,2 m aus. Idealerweise sind die Wurzeltiefen standortspezifisch zu erfassen, was allerdings aufgrund des großen Aufwands schwer realisierbar ist.

Die Verdunstungswerte ET_{Hopfen} in der Hallertau decken sich mit der Literatur oder liegen teilweise sogar darunter. Laut Rybáček (1991) verbraucht Hopfen eine Jahressumme von ca. 482 mm an Wasser. Ähnliche Angaben mit 450 bis 500 mm stammen aus Jugoslawien, wobei in Washington im Yakima Valley sogar Verbrauchswerte von 760 mm berichtet werden (Neve, 1991). Neuere Berechnungen aus Spanien ergeben eine Verdunstung, gepaart aus der Trans-

piration von Hopfen, Boden und Zwischenfrucht von 398 bis 576 mm in den Jahren 2012 bis 2014 (Fandiño *et al.*, 2015). Mit durchschnittlich 365,5 mm, bei minimal 317,1 mm und maximal 414,0 mm, liegen die für die Hallertau errechneten Werte im gleichen Zeitraum darunter (vgl. Tab. 14), was vermutlich an den unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zwischen dem Versuchsfeld in Spanien und der Hallertau liegt.

Bezieht man die Verdunstungswerte von Hopfen (vgl. Tab. 14) auf das langjährige Mittel der Niederschlagssummen von Mai bis Mitte September mit ca. 476 mm (vgl. Tab. 7), wird deutlich, dass in den meisten Jahren die Niederschlagssummen der Hallertau die Transpirationswerte von Hopfen decken.

Dennoch haben die Berechnungen klare Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Standorten der Hallertau aufgedeckt, wie sie auch aus der Praxis bekannt sind. So zeigten die retrospektiven Berechnungen des pflanzenverfügbaren Wassers, dass vor allem auf Sandböden Hopfenbau durch die begrenzte Wasserhaltefähigkeit erschwert ist.

Zwar wird Hopfenbau in der Hallertau auf nur knapp einem Viertel der Fläche auf Sandboden praktiziert. Auch liegt dabei vermutlich in allen Fällen die nutzbare Feldkapazität der Hopfengärten über der des in den Berechnungen als Extremstandort herausgestellten Standortes „Baumannshof“ mit einer nutzbaren Feldkapazität von gerade einmal 6,43 mm/dm.

Doch auch der Standort Sandharlanden mit einer nFK von 11,35 mm/dm, welcher als repräsentativ für Hopfenbau auf Sandboden in der Hallertau angesehen werden kann, zeigte, dass auf solchen Böden in den meisten Jahren die Wasserreserven des Bodens nicht für eine optimale Versorgung der Pflanzen ausreichend sind, was vor allem am hohen Wasserverbrauch am Ende der Vegetationsphase liegt und in starker Korrelation zur Blattfläche steht (vgl. 3.4.3.; Abb. 61 und Evans, 2003).

Auf Lehmböden hingegen ist die Notwendigkeit einer Bewässerung nicht in allen Jahren gegeben. Zwar zeigte sich bei den Berechnungen, dass auch hier in drei der fünf betrachteten Jahre auf den meisten Standorten das pflanzenverfügbare Wasser unter einen Wert von 40 % fiel, was als Minimalgrenze angesehen werden kann (Sadras und Milroy, 1996); dennoch zeigten die Feldversuche und die physiologischen Messungen, dass Wasserknappheit nicht der einzige limitierende Faktor bei der Ertragsbildung darstellt.

Auch gehen die angewendeten Berechnungen bei Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers stets von der gleichen Transpirationsleistung der Pflanzen aus, was nicht der Realität entspricht, da Pflanzen bei abnehmendem Wassergehalt im Boden ihren Wasserverbrauch drosseln (Turner *et al.*, 1985). Dies konnte auch schon an Hopfen beobachtet werden (Gloser *et al.*, 2013) und wurde in dieser Arbeit von den vergleichenden Messungen des Gaswechsels

zwischen bewässerten und unbewässerten Hopfenpflanzen im Feld bestätigt (vgl. 3.2.2.). Demnach wäre ab einem bestimmten Bodenwassergehalt von einem geminderten ET_{Hopfen} auszugehen, was die Berechnungen nicht berücksichtigen und somit die Wasserverfügbarkeit der Jahre knapper ausdrückt, als es *in vivo* vermutlich war.

Außerdem wird empfohlen, das Einsetzen der einzelnen Korrekturfaktoren jeweils standortspezifisch an die Stadien der BBCH-Werte, wie sie im Feld vorzufinden sind, anzupassen. Diese Vorgehensweise konnte bei den Berechnungen nicht berücksichtigt werden, sodass die k_c -Werte an allen Standorten und in allen Jahren zum 15. Juni und den 24. August einsetzen. Dies kann aufgrund der starken Einflüsse des k_c -Wertes auf die errechnete Evapotranspiration von Hopfen theoretisch zu Abweichungen der realen Bedingungen vor Ort führen.

4.4.3. Simulation einer optimalen Bewässerung

Die Simulationen optimaler Bewässerungen anhand retrospektiver Wasserbilanzrechnungen zeigte, dass in der Hallertau große Unterschiede zu beachten sind. Um die Bodenwasservorräte der unterschiedlichen Bodenarten von 60 % auf 90 % aufzufüllen, wären 19,3 mm auf einem leichten Sandboden und bis zu 67,7 mm auf einem Lehmboden nötig (vgl. Tab. 15).

Übertragen auf die Bewässerungsintensität von 0,7 mm/h der gegenwärtig verwendeten Tropfschläuche bedeutet dies eine Bewässerungsdauer von 27 h auf Sand- und 97 h auf Lehmboden.

Hinzu kommt eine Limitierung durch Pumpenleistungen von durchschnittlich 20 m³/h für zu bewässernde Flächen von durchschnittlich 20 ha. Dies hat zur Folge, dass nur sehr kleine Parzellen bewässert werden können. Da die Evapotranspiration der übrigen Hopfengärten voranschreitet, muss die Bilanzierung nach Tagen des Bewässerungsturnus wieder völlig neu betrachtet werden, was die Art der Steuerung sehr erschwert, obwohl diese Erleichterung bringen soll.

Leistungsstärkere Pumpen, die in kürzerer Zeit mehr Wasser fördern und ausbringen könnten, würden diesbezüglich Abhilfe schaffen. Hierbei wäre auch ein flächig befeuchtendes Bewässerungssystem von Vorteil, da sich dies zum einen rechnerisch besser auf die Niederschläge und Bodenfläche übertragen lässt und sich zum anderen mit Beregnungsintensitäten von 10 bis 60 mm/h weitaus schneller große Mengen an Wasser in den Gärten verteilen ließen (Michel und Sourell, 2014).

Die Simulationen zeigten aber auch, dass die Mengen in manchen Jahren und vor allem in sandigen Regionen nicht ausreichend sind. So waren im Jahr 2015 an drei der sechs Stationen

rechnerisch sogar über 200 mm nötig gewesen, um die Pflanzen mit ausreichend Wasser zu versorgen. Auf Sandboden waren in 50 % der Fälle rechnerisch ebenfalls mehr als 200 mm nötig.

Hier sollte langfristig über eine Erhöhung der Wasserentnahmegenehmigungen beraten werden, da aufgrund der Klimaerwärmung Niederschlagsdefizite in den Sommermonaten von über 15 % prognostiziert werden (Danneberg *et al.*, 2012) und eine bedarfsgerechte Bewässerung nur mit großen Bewässerungsgaben bei wenig Bewässerungsfrequenzen pflanzenbaulich und pflanzenphysiologisch sinnvoll erscheint.

4.5. ABSCHLIESSENDE BEURTEILUNG UND KONSEQUENZ FÜR DIE PRAXIS

Das Wachstum und der Ertrag von Hopfen hängen, wie in vielen Studien bestätigt, stark von den Wassermengen ab, die die Pflanzen erhalten. Dabei sind vor allem drei Parameter als limitierende Faktoren zu nennen, deren Bedeutung in dieser Studie bekräftigt wurden.

Diese sind die meteorologischen Verhältnisse, vor allem die anfallenden Niederschläge eines Anbaujahres, die Morphologie der Wurzel und des damit verbundenen erschlossenen Bodenvolumens sowie die Wasserhaltefähigkeit der Böden. Die letzten beiden Parameter sollten daher vor der Installation eines Bewässerungssystems stets untersucht werden, um zu entscheiden, ob eine Bewässerung sinnvoll ist, oder ob man zum Beispiel durch optimierte Maßnahmen der Bodenbearbeitung, wie konservierende Bodenbearbeitung zu einem besseren Wurzelwachstum und einer höheren Wasserhaltefähigkeit beitragen kann.

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse und der Betrachtung anderer Studien kann die Frage nach einer Steigerung des Ertrages und der Alphasäure von Hopfen durch Tröpfchenbewässerung in den gemäßigten Anbaugebieten von Deutschland nur unter bestimmten Voraussetzungen positiv beantwortet werden. So zeigte sich, dass vor allem in Jahren mit ausbleibenden Niederschlägen, wie im Jahr 2015, mit einer Erhöhung hinsichtlich beider Parameter zu rechnen ist, wobei auch diese Aussage nicht auf alle Gebiete übertragen werden kann und die Standorte separat betrachtet werden müssen. Auch ist nicht auszuschließen, dass eine Tröpfchenbewässerung in Flächen, in denen aufgrund unzureichender Durchwurzelbarkeit die Erträge unterdurchschnittlich ausfallen, häufiger positive Einflüsse zur Folge hat.

Es sollte einzelbetrieblich überprüft werden, ob es Flächen oder Sorten gibt, welche sensibel auf Trockenheit reagieren, und den Wassereinsatz auf diese Flächen beschränken. Hierbei gelten die Bittersorten als trockenstresstoleranter wie die Aromasorten.

Speziell die untersuchte Tröpfchenbewässerung, welche als sehr vorteilsbringende Produktionstechnik anderer landwirtschaft- und gartenbaulichen Kulturen gilt, ist im Zusammen-

4. DISKUSSION

hang mit dem vorhandenen Hopfenanbau in Deutschland zu überdenken. So ist dieser neben regelmäßigen Niederschlägen auch von limitierten Wasserressourcen geprägt. In Notzeiten fehlt die nötige Wassermenge aufgrund geringer Pumpenleistung, welche grundsätzlich erhöht werden sollte.

Hinsichtlich der Positionierung der Tropfschläuche kann keine eindeutige Empfehlung gegeben werden. Auch wenn die Arbeitswirtschaftlichkeit die schlechteste ist, wird die oberirdische Wasserdarbietung auf dem Bifang als am effektivsten angesehen. Als Grund hierfür kann die direkte Verbindung der Adventivwurzeln im Bifangbereich mit der oberirdischen Hopfenpflanze genannt werden, wie die Untersuchungen der Wurzelmorphologie gezeigt haben.

Des Weiteren sollte eine Bewässerung unabhängig von der Positionierung der Tropfschläuche lediglich dann stattfinden, wenn sie wirklich nötig ist, was in der Praxis häufig nicht beachtet wird. Klimatische Wasserbilanzen können hierbei eine gute Entscheidungshilfe liefern, sollten aber in weiteren Untersuchungen vor allem hinsichtlich des Einsatzes der spezifischen k_c -Faktoren evaluiert werden.

Im Umkehrschluss mit anderen Studien wird vermutet, dass es durch die lokalisierte Verabreichung des Wassers bei Tröpfchenbewässerung zu einem verminderten Wurzelwachstum kommen kann. Damit wird zum einen das natürliche Wurzelwachstum eingeschränkt und zum anderen die Pflanzen unnötig an das zusätzliche Wasser gewöhnt. Das Potential, natürliche Niederschläge aufzunehmen, wird dadurch langfristig verringert und erhöht den Bedarf an einer zusätzlichen Bewässerung. Außerdem wird vermutet, dass Wasser nicht immer den limitierenden Faktor darstellt und die Ausbringung von Nährstoffen im Bewässerungswasser (Fertigation) geprüft werden sollte.

Auch eine dauerhafte Installation der Tropfschläuche über dem Bifang im Gerüst wird als gute Möglichkeit erachtet, insofern dadurch nicht der Krankheitsdruck durch Pilzinfektionen erhöht wird, was durch eine nächtliche Wassergabe umgangen werden könnte.

Physiologische Messungen haben gezeigt, dass ein Abfall der Photosyntheseaktivität nicht zwangsläufig zu einem geringeren Ertrag führt. Außerdem zeigten die Korrelationsrechnungen zu klimatischen Parametern eine stärkere Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchte, als zur Bodenfeuchte im oberen Bereich des Bodens, was die Verwendung einer sensorabhängigen Bewässerungssteuerung zusätzlich schwierig erklären lässt, und es sich zeigte, dass Hopfen Phasen mit geringen Wasserreserven im Boden, aber hoher Luftfeuchtigkeit überdauern kann, weshalb die Verwendung der klimatischen Wasserbilanzierung empfohlen wird. Als effektiver Wurzelraum kann dabei eine Wurzeltiefe von 1,0 m angenommen werden, was sich aus einem durchschnittlichen durchwurzelten Bodenvolumen von 5,0 m³ bei 5,0 m² Grundfläche ergibt.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, Italy
- Araujo, F., Williams, L. E., Grimes, D. W. & Matthews, M. A. (1995): A comparative study of young 'Thompson Seedless' grapevines under drip and furrow irrigation. I. Root and soil water distributions. *Scientia Horticulturae*, 60(3), 235-249
- Barley, K. P., Farrell, D. A. & Greacen, E. L. (1965): The influence of soil strength on the penetration of a loam by plant roots. *Soil Research*, 3(1), 69-79
- Barth (2015): The Barth Report–Hops2014/2015, http://www.barthhaasgroup.com/images/pdfs/reports/2015/BarthReport_2014-2015_EN.pdf, aufgerufen am 23.03.16
- Beard, F. H. (1943): Root Studies. X. The Root-Systems of Hops on Different Soil Types. *Journal of Pomology and Horticultural Science*, 20(4), 147-154
- Becker, T. W. & Fock, H. P. (1986): The activity of nitrate reductase and the pool sizes of some amino acids and some sugars in water-stressed maize leaves. *Photosynthesis research*, 8(3), 267-274
- Bhatarai, S. P., Huber, S. & Midmore, D. J. (2004): Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils. *Annals of applied biology*, 144(3), 285-298
- Biendl M., Engelhard B., Forster A., Gahr A., Lutz A., Mitter W., Schmidt R. & Schönberger C. (2012): Hopfen – vom Anbau bis zum Bier, Fachverlag Hans Carl GmbH, Nürnberg
- Bierhuizen, J. F. & Slatyer, R. O. (1965): Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves. *Agricultural Meteorology*, 2(4), 259-270
- Blokhina, O., Virolainen, E. & Fagerstedt, K. V. (2003): Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. *Annals of botany*, 91(2), 179-194
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013): Wasserwirtschaft in Deutschland Teil 2, Gewässergüte, http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/wawi_teil_02_2014_web_korr_25.7.2014_2.pdf, aufgerufen am 19.04.16
- Borde K., Chwojka C., Petermann J. & Schmidt U. (1989): Hopfen, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H. & Baumgardner, G. A. (1997): Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111(1), 1-11
- Cary, J. W. & Fisher, H. D. (1971): Plant water potential gradients measured in the field by freezing point. *Physiologia Plantarum*, 24(3), 397-402
- Chartzoulakis, K., Patakas, A., Kofidis, G., Bosabalidis, A. & Nastou, A. (2002): Water stress affects leaf anatomy, gas exchange, water relations and growth of two avocado cultivars. *Scientia Horticulturae*, 95(1), 39-50
- Cheng, L., Fuchigami, L. H. & Breen, P. J. (2000): Light absorption and partitioning in relation to nitrogen content in 'Fuji' apple leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 125(5), 581-587
- Crawley, M. (2002): Statistical Computing: An Introduction to Data Analysis using S-Plus, Wiley-Verlag, New York
- Danneberg, J., Ebert, C., Komischke, H., Korck, J., Morscheid, H. & Weber, J. (2012): Der Klimawandel in Bayern. Auswertung regionaler Klimaprojektionen – Klimabericht Bayern. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg
- De Keukeleire, J., Janssens, I., Heyerick, A., Ghekiere, G., Cambie, J., Roldán-Ruiz, I., Van Bockstaele, E. & De Keukeleire, D. (2007): Relevance of organic farming and effect of climatological conditions on the formation of α -acids, β -acids, desmethylxanthohumol, and xanthohumol in hop (*Humulus lupulus* L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(1), 61-66
- Delahunty, K. & Johnson S., Johnston, J. (2011): An Experiment on the Effectiveness of Irrigation and Cover Cropping to Produce Sustainable Hops in Maine, USDA Northeast SARE Final Report: FNE11-711, http://mysare.sare.org/sare_project/fne11-711/?page=final&view=print, aufgerufen am 20.04.16
- Delahunty, K. & Johnston, J. (2014): Investigating best practices for timing and amount of organic soluble nitrate fertigation of hops in the Northeast, USDA Northeast SARE Final Report: FNE 14–796-27806, http://mysare.sare.org/wp-content/uploads/998543FNE14_796_FinalReport.pdf, aufgerufen am 20.04.16
- Dormann, C.F. & Kühn, I. (2011): Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung-UFZ, 2, https://www.ufz.de/export/data/1/22396_deutschsttatswork_23022011.pdf aufgerufen am 03.03.16

5. LITERATURVERZEICHNIS

- Düring, H. (1988): CO₂ assimilation and photorespiration of grapevine leaves: responses to light and drought. *Vitis*, 27(19), 208
- Edwards, C. A. & Lofty, J. R. (1978): The influence of arthropods and earthworms upon root growth of direct drilled cereals. *Journal of Applied Ecology*, 789-795
- Ehlers, W. (1996): Wasser in Pflanze und Boden. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F. & Böhm, W. (1983): Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research*, 3(3), 261-275
- Elfving, D. C., Kaufmann, M. R. & Hall, A. E. (1972): Interpreting Leaf Water Potential Measurements with a Model of the Soil-Plant-Atmosphere Continuum. *Physiologia plantarum*, 27(2), 161-168
- Ellenberg, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 5. Auflage. Ulmer-Verlag, Stuttgart
- Engelhard, B., Kamhuber, K., Lutz, A., Lachermeier, U. & Bergmeier, M. (2011): Blattflächenentwicklung und Ertragsaufbau wichtiger Hopfsorten, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 11, 2011
- Escalona, J. M., Flexas, J. & Medrano, H. (2000): Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis under water stress in field-grown grapevines. *Functional Plant Biology*, 27(1), 87-87
- Eschrich, W. (1995): Funktionelle Pflanzenanatomie. Springer-Verlag, Heidelberg
- Evans, R. (2003): Hop management in water-short periods. Drought Advisory, issued by the Washington State University Cooperative Extension and the U.S. Department of Agriculture. EM4816, <http://cru.cahe.wsu.edu/CEPublications/em4816/em4816.pdf>, aufgerufen am 14.04.16
- Fandiño, M., Olmedo, J. L., Martínez, E. M., Valladares, J., Paredes, P., Rey, B. J., Mota, M. & 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*, 77, 204-217
- Fernández, J. E., Díaz-Espejo, A., Infante, J. M., Durán, P., Palomo, M. J., Chamorro, V., Girón I. F. & Villagarcía, L. (2006): Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant and Soil*, 284(1-2), 273-291
- Fletcher, A. L., Sinclair, T. R. & Allen, L. H. (2007): Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered 'slow-wilting' and commercial soybean. *Environmental and Experimental Botany*, 61(2), 145-151
- Flexas, J., Bota, J., Escalona, J. M., Sampol, B. & Medrano, H. (2002): Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations. *Functional Plant Biology*, 29(4), 461-471
- Foyer, C. H., Valadier, M. H., Migge, A. & Becker, T. W. (1998): Drought-induced effects on nitrate reductase activity and mRNA and on the coordination of nitrogen and carbon metabolism in maize leaves. *Plant Physiology*, 117(1), 283-292
- Franks, P. J. & Farquhar, G. D. (1999): A relationship between humidity response, growth form and photosynthetic operating point in C₃ plants. *Plant, Cell and Environment*, 22(11), 1337-1349
- Frenken, K. (2009): Irrigation in the Middle East region in figures. AQUASTAT Survey – 2008. *FAO Water Reports* 34, FAO, Rome, Italy
- Fuß, E. (2014): Evaluierung von verschiedenen Methoden zur Erfassung von Trockenstress bei Hopfen in der Hallertau, Bachelorarbeit an der Technischen Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Lehrstuhl für Pflanzenernährung
- 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* 74, 219–242.
- Giorio, P., Sorrentino, G. & d'Andria, R. (1999): Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 42(2), 95-104
- Gloser, V., Balaz, M., Jupa, R., Korovetska, H. & Svoboda, P. (2013): The response of *Humulus lupulus* to drought: the contribution of structural and functional plant traits. *Acta Horti*, 1010, 149-154
- Goldberg, D., Gornat, B. & Bar, Y. (1971): The distribution of roots, water and minerals as a result of trickle irrigation. *Journal American Society of Horticultural Science*. 96 (5): 645-648
- Gollan, T., Turner, N. C. & Schulze, E. D. (1985): The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. *Oecologia*, 65(3), 356-362
- Gradmann, H. (1928): Untersuchungen über die Wasserverhältnisse des Bodens als Grundlage des Pflanzenwachstums. *I. Jb. wiss. Bot.* 69, 1–100

- Graf, T., Beck, M., Mauermeier, M., Ismann, D., Portner, J., Doleschel, P. & Schmidhalter, U. (2014): *Humulus lupulus* – The Hidden Half, *Brewing Science* 67, 161-166
- Hanson, B., Peters, D. & Orloff, S. (2000): Effectiveness of tensiometers and electrical resistance sensors varies with soil conditions. *California Agriculture*, 54(3), 47-50
- Hanson, B. R., Schwankl, L. J., Schulbach, K. F. & Pettygrove, G. S. (1997): A comparison of furrow, surface drip, and subsurface drip irrigation on lettuce yield and applied water. *Agricultural Water Management*, 33(2), 139-157
- Hatch, T. A., Hickey, C. C. & Wolf, T. K. (2011): Cover crop, rootstock, and root restriction regulate vegetative growth of Cabernet Sauvignon in a humid environment. *American journal of enology and viticulture*, 6(3), 298-311
- Hebbar, S. S., Ramachandrapa, B. K., Nanjappa, H. V. & Prabhakar, M. (2004): Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *European Journal of Agronomy*, 21(1), 117-127
- Hejnák, V., Hniličková, H. & Hnilička, F. (2014): Effect of ontogeny, heterophylly and leaf position on the gas exchange of the hop plant. *Plant, Soil and Environment*, 60(11), 525-530
- Heßdörfer, D. (2015): Untersuchungen zur kontinuierlichen Wasserpotentialmessung sowie des Einflusses verschiedener Tropfbewässerungssysteme auf die generative und vegetative Wachstumsleistung von *Vitis vinifera* (cv. Silvaner), Dissertation der Hochschule Geisenheim University und Justus-Liebig Universität Gießen
- Hniličková, H., Hnilička, F., Svoboda, P., Kořen, J. & Martinkova, J. (2009): The impact of water deficit on selected physiological characteristics of juvenile hop plants (*Humulus lupulus* L.). *Cereal research communications* 37 (1), 301-304
- Hopsteiner (2015 a): Entscheidungsdaten für den Hopfeneinkauf 2015, http://www.hopsteiner.de/fileadmin/redeakteur/pdf/neuigkeiten-berichte/entscheidungsdaten-hopfeneinkauf/Entscheidungsdaten_fuer_den_Hopfeneinkauf_2015.pdf, aufgerufen am 23.03.16
- Hopsteiner (2015 b): Sortendatenblätter 2015, <http://www.hopsteiner.de/info/nc/sortendatenblaetter.html>, aufgerufen am 09.02.2016
- Hsiao, T. C., Acevedo, E., Fereres, E. und Henderson, D. W. (1976): Water stress, growth, and osmotic adjustment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 273(927), 479-500
- Huber, B. (1924): Die Beurteilung des Wasserhaushaltes der Pflanze. *Jb. wiss. Bot*, 64(1)
- IHGC, International hop grower convention (2015): Certification of hops and hop products – List of world hop varieties, http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/hopfen_ihgc_list_-_hop_varietie_s_2015-aktualisiert.pdf, aufgerufen am: 07.03.2016
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Climate Change 2014: Impacts, Adaption and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. & White, L.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA, pp. 1-32
- ISO, DIN 11277 (2002): Bodenbeschaffenheit–Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden. Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. Beuth-Verlag, Berlin
- Jeitler, H. W. (2000): Zur Vergesellschaftung der Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) im oststeirischen Grabenland. *Mitt. Naturwiss. Ver. Steiermark*, 130, 203-226
- Jones, H.G. (2004): Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J. Exp. Bot.* 55, 2427–2436
- Jupa, R., Baláž, M., Svoboda, P. & Gloser, V. (2013): Inherent variability in structural and functional traits of xylem among three hop varieties. *Plant Soil Environ*, 59, 273-279
- Kammhuber K. (2008): Die Nahinfrarotspektroskopie in der Hopfenanalytik – Möglichkeiten und Grenzen; *Brauindustrie* 2, 42-44
- Kammhuber, K. (2013). Analytic Aroma Characterization of the new Hüller Special-Flavor-Hops. International Hop Growers Convention, Kiew, *Proceedings of the Scientific Commission*, 37-39
- Kenny, S. T. (2005): Photosynthetic measurements in hop (*Humulus*). *Acta Hort.* 668, 241-248
- Kohlmann, H. & Kastner, A. (1975): Der Hopfen, Hopfen-Verlag, Wolnzach
- Kolenc, Z., Vodnik, D., Mandelc, S., Javornik, B., Kastelec, D. & Čerenak, A. (2016): Hop (*Humulus lupulus* L.) response mechanisms in drought stress: Proteomic analysis with physiology. *Plant Physiology and Biochemistry*, 105, 67-78
- Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J. L., Sauer, T. J. & Ben-Gal, A. (2014): A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 56-70

5. LITERATURVERZEICHNIS

- Kopecky, J. (1991): The effect of trickle irrigation on the hops yield and quality, *Rostlinna Vyroba* 37 (8), 669-674
- Kopecky, J. & Slavik, L. (1997): Influence of trickle irrigation on the yield stability and quality of hops in Zatec hop region. *Rostlinna Vyroba* 43 (7), 337-341
- Korovetska, H., Novák, O., Jůza, O. & Gloser, V. (2014): Signalling mechanisms involved in the response of two varieties of *Humulus lupulus* L. to soil drying: I. changes in xylem sap pH and the concentrations of abscisic acid and anions. *Plant and soil*, 380(1-2), 375-387
- Krüger, E., Schmidt, G. & Brückner, U. (1999): Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Scientia Horticulturae*, 81(4), 409-424.
- Kruskal, W. H. & Wallis, W. A. (1952): Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American Statistical Association*, 47, 583-621
- Kutschera, L. & Lichtenegger, E. (1992): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen, Band 2, Teil 1, *Pteridophyta* und *Dicotyledoneae* (*Magnoliopsida*), Teil 1, Morphologie, Anatomie, Ökologie, Verbreitung, Soziologie, Wirtschaft, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- Kutschera, L. & Lichtenegger, E. (1982): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen, Band 1, *Monocotyledoneae*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- Kutschera, L.; Lichtenegger, E. & Sobotik, M. (2009): Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues, DLG-Verlag, Frankfurt a. M.
- Landratsamt Bodenseekreis (2011): Landwirtschaftsamt: Versuchsberichte 2011 bis 2015, Hopfenversuchsfeld Tettngang/Strass: <http://www.bodenseekreis.de/umwelt-landnutzung/landwirtschaft/fachinformationen/hopfenbau/versuchsfeld/versuchsprogramm-2014.html>, aufgerufen am 16.03.2016
- Lange, O. L., Kappen, L. & Schulze, E. D. (Eds.). (2012): Water and plant life: problems and modern approaches (Vol. 19). Springer Science and Business Media, Heidelberg
- Lange, O. L., Lösch, R., Schulze, E. D. & Kappen, L. (1971): Responses of stomata to changes in humidity. *Planta*, 100(1), 76-86
- Larcher, W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt, 6. Aufl. Ulmer-Verlag, Stuttgart
- Larcher, W., De Moraes, J. A. P. V. und Bauer, H. (1981): Adaptive responses of leaf water potential, CO₂-gas exchange and water use efficiency of *Olea europaea* during drying and rewatering. *Components of productivity of Mediterranean-climate regions Basic and applied aspects* (77-84). Springer-Verlag, Netherlands
- LBP – Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau und Gesellschaft für Hopfenforschung Hans-Pfüll-Institut (1981): Jahresbericht 1980 Sonderkultur Hopfen
- LBP – Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau und Gesellschaft für Hopfenforschung Hans-Pfüll-Institut (2002): Jahresbericht 2001 Sonderkultur Hopfen
- LfL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Engelhard, B., Lutz, A. & Seigner, E. (2011): Hopfen für alle Biere der Welt, LfL-Information
- LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft und Gesellschaft für Hopfenforschung e.V. (2012): Jahresbericht 2011 Sonderkultur Hopfen, LfL-Information
- LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft und Gesellschaft für Hopfenforschung e.V. (2013): Jahresbericht 2012 Sonderkultur Hopfen, LfL-Information
- LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft und Gesellschaft für Hopfenforschung e.V. (2014): Jahresbericht 2013 Sonderkultur Hopfen, LfL-Information
- LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2015): Arbeitsbereich Hopfen, Wolnzach - Hüll, "Hopfen 2015 (Anbau, Sorten, Düngung, Pflanzenschutz, Ernte)", LfL - Schriftenreihe "Grünes Heft"
- Linke, W. & Rebl, A. (1950): Der Hopfenbau, 2. Aufl., Hans Carl-Verlag, Nürnberg
- Lösch, R. (2003): Wasserhaushalt der Pflanzen, Quelle-Mayer Verlag, Wiebelsheim
- Lutz A., Kneidl J., Seigner E. & Kammhuber K. (2009): Hopfenqualität, Ernte zum richtigen Zeitpunkt, LfL-Information
- Mailhol, J., Ruelle, P. & Nemeth, I. (2001): Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science*, 20(3), 139-147
- Mann, H. & Whitney, D. (1947): On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of mathematical Statistics* (18): 50-60
- Masle, J. & Passioura, J. B. (1987): The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Functional Plant Biology*, 14(6), 643-656

- Materechera, S. A., Dexter, A. R. & Alston, A. M. (1991): Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant and Soil*, 135(1), 31-41
- Maurer, K. A., Berg, G. & Seefelder, S. (2014): Untersuchungen zur Verticillium-Welke im Hopfenanbaugebiet Hallertau. *Gesunde Pflanzen*, 66(2), 53-61
- Maurer, K. A., Radišek, S., Berg, G. & Seefelder, S. (2013): Real-time PCR assay to detect *Verticillium albo-atrum* and *V. dahliae* in hops: Development and comparison with a standard PCR method. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 120(3), 105-114
- McCann, I. R., Kincaid, D. C. & Wang, D. (1992): Operational characteristics of the watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. *Applied Engineering in Agriculture*, 8(5), 603-609
- Meek, B. D., Ehlig, C. F., Stolzy, L. H. & Graham, L. E. (1983): Furrow and trickle irrigation: effects on soil oxygen and ethylene and tomato yield. *Soil Science Society of America Journal*, 47(4), 631-635
- Mengel, K., Kirkby, E. A., Kosegarten, H., Appel, T. (2001): Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands
- Meyer, W. S., Barrs, H. D., Smith, R. C. G., White, N. S., Heritage, A. D. & Short, D. L. (1985): Effect of irrigation on soil oxygen status and root and shoot growth of wheat in a clay soil. *Crop and Pasture Science*, 36(2), 171-185
- Michel, R. & Sourell, H. (2014): Bewässerung in der Landwirtschaft, Erling-Verlag, Clenze
- Michelakis, N., Vougioucalou, E. & Clapaki, G. (1993): Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 24(2), 119-131
- Milburn, J. A. (1979): Water flow in plants. Addison-Wesley Longman-Verlag, Boston, USA
- Moir, M. (2000): Hops: a millennium review. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 58(4), 131-146
- Monfreda, C., Ramankutty, N. & Foley, J. A. (2008): Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global biogeochemical cycles*, 22(1) GB1022
- 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*, 149(6), 913-919
- Mullet, J.E., & Whitsitt, M.S. (1996): Plant cellular responses to water deficit. *Plant Growth Regul.* 20, 119 – 124
- 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, Department of Biological Systems Engineering.
- Neve R.A. (1991): Hops. Chapman and Hall-Verlag; New York, USA
- Oussible, M., Crookston, R. K. & Larson, W. E. (1992): Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agronomy Journal*, 84(1), 34-38
- Paschold, P.J., Frühauf, C., Schaller, J., Kleber, J. & Mayer, N. (2011): „Geisenheimer Bewässerungssteuerung“ für Penman und FAO-Grasverdunstung – Unterschiedliche Wetterstationen sind für die Geisenheimer Methode nutzbar. *Gemüse* 47 (6) 28-29
- Patzwahl, W. (2007). Bewässerung im Weinbau. Ulmer- Verlag, Stuttgart
- Pavlovic, V., Pavlovic, M., Cerenak, A., Kosir, I. J., Ceh, 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* 58(4), 155-160
- Pavlovic, M., Pavlovic, V., 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 Environ*, 59(6), 267-272
- Pavlovic, M., Pavlovic, V., 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 Environ*, 59(6), 267-272
- Pinzl, C. (2002): Die Hopfenregion. Hopfenanbau in der Hallertau – eine Kulturgeschichte. Verlag Deutsches Hopfenmuseum Wolnzach, Wolnzach
- Polomski, J. & Kuhn, N. (1998): Wurzelsysteme. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Haupt-Verlag, Bern, Stuttgart, Wien
- Portmann, F. T., Siebert, S. & Döll, P. (2010): MIRCA2000—Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(1)
- Pott, R. (1995): Die Pflanzengesellschaften Deutschlands, 2. Aufl. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Pou, A., Flexas, J., Alsina, M. D. M., Bota, J., Carambula, C., De Herralde, F., Galmés, J., Lovisolo C., Jiménez M., ..., Z & Medrano, H. (2008): Adjustments of water use efficiency by stomatal regulation during drought and recovery in the drought-adapted *Vitis* hybrid Richter-110 (*V. berlandieri* × *V. rupestris*). *Physiologia Plantarum*, 134(2), 313-323

5. LITERATURVERZEICHNIS

- Priest, F. G. & Stewart, G. G. (2006): Handbook of brewing. CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton
- R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/> aufgerufen am 31.10.15
- Rawson, H. M., Begg, J. E. & Woodward, R. G. (1977): The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of leaves of several plant species. *Planta*, 134(1), 5-10
- Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., Wessolek, G. & Zacharias, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. *Schriftenreihe „Bodenökologie und Bodengenese“*, Berlin
- Rid, H. (1966): Qualität durch standortgerechten Hopfenanbau, *Hopfenrundschau* 13, 225-229
- Roßbauer, G. & Zwack, F. (1989): Umwelt- und bedarfsgerechte Stickstoffdüngung durch N_{min} -Untersuchung. *Hopfenrundschau* 40, 32-25
- Roßbauer, G.; Buhr, L.; Hack, H.; Hauptmann, S.; Klose, R.; Meier, U.; Staus, R. & Weber, E. (1995): Phänologische Entwicklungsstadien von Kultur-Hopfen (*Humulus lupulus* L.). BBCH - Stadien, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 249 – 253
- Rothmaler, W. & Jäger, E. J. (2005): Gefäßpflanzen: Grundband, Bd. 2. Spektrum-Verlag, Heidelberg
- Royle, D. J. & Thomas, G. G. (1973): Factors affecting zoospore responses towards stomata in hop downy mildew (*Pseudoperonospora humuli*) including some comparisons with grapevine downy mildew (*Plasmopara viticola*). *Physiological Plant Pathology*, 3(3), 405-417
- Rybáček V. (1991): Hop production, Elsevier-Verlag, Amsterdam
- Sadras, V. O. & Milroy, S. P. (1996): Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Research*, 47(2), 253-266
- Sammis, T. W. (1980). Comparison of sprinkler, trickle, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops. *Agronomy Journal*, 72(5), 701-704
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P., überarbeitet von Blume, H.P., Brümmer, W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.M., Thiele-Bruhn, S. & Welp, G. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Aufl., Springer-Verlag, Heidelberg
- Schiller, H., Forster, A., Vonhoff, C., Hegger, M., Biller, A. & Winterhoff, H. (2006): Sedating effects of *Humulus lupulus* L. extracts. *Phytomedicine*, 13(8), 535-541
- Schütze, N., Lubrich, T., Khaddam, I. & Jung, C. (2013): Atlas der Bewässerung –Furchenbewässerung, Sprinkler-, Tropfbewässerung, Leachingstrategien. https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifhm/hydrologie/forschung/Projekte/saphir/atlantenfolder/atlas_tropfer.pdf, aufgerufen am 23.03.16
- Seigner E., Lutz, A., Kneidl, J. & Kammhuber K. (2013): Breeding of Special Flavor Hops to pave the way to the craft brewers, *International Hop Growers Convention, Kiew*, Proceedings of the Scientific Commission, 21-24.
- Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. (1965): An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611
- Shinozaki, K. & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2007): Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *Journal of experimental botany*, 58(2), 221-227
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P. & Portmann, F. T. (2010): Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1863-1880
- Siebert, S., Hoogeveen, J. & Frenken, K. (2006): Irrigation in Africa, Europe and Latin America - Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas to Version 4. *Frankfurt Hydrology Paper 05*, Institute of Physical Geography, University of Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany and FAO, Rome, Italy
- Silber, A., Xu, G., Levkovitch, I., Soriano, S., Bilu, A. & Wallach, R. (2003): High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and soil*, 253(2), 467-477
- Slavik, L. (2000): Utilization of trickle irrigation and microsprinkling for hop irrigation. *Rostlinná Výroba*, 46(10), 457-463
- Smajstrla, A. G. & Locascio, S. J. (1996): Tensiometer-controlled, drip-irrigation scheduling of tomato. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(3), 315-319
- Smith, R. J., Davidson, D. & Wilson, R. J. (1998): Natural foam stabilizing and bittering compounds derived from hops. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 56(2), 52-57
- Spaans, E. & Baker J. (1992): Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature. *Plant and Soil*, 143, 213–217

- Srećec, S., Kvaternjak, I., Kaučić, D., Špoljar, A. & Erhatic, R. (2008). Influence of Climatic Conditions on Accumulation of α -acids in Hop Clones. *Agriculturae Conspectus Scientificus (ACS)*, 73(3), 161-166
- Srećec, S., Zechner-Krpan, V., Marag, S., Špoljarić, I., Kvaternjak, I. & Mršić, G. (2011): Morphogenesis, volume and number of hop (*Humulus lupulus* L.) glandular trichomes, and their influence on alpha-acid accumulation in fresh bracts of hop cones. *Acta Botanica Croatica*, 70(1), 1-8
- Srećec, S., Čeh, B., Ciler, T. und Rus, A. (2013): Empiric mathematical model for predicting the content of alpha-acids in hop (*Humulus lupulus* L.) cv. Aurora. *SpringerPlus* 2(1), 1–5
- Stampfl, J. (2013): Auswirkungen eines Wasserdefizits am Ende der generativen Phase auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen (*Humulus lupulus*), Bachelorarbeit an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät Land- und Ernährungswirtschaft, Studiengang Landwirtschaft
- Stenitzer, E. & Murer, E. (2003): Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by the SIMWASER model. *Soil and Tillage Research*, 73(1), 43-56
- Stevens, R. M. & Douglas, T. (1994): Distribution of grapevine roots and salt under drip and full-ground cover microjet irrigation systems. *Irrigation Science*, 15(4), 147-152
- Sugimoto, K. (1973): Studies on transpiration and water requirement of indica and japonica rice plants. 1. Relationship of transpiration to leaf area and to meteorological factors. *Jap. J. Trop. Agricult.* 16, 260-264
- Sugiyama, R., Oda, H. & Kurosaki, F. (2006): Two distinct phase of glandular trichome development in hop (*Humulus lupulus* L.). *Plant Biotechnology*, 23(5), 493-496
- Svoboda, P., Hnilickova, H. & Hnilicka, F. (2008): Changes in yield and quality of hop depending on the irrigation. *Cereal Research Communications*, 36, 891-894
- Tardieu, F., Bruckler, L. & Lafolie, F. (1992): Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water transport. *Plant and Soil*, 140(2), 291-301
- Tenhunen, J. D., Lange, O. L., Harley, P. C., Beyschlag, W. & Meyer, A. (1985): Limitations due to water stress on leaf net photosynthesis of *Quercus coccifera* in the Portuguese evergreen scrub. *Oecologia*, 67(1), 23-30
- Teuber, M. & Schmalreck, A. F. (1973): Membrane leakage in *Bacillus subtilis* 168 induced by the hop constituents lupulone, humulone, isohumulone and humulinic acid. *Archiv für Mikrobiologie*, 94(2), 159-171
- Thies, N. (2015): Evaluierung verschiedener Messmethoden von Trockenstress bei Hopfen (*Humulus lupulus*) in einem Gefäßversuch, Bachelorarbeit an der Technischen Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Lehrstuhl für Pflanzenernährung
- Thomas, G. & Schwabe, W. W. (1969): Factors controlling flowering in the hop (*Humulus lupulus* L.). *Annals of Botany*, 33(4), 781-793
- Thomas, G. (1980): Weather factors controlling the alpha acid content of hops. *Journal of Horticultural Science*, 55(1), 71–77
- Thomé, O.W. (1885): Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz, S.314, [www.biolib.de, http://biolib.mpipz.mpg.de/thome/thome_flora_von_deutschland_tafeln.pdf](http://biolib.mpipz.mpg.de/thome/thome_flora_von_deutschland_tafeln.pdf), aufgerufen am 19.01.16
- Turner, N. C., Schulze, E. D. & Gollan, T. (1985): The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. *Oecologia*, 65(3), 348-355
- United Nations (2015): World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.241
- Van den Honert, T. H. (1948): Water transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, 3, 146-153
- Van Iersel, M., Seymour, R. M., Chappell, M., Watson, F. & Dove, S. (2009): Soil moisture sensor-based irrigation reduces water use and nutrient leaching in a commercial nursery. *Proc. Southern Nursery Assn. Res. Conf*, 54, 17-21
- Von Willert, D. J., Matyssek, R. & Herppich, W. (1995): Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen, Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Vorderbrügge, T., Miller, R., Peter, M. & Sauer, S. (2004): Ableitung der nutzbaren Feldkapazität aus den Klassenzeichen der Bodenschätzung. *Mitt. Dtsch. Bdkl. Ges*, 104, 33-34
- 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*, 7(4), 457-470
- Whiteley, G. M. & Dexter, A. R. (1982): Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soil. *Soil and Tillage Research*, 2(4), 379-393

5. LITERATURVERZEICHNIS

- Yamaguchi, N., Satoh-Yamaguchi, K. & Ono, M. (2009): In vitro evaluation of antibacterial, anticollagenase, and antioxidant activities of hop components (*Humulus lupulus*) addressing acne vulgaris. *Phytomedicine*, 16(4), 369-376
- Zanoli, P. & Zavatti, M. (2008): Pharmacognostic and pharmacological profile of *Humulus lupulus* L. *Journal of Ethnopharmacology*, 116(3), 383-396
- Zattler F. (1965): Hopfen (*Humulus lupulus* L.) in: Linser H. (Hrsg.) Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung, III. Band 2. Hälfte, Springer-Verlag Wien, 1097-1133
- Zattler F. & Maier J. (1969): Stickstoffdüngung beim Hopfen: Einfluss auf Ertrag und Qualität sowie den Welkebefall unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenfeuchte bei der Hallertauer Sorte. *Hopfenrundschau* 20, 9-11
- Zattler F. & Maier J. (1970): Kopfdüngung mit Stickstoff zu Hopfen bei unterschiedlicher Bodenfeuchte durch künstliche Bewässerung, Einfluss auf Ertrag, Qualität und Welkebefall (Versuchsjahr 1969). *Hopfenrundschau* 21, 13
- Zhang, Z., Tian, F., Hu, H. & Yang, P. (2014): A comparison of methods for determining field evapotranspiration: photosynthesis system, sap flow, and eddy covariance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(3), 1053-1072
- Zinkernagel, J., Kleber, J. & Mayer, N. (2012): Bewässerungssteuerung für gemüsebauliche Kulturen in Praxis und Forschung. In: Management der Ressource Wasser. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 98-106
- Zufferey, V., Murisier, F. & Schultz, H. R. (2015): A model analysis of the photosynthetic response of *Vitis vinifera* L. cvs Riesling and Chasselas leaves in the field: I. Interaction of age, light and temperature. *VITIS-Journal of Grapevine Research*, 39(1), 19-26

6. ANHANG

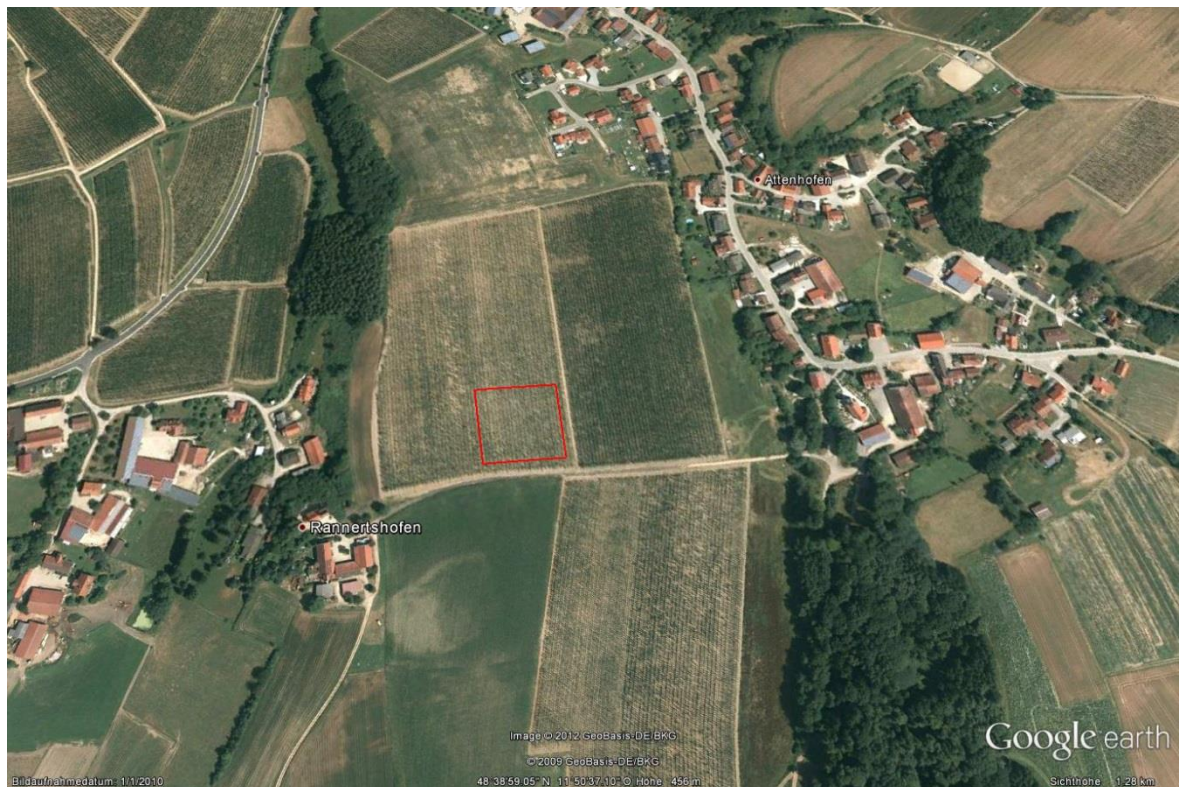


Abbildung 49: Satellitenbild des Versuchsstandorts Attenhofen. Die Versuchsfläche ist rot umrandet. Nach Google Earth, google Inc., USA.



Abbildung 50: Satellitenbild des Versuchsstandorts Karpfenstein. Die Versuchsfläche ist rot umrandet. Nach Google Earth, google Inc., USA.

Tabelle 16: Kriterien zur Standortfindung für die Bewässerungsversuche auf Sand- und Leimboden (vgl. 2.1.1).

klar definierte **Bodenart bis 60 cm Tiefe**

Mindestens **3 Jahre** Bewässerungsversuche durchführbar

Mindestens 1 ha Größe (90 x 110 m) ; 8-9 „Lücken“ breit, 10-11 Lücken lang

Sorte Herkules, mindestens 2 Jahre Alter

permanente Wasserversorgung (**Hydrant** in der Nähe)

Toleranz für wissenschaftliche Versuche im Betrieb

(Ausbringung der Tropfschläuche, Wurzelgrabungen etc.)

homogene, ebene Durchschnittsfläche

mögliche **Ernte im Betrieb**

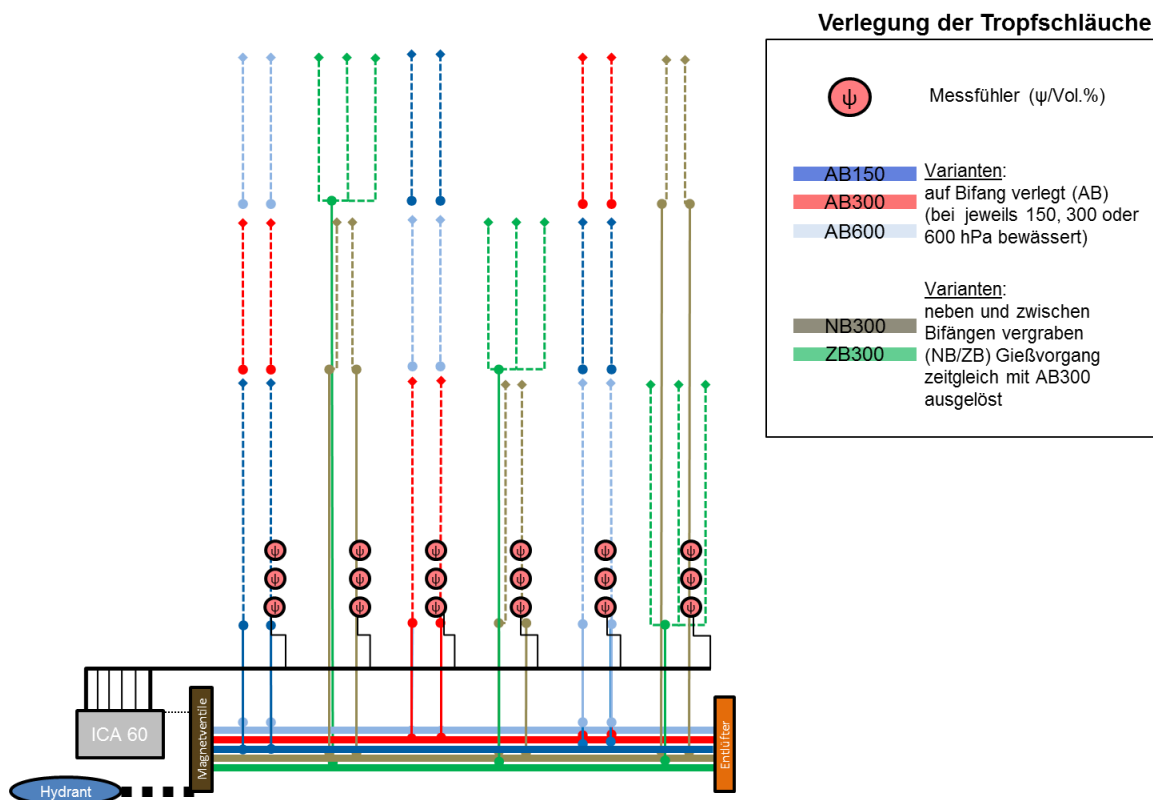


Abbildung 51: Verschaltung des Wasserkreislaufs der Varianten AB150, AB300, AB600, NB300 und ZB300 der Versuche in Karpfenstein und Attenhofen (vgl. Abb.12).

Tabelle 17: Meteorologische Parameter mit den jeweiligen Einheiten, die über die Wetterstation „imetos“ an den Versuchsstandorten Attenhofen und Karpfenstein aufgezeichnet wurden.

| Parameter | Einheit |
|---------------------|---|
| PAR | $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ |
| Windgeschwindigkeit | ms^{-1} |
| Temperatur | $^{\circ}\text{C}$ |
| RH | % |
| Globalstrahlung | W/m^2 |
| Niederschlag | mm |
| Taupunkt | $^{\circ}\text{C}$ |

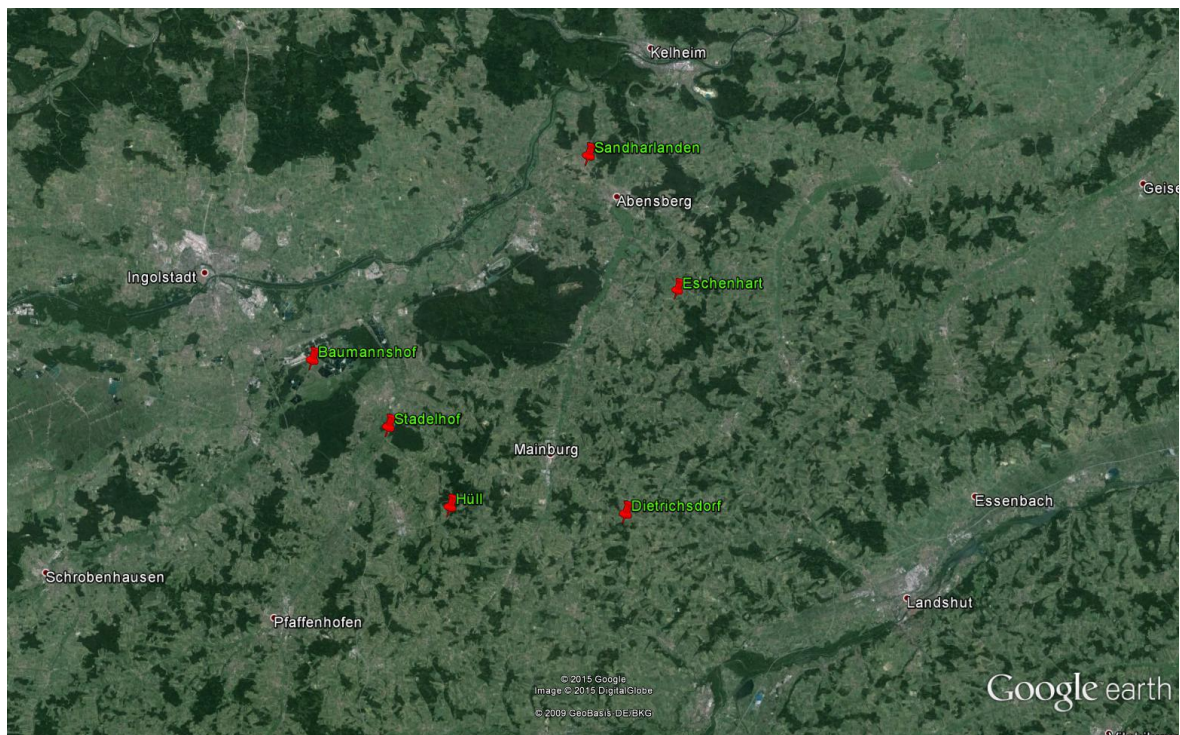


Abbildung 52: Lage der Wetterstationen Eschenhart, Hüll, Dietrichsdorf, Sandharlanden, Baumannshof und Stadelhof in der Hallertau. Die Daten der Wetterstationen können auf www.wetter-by.de abgerufen werden und dienen für die Berechnung der retrospektiven Wasserbilanzen in 3.4. Nach Google Earth, google Inc., USA.

Tabelle 18: Ergebnisse der Standorte Karpfenstein (Sandboden) und Attenhofen (Lehmboden) im Jahr 2012. Angegeben sind die mittleren Erträge [kg/ha] inkl. STABW (\pm), die MW der Alphasäure [%] mit STABW sowie die Monatssummen der Niederschläge [mm] während der Vegetationszeit von Hopfen. Da die Wetterstationen an den Standorten erst im Juni 2012 installiert wurden, wurden die fehlenden Werte für Karpfenstein durch die nahegelegene Agrarmeteorologiestation „Sandharlanden“ und für Attenhofen durch „Dietrichsdorf“ generiert (<http://www.wetter-by.de>; Stand: 27.05.15).

| 2012 | | Sandboden (Karpfenstein) | | Lehmboden (Attenhofen) | |
|---|------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | | Ertrag | alpha | Ertrag | alpha |
| | Kontrolle | 3635 \pm 144 | 19,4 \pm 0,9 | 2486 \pm 249 | 17,6 \pm 0,3 |
| Mittlerer Ertrag [kg/ha] | AB150 | 3465 \pm 393 | 18,2 \pm 1,3 | 2597 \pm 160 | 17,9 \pm 0,4 |
| mit Standardabweichung | AB300 | 3183 \pm 373 | 18,9 \pm 0,3 | 2565 \pm 221 | 17,3 \pm 0,7 |
| und mittlerer | AB600 | 3549 \pm 156 | 19,5 \pm 0,4 | 2554 \pm 411 | 17,9 \pm 0,9 |
| Alphasäure-Gehalt [%] | NB300 | 3452 \pm 276 | 18,6 \pm 0,7 | 2327 \pm 240 | 17,5 \pm 0,3 |
| mit Standardabweichung | ZB300 | 3600 \pm 363 | 18,7 \pm 1,2 | 2388 \pm 381 | 17,5 \pm 0,6 |
| | \emptyset | 3481 | 18,9 | 2486 | 17,6 |
| Niederschlag [mm] | Januar | 88,0 | | 72,3 | |
| | Februar | 14,2 | | 12,7 | |
| | März | 7,3 | | 9,1 | |
| | April | 44,0 | | 49,5 | |
| | Mai | 64,1 | | 45,3 | |
| | Juni | 143,7 | | 127,8 | |
| | Juli | 58,6 | | 61,2 | |
| | August | 137,0 | | 191,6 | |
| | September | 63,6 | | 90,0 | |
| | Oktober | 51,0 | | 44,2 | |
| | November | 70,4 | | 67,4 | |
| | Dezember | 78,2 | | 112,4 | |
| Natürlicher Niederschlag [mm] (Januar-Dezember)* | | 820,1 | | 883,5 | |
| Natürlicher Niederschlag [mm] (Vegetationszeit 01. Mai - 15. September) | | 433,2 | | 487,1 | |

Tabelle 19: Ergebnisse der Standorte Karpfenstein (Sandboden) und Attenhofen (Lehmboden) im Jahr 2013. Angegeben sind die mittleren Erträge [kg/ha] inkl. STABW (\pm), die MW der Alphasäure [%] mit STABW sowie die Monatssummen der Niederschläge [mm] während der Vegetationszeit von Hopfen. In Karpfenstein wurden 4 Varianten aufgrund eines Hagelschadens nicht beerntet (n.b.).

| 2013 | | Sandboden (Karpfenstein) | | Lehmboden (Attenhofen) | |
|---|------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | | Ertrag | alpha | Ertrag | alpha |
| | Kontrolle | 4595 \pm 1108 | 17,8 \pm 1,0 | 1913 \pm 280 | 15,9 \pm 0,8 |
| Mittlerer Ertrag [kg/ha] | AB150 | 4523 \pm 598 | 18,7 \pm 1,7 | 2013 \pm 212 | 15,7 \pm 0,7 |
| mit Standardabweichung | AB300 | n.b. | - | 2034 \pm 324 | 15,0 \pm 0,9 |
| und mittlerer | AB600 | n.b. | - | 1956 \pm 282 | 14,8 \pm 0,4 |
| Alphasäure-Gehalt [%] | NB300 | n.b. | - | 1864 \pm 271 | 15,5 \pm 0,6 |
| mit Standardabweichung | ZB300 | n.b. | - | 1726 \pm 408 | 16,0 \pm 0,4 |
| | \emptyset | 4503 | 18,25 | 1918 | 15,48 |
| Niederschlag [mm] | Januar | 48,2 | | 73,2 | |
| | Februar | 55,6 | | 74,2 | |
| | März | 32,2 | | 41,2 | |
| | April | 43,2 | | 49,8 | |
| | Mai | 146,0 | | 147,0 | |
| | Juni | 134,6 | | 139,4 | |
| | Juli | 21,4 | | 14,6 | |
| | August | 105,8 | | 52,0 | |
| | September | 139,8 | | 122,0 | |
| | Oktober | 67,4 | | 63,8 | |
| | November | 57,6 | | 56,8 | |
| | Dezember | 11,8 | | 9,4 | |
| Natürlicher Niederschlag [mm] (Januar-Dezember) | | 863,6 | | 843,4 | |
| Natürlicher Niederschlag [mm] (Vegetationszeit 01. Mai - 15. September) | | 507,4 | | 419,8 | |

Tabelle 20: Ergebnisse der Standorte Karpfenstein (Sandboden) und Attenhofen (Lehmboden) im Jahr 2014. Angegeben sind die mittleren Erträge [kg/ha] inkl. STABW (\pm), die MW der Alphasäure [%] mit STABW sowie die Monatssummen der Niederschläge [mm] während der Vegetationszeit von Hopfen.

| 2014 | | Sandboden (Karpfenstein) | | Lehmboden (Attenhofen) | |
|---|------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | | Ertrag | alpha | Ertrag | alpha |
| | Kontrolle | 3638 \pm 220 | 19,5 \pm 1,2 | 3529 \pm 179 | 18,9 \pm 0,3 |
| Mittlerer Ertrag [kg/ha] | AB150 | 3915 \pm 318 | 19,0 \pm 0,9 | 3769 \pm 90 | 19,8 \pm 0,7 |
| mit Standardabweichung | AB300 | 3628 \pm 561 | 19,0 \pm 0,7 | 3636 \pm 258 | 18,8 \pm 0,9 |
| und mittlerer | AB600 | 3900 \pm 246 | 19,2 \pm 0,7 | 3923 \pm 246 | 18,5 \pm 0,7 |
| Alphasäure-Gehalt [%] | NB300 | 3636 \pm 433 | 19,1 \pm 0,6 | 3545 \pm 219 | 18,7 \pm 0,6 |
| mit Standardabweichung | ZB300 | 3738 \pm 424 | 18,5 \pm 1,2 | 3468 \pm 155 | 18,3 \pm 1,3 |
| | \emptyset | 3742 | 19,0 | 3645 | 18,8 |
| Niederschlag [mm] | Januar | 58,2 | | 47,2 | |
| | Februar | 19,0 | | 9,2 | |
| | März | 21,8 | | 28,6 | |
| | April | 29,2 | | 42,8 | |
| | Mai | 121,0 | | 88,2 | |
| | Juni | 30,8 | | 36,8 | |
| | Juli | 132,4 | | 120,4 | |
| | August | 117,0 | | 79,0 | |
| | September | 61,8 | | 81,2 | |
| | Oktober | 79,0 | | 91,0 | |
| | November | 46,2 | | 14,2 | |
| | Dezember | 35,4 | | 10,2 | |
| Natürlicher Niederschlag [mm] (Januar-Dezember) | | 751,8 | | 648,8 | |
| Natürlicher Niederschlag [mm] (Vegetationszeit 01. Mai - 15. September) | | 429,4 | | 351,0 | |

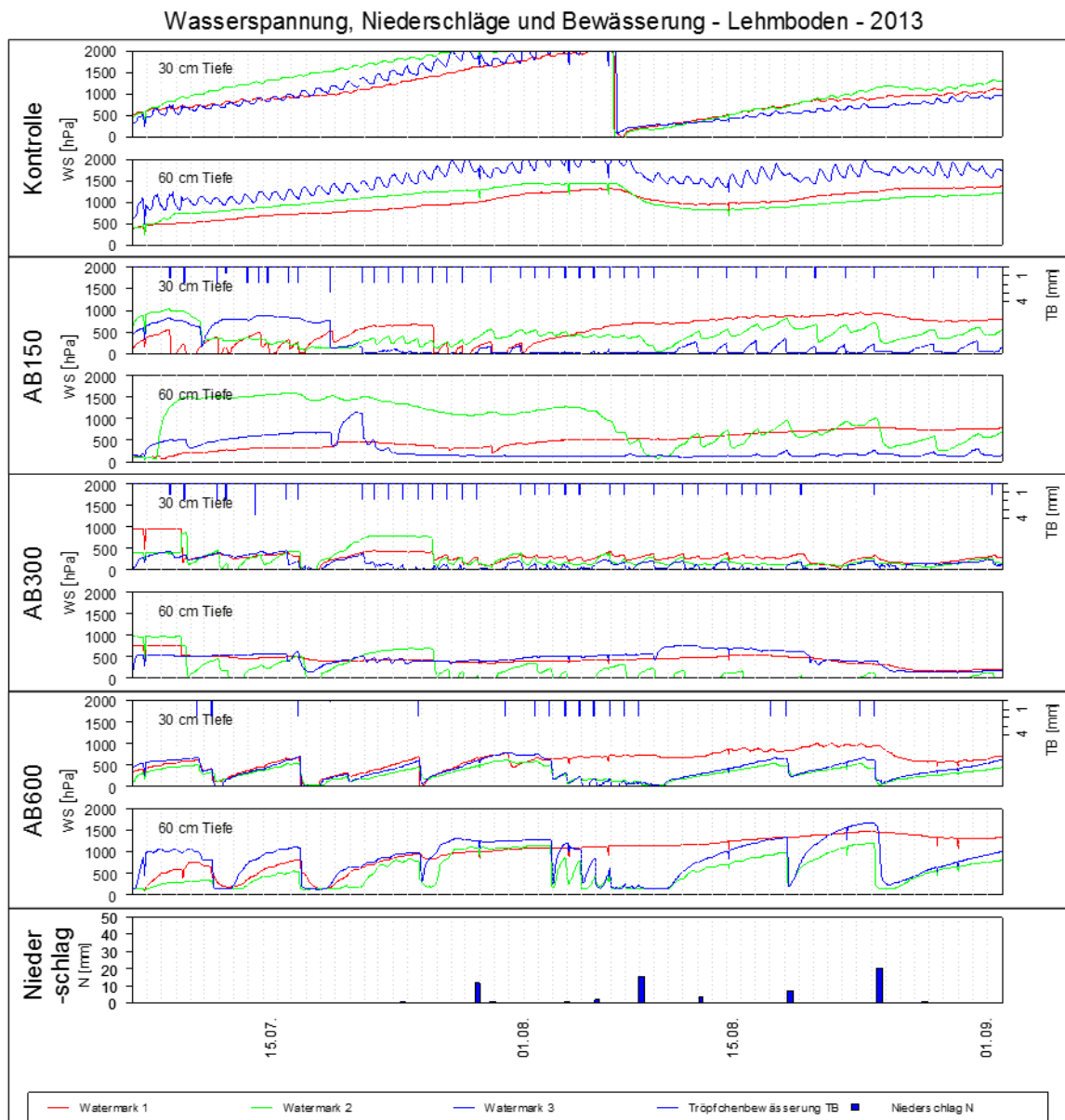


Abbildung 53: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 06.07. - 01.09.2013 in Attenhofen. In jeder Variante wurden drei Watermarksensoren (rot, grün, blau) in der Mitte von zwei Pflanzen in den Tiefen 30 cm und 60 cm unter einer Tropfstelle eingebaut (vgl. Abb. 13), welche alle zehn Minuten die WS registrierten. Die mittels der Steuerungseinheit ICA60 automatisch verlaufende Tröpfchenbewässerung jeder Variante ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

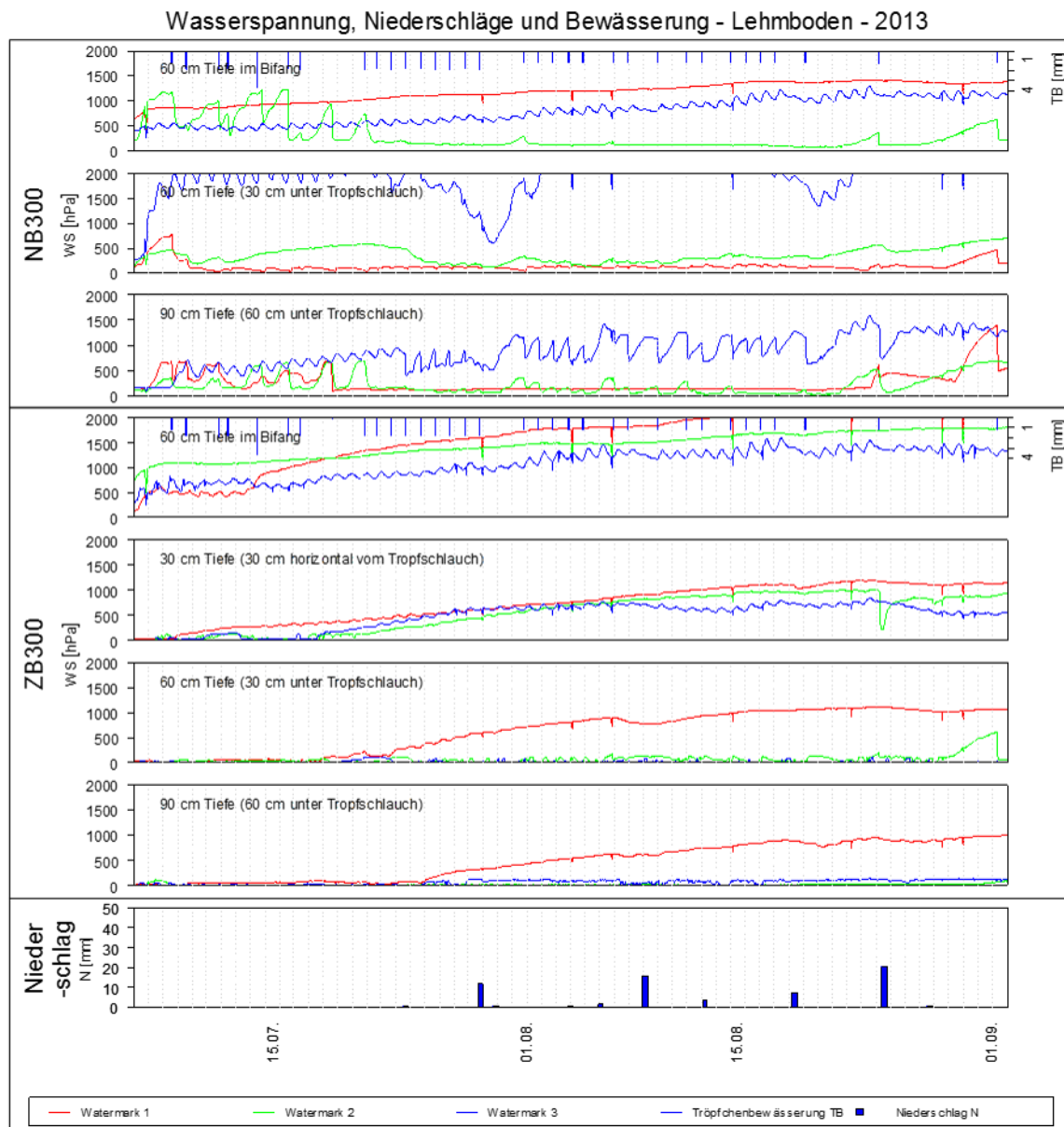


Abbildung 54: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 06.07. - 01.09.2013 in Attenhofen. Jeder Messwert wurde anhand von drei Sensoren (rot, grün, blau) wiederholt. Für die genaue Anordnung der Sensoren siehe Schaubild 13. Die gegebene Tröpfchenbewässerung wurde von der Variante AB300 gesteuert und ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

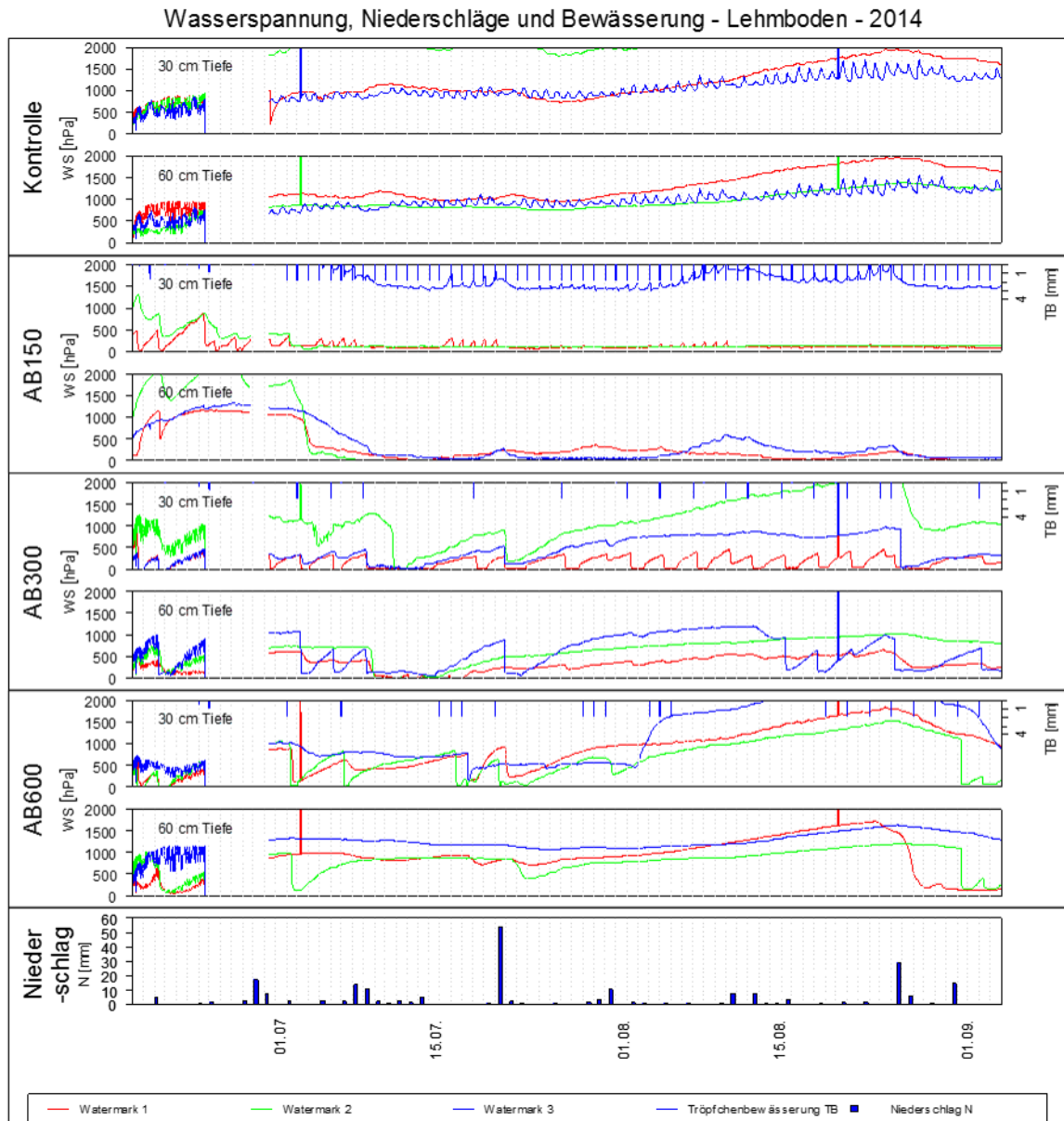


Abbildung 55: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 18.06. - 04.09.2014 in Attenhofen. In jeder Variante wurden drei Watermarkensensoren (rot, grün, blau) in der Mitte von zwei Pflanzen in den Tiefen 30 cm und 60 cm unter einer Tropfstelle eingebaut (vgl. Abb. 13), welche alle zehn Minuten die WS registrierten. Die mittels der Steuerungseinheit ICA60 automatisch verlaufende Tröpfchenbewässerung jeder Variante ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

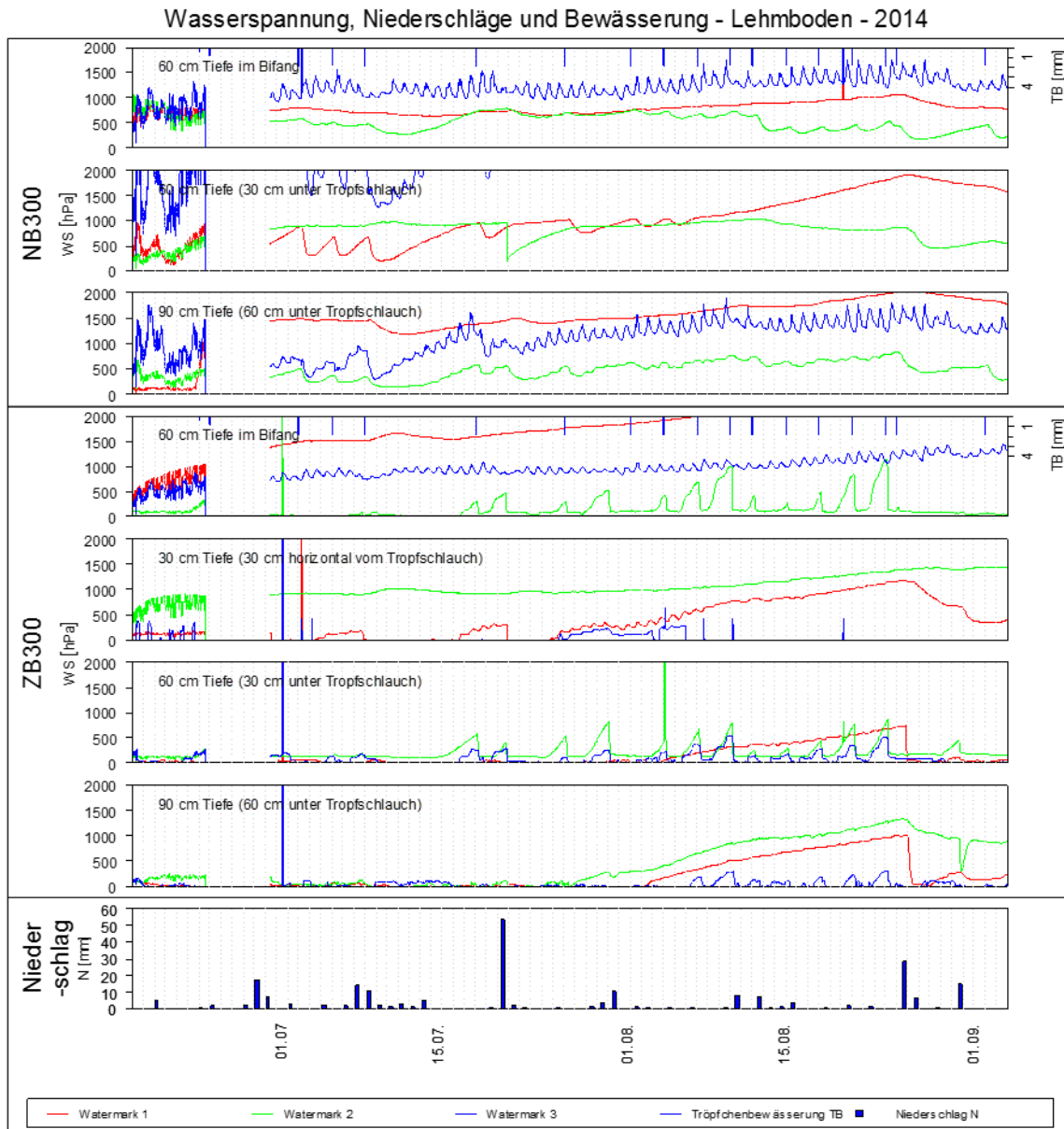


Abbildung 56: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 18.06. - 04.09.2014 in Attenhofen. Jeder Messwert wurde anhand von drei Sensoren (rot, grün, blau) wiederholt. Für die genaue Anordnung der Sensoren siehe Schaubild 13. Die gegebene Tröpfchenbewässerung wurde von der Variante AB300 gesteuert und ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

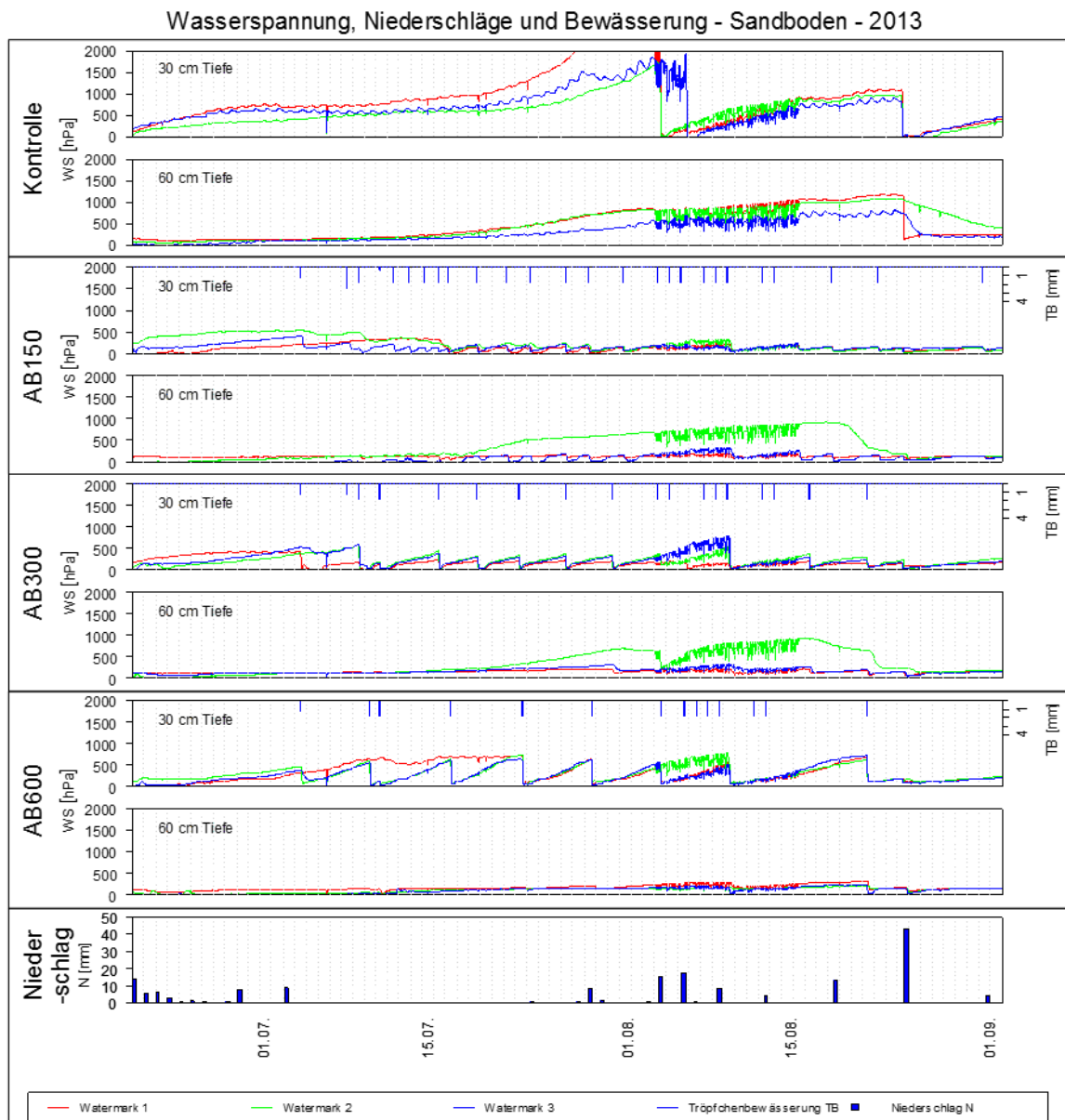


Abbildung 57: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 20.06. - 01.09.2013 in Karpfenstein. In jeder Variante wurden drei Watermarksensoren (rot, grün, blau) in der Mitte von zwei Pflanzen in den Tiefen 30 cm und 60 cm unter einer Tropfstelle eingebaut (vgl. Abb. 13), welche alle zehn Minuten die WS registrierten. Die mittels der Steuerungseinheit ICA60 automatisch verlaufende Tröpfchenbewässerung jeder Variante ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

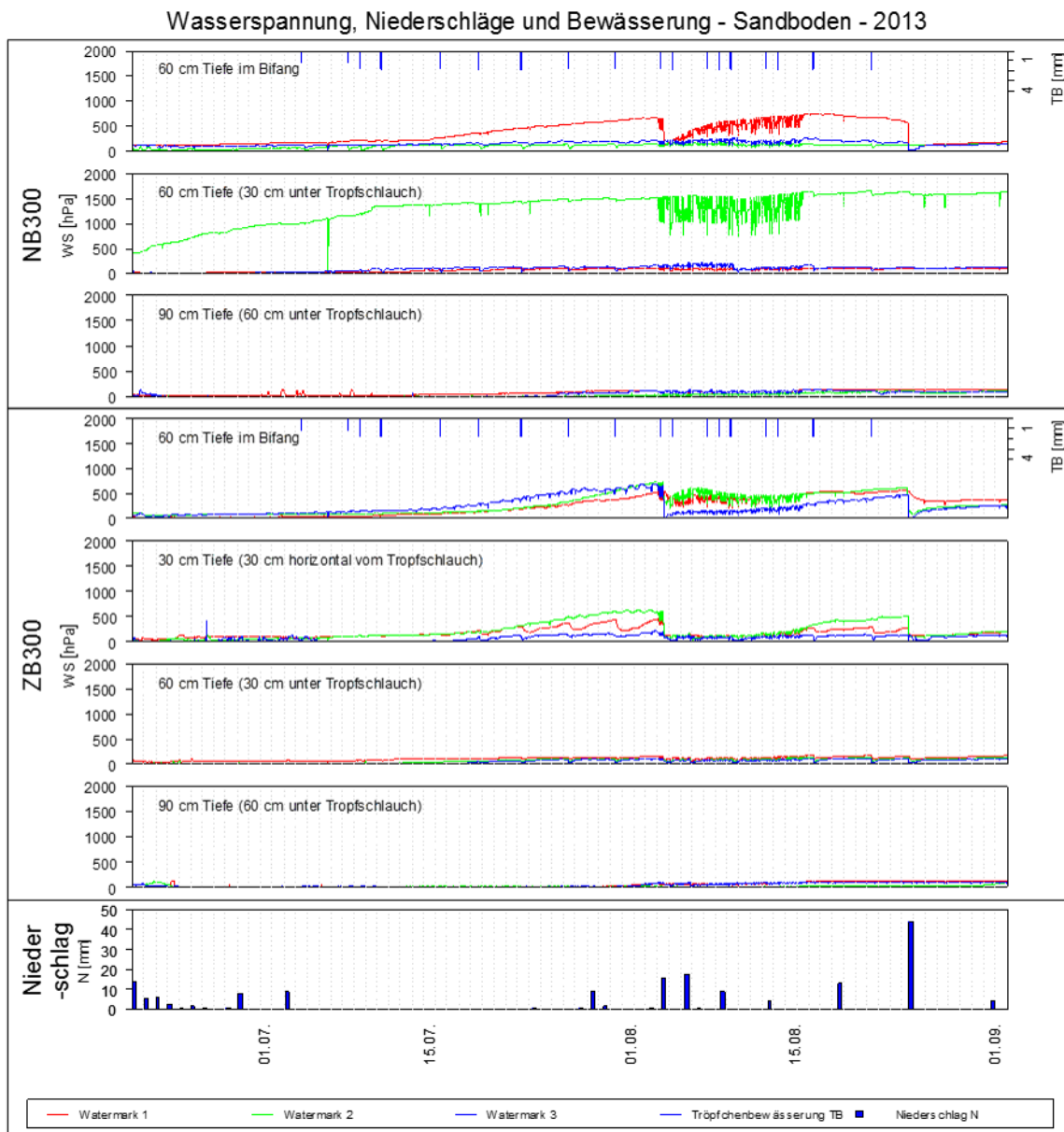


Abbildung 58: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 20.06. - 01.09.2013 in Karpfenstein. Jeder Messwert wurde anhand von drei Sensoren (rot, grün, blau) wiederholt. Für die genaue Anordnung der Sensoren siehe Schaubild 13. Die gegebene Tröpfchenbewässerung wurde von der Variante AB300 gesteuert und ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

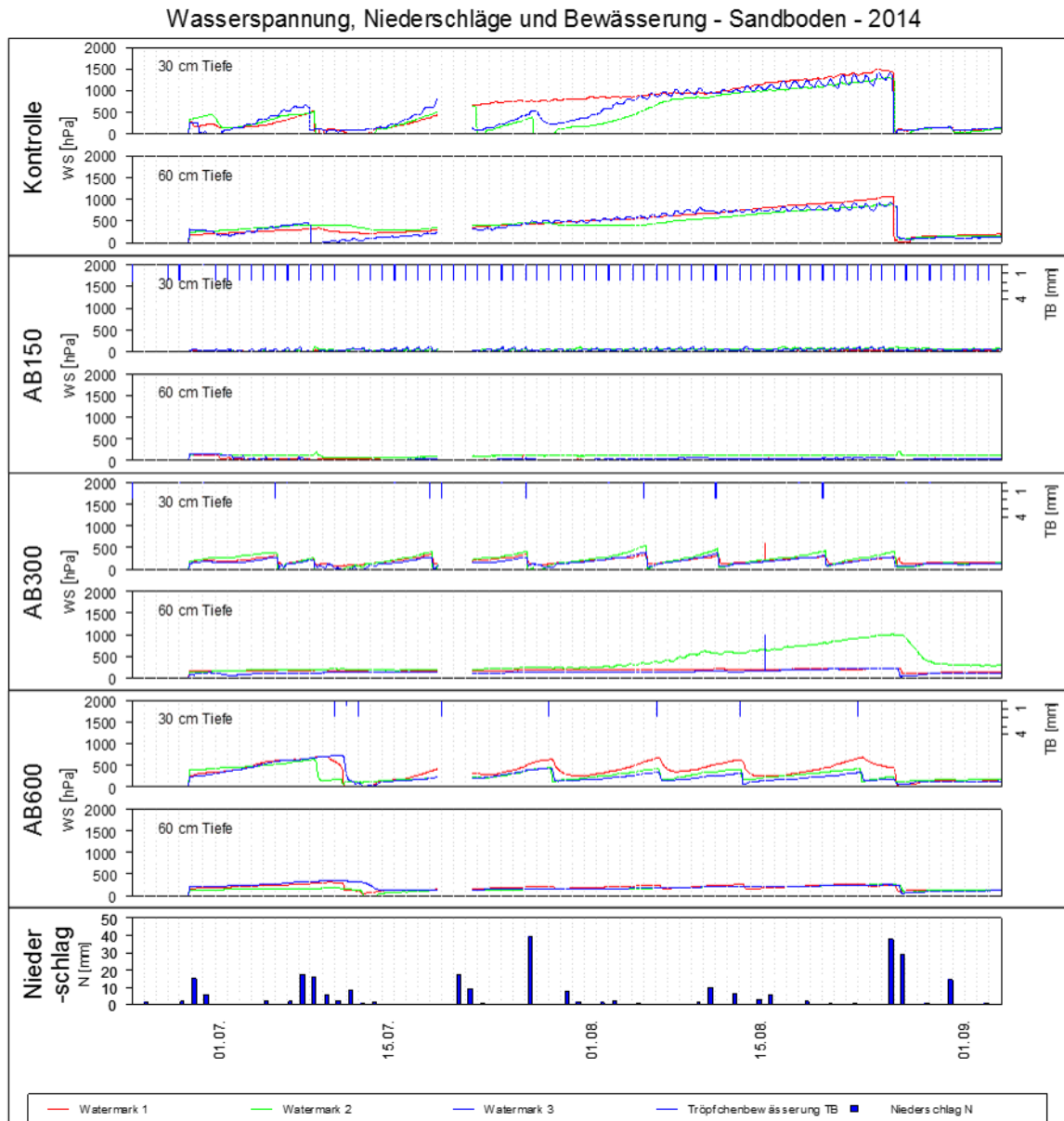


Abbildung 59: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten Kontrolle, AB150, AB300, AB600 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 24.06. - 04.09.2014 in Karpfenstein. In jeder Variante wurden drei Watermarksensoren (rot, grün, blau) in der Mitte von zwei Pflanzen in den Tiefen 30 cm und 60 cm unter einer Tropfstelle eingebaut (vgl. Abb. 13), welche alle zehn Minuten die WS registrierten. Die mittels der Steuerungseinheit ICA60 automatisch verlaufende Tröpfchenbewässerung jeder Variante ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

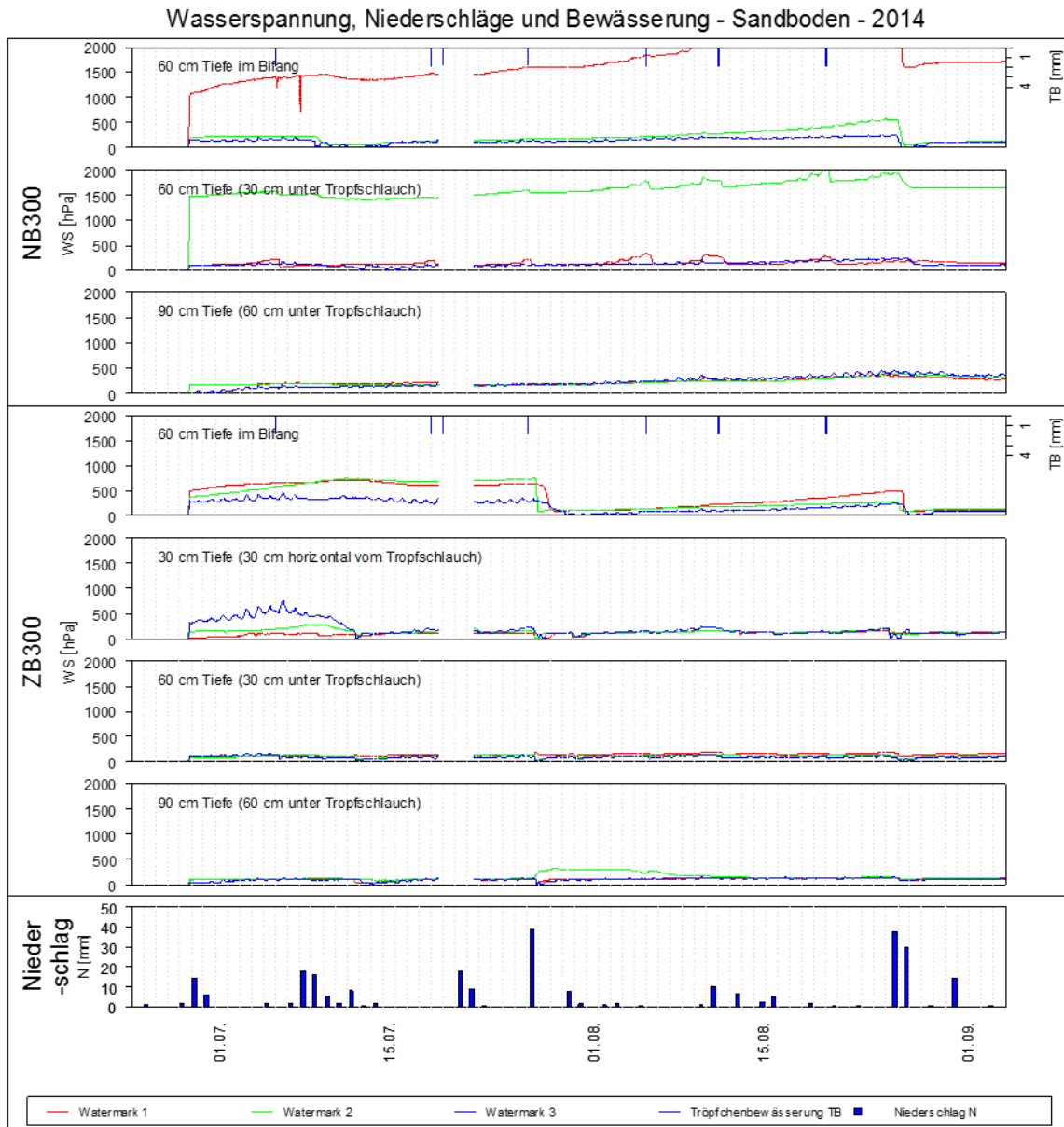


Abbildung 60: Wasserspannung WS [hPa] in den Varianten NB300 und ZB300 sowie die Tröpfchenbewässerungsgaben TB [mm] und Niederschläge N [mm] im Zeitraum 24.06. - 04.09.2014 in Karpfenstein. Jeder Messwert wurde anhand von drei Sensoren (rot, grün, blau) wiederholt. Für die genaue Anordnung der Sensoren siehe Schaubild 13. Die gegebene Tröpfchenbewässerung wurde von der Variante AB300 gesteuert und ist auf der sekundären y-Achse eingezeichnet.

Tabelle 21: Mittelwerte (inkl. STABW) der in den Varianten 28, 21, 14 und Kontrolle erzielten Erträge und Alphasäuregehalte von Herkules der Jahre 2012 und 2013 am Standort Hirnkirchen. Zusätzlich aufgetragen sind die jeweiligen applizierten Wassermengen [mm] der verschiedenen Varianten sowie die gefallenen Niederschläge in der Vegetationszeit.

| Hirnkirchen Herkules | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| | 2012 | | | 2013 | | |
| | Ertrag [kg/ha] | Alphasäure [%] | Wassermenge [mm] | Ertrag [kg/ha] | Alphasäure [%] | Wassermenge [mm] |
| 28 | 3526 ±139 | 17,7 ±0,2 | 8,3 | 3913 ±160 | 16,7 ±1,6 | 20,0 |
| 21 | 3515 ±187 | 17,4 ±0,1 | 17,3 | 3985 ±147 | 17,9 ±1,0 | 36,0 |
| 14 | 3534 ±76 | 17,4 ±0,1 | 25,1 | 3932 ±195 | 18,3 ±0,8 | 51,5 |
| Kontrolle | 3542 ±153 | 17,0 ±0,4 | 39,0 | 4122 ±256 | 18,1 ±0,7 | 83,0 |
| Niederschlag [mm] (01. Mai- 15. Sept.) | 398,8 | | | 461,6 | | |

Tabelle 22: Mittelwerte (inkl. STABW) der in den Varianten 28, 21, 14 und Kontrolle erzielten Erträge und Alphasäuregehalte von Perle der Jahre 2012 und 2013 am Standort Hirnkirchen. Zusätzlich aufgetragen sind die jeweiligen applizierten Wassermengen [mm] der verschiedenen Varianten sowie die gefallenen Niederschläge in der Vegetationszeit.

| Hirnkirchen Perle | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| | 2012 | | | 2013 | | |
| | Ertrag [kg/ha] | Alphasäure [%] | Wassermenge [mm] | Ertrag [kg/ha] | Alphasäure [%] | Wassermenge [mm] |
| 28 | 2294 ±166 | 9,8 ±0,6 | 5,4 | 1747 ±300 | 6,5 ±0,4 | 16,0 |
| 21 | 2471 ±177 | 9,7 ±0,5 | 10,6 | 2128 ±325 | 6,3 ±0,5 | 32,0 |
| 14 | 2555 ±87 | 10,1 ±0,4 | 19,0 | 1828 ±203 | 6,4 ±0,5 | 47,5 |
| Kontrolle | 2551 ±84 | 10,7 ±0,2 | 35,2 | 1737 ±158 | 6,3 ±0,8 | 79,0 |
| Niederschlag [mm] (01. Mai- 31. August) | 388,6 | | | 402,8 | | |

Tabelle 23: Mittelwerte (inkl. STABW) der in den Varianten Kontrolle, AB3, AB12, NB3 und NB12 erzielten Erträge und Alphasäuregehalte von Herkules der Jahre 2014 und 2015 am Standort Hirnkirchen. Zusätzlich aufgetragen sind die jeweiligen applizierten Wassermengen [mm], die außer in der Kontrolle in allen Varianten gleich waren, sowie die gefallenen Niederschläge [mm] in der Vegetationszeit, aufgezeichnet an der Wetterstation Hüll.

| Hirnkirchen Herkules | | | | | | |
|--|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| | 2014 | | | 2015 | | |
| | Ertrag [kg/ha] | Alpha- säure [%] | Wassermenge [mm] | Ertrag [kg/ha] | Alpha- säure [%] | Wassermenge [mm] |
| Kontrolle | 3974 ±430 | 18,5 ±0,6 | unbew. | 3188 ±303 | 17,0 ±0,5 | unbew. |
| AB3 | 4157 ±313 | 18,9 ±0,6 | | 3320 ±407 | 16,9 ±0,4 | |
| AB12 | 4188 ±323 | 19,0 ±0,7 | | 3372 ±248 | 17,0 ±0,2 | |
| NB3 | 4053 ±91 | 17,7 ±0,7 | 112,6 | 3305 ±71 | 17,2 ±0,2 | 146,3 |
| NB12 | 4159 ±465 | 18,9 ±0,9 | | 3169 ± 314 | 16,8 ±0,6 | |
| Niederschlag [mm] (01. Mai - 15. Sept.) | 467,0 | | | 324,7 | | |

6. ANHANG

Tabelle 24: Ergebnisse der Mittelwertvergleiche von Assimilation A und Transpiration E aus dem Jahr 2012 zwischen den Behandlungen bewässert und unbewässert der potentiellen Gaswechseldaten bei einer Lichtstärke von 1250 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (vgl. Abbildung 36). Im Falle einer Normalverteilung und Varianzhomogenität der Daten wurden die Vergleiche mittels eines studentischen t-Tests durchgeführt. Bei nicht Vorliegen der Voraussetzungen wurde der Mann-Whitney U Test (MWU) verwendet und die Daten entsprechend markiert.

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| A | 28.6. <0,05 (MWU) | 29.6. <0,001 | 30.6. 0,22 | 1.7. 0,25 | 2.7. <0,001 | 3.7. 0,69 | 4.7. 0,54 | 5.7. 0,52 | 6.7. 0,85 | 8.7. 0,20 | 9.7. 0,46 |
| E | <0,01 | <0,001 | 0,06 | 0,06 (MWU) | <0,01 (MWU) | 0,97 (MWU) | 0,98 | 0,71 | 0,93 | 0,66 | 0,81 |
| A | 10.7. <0,05 (MWU) | 11.7. 0,55 | 12.7. <0,05 | 13.7. 0,54 | 23.7. 0,19 | 24.7. <0,05 | 25.7. 0,07 | 26.7. <0,05 (MWU) | 27.7. 0,17 (MWU) | 28.7. 0,59 | 29.7. <0,001 (MWU) |
| E | 0,05 | 0,78 | 0,05 (MWU) | 0,50 | 0,20 | <0,05 | <0,05 | <0,05 (MWU) | 0,06 (MWU) | 0,22 (MWU) | 0,60 <0,01 |
| A | 31.7. <0,01 | 2.8. <0,001 | 3.8. 0,21 | 4.8. 0,30 | 5.8. 0,71 | 8.8. 0,69 | 9.8. 0,67 | 10.8. 0,85 | 11.8. 0,25 | 12.8. 0,09 | 13.8. <0,05 |
| E | <0,01 (MWU) | <0,001 | <0,05 | 0,10 | 0,91 | 0,58 | 0,29 | 0,48 | <0,05 | <0,05 (MWU) | <0,05 |

Tabelle 25: Ergebnisse der Mittelwertvergleiche von Assimilation A und Transpiration E aus dem Jahr 2013 zwischen den Behandlungen bewässert und unbewässert der potentiellen Gaswechseldaten bei einer Lichtstärke von 1250 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (vgl. Abbildung 37). Im Falle einer Normalverteilung und Varianzhomogenität der Daten wurden die Vergleiche mittels eines studentischen t-Tests durchgeführt. Bei nicht Vorliegen der Voraussetzungen wurde der Mann-Whitney U Test (MWU) verwendet und die Daten entsprechend markiert.

| | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| A | 4.7. 0,60 | 5.7. 0,73 | 6.7. 0,94 | 7.7. 0,97 | 8.7. 0,31 | 9.7. <0,05 | 10.7. <0,01 | 11.7. <0,01 | 12.7. 0,23 | 13.7. <0,05 |
| E | 0,22 | 0,60 | 0,73 | 0,94 | 0,37 | 0,08 | <0,05 | <0,05 | 0,28 | 0,09 |
| A | 14.7. <0,05 | 15.7. 0,05 | 16.7. <0,01 | 17.7. <0,05 | 18.7. <0,05 | 19.7. <0,01 | 20.7. 0,06 (MWU) | 21.7. 0,48 | 22.7. 0,31 | 23.7. 0,74 |
| E | 0,08 | 0,10 | <0,01 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | 0,13 (MWU) | 0,45 (MWU) | 0,22 | 0,63 |
| A | 24.7. 0,77 | 25.7. 0,12 | 26.7. 0,27 | 27.7. 0,12 (MWU) | 28.7. 0,11 (MWU) | 29.7. 0,64 | 30.7. 0,37 | 31.7. 0,22 | 1.8. 0,26 | 2.8. <0,05 |
| E | 0,57 | <0,05 | 0,33 | 0,09 (MWU) | 0,43 (MWU) | 0,58 | 0,52 | 0,41 | 0,21 | 0,07 |

Tabelle 26: Korrelationsmatrix zur Voruntersuchung auf Multikollinearität mittels Pearson Spearman Korrelationstest für die Regressionsmodelle in Tabelle 10. In die Modelle wurden eingefügt: Globalstrahlung GS [W/m^2], Niederschlag N [mm], Temperatur T [$^{\circ}\text{C}$], Windgeschwindigkeit W [m/s], Bodenfeuchte Bf [%] der bewässerten und unbewässerten Parzellen, die Bewässerung Bew [mm] der bewässerten Parzellen. Der Parameter relative Luftfeuchte rL wurde zusätzlich wurzeltransformiert ($rL \sqrt{\quad}$).

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|--------------|-------|--------|----------|-------|-------------------|
| u | GS | N | T | rL | Wind | Bf bew | Bf unbew | Bew | $rL \sqrt{\quad}$ |
| GS | | -0,31 | 0,41 | -0,74 | 0,35 | -0,30 | 0,36 | 0,31 | -0,53 |
| N | -0,31 | | 0,09 | 0,39 | -0,16 | 0,33 | -0,29 | -0,16 | 0,26 |
| T | 0,41 | 0,09 | | -0,45 | 0,05 | -0,19 | 0,25 | 0,18 | -0,47 |
| rL | -0,74 | 0,39 | -0,45 | | -0,26 | 0,50 | -0,52 | -0,41 | |
| Wind | 0,35 | -0,16 | 0,05 | -0,26 | | -0,51 | 0,25 | 0,13 | -0,34 |
| Bf bew | -0,30 | 0,33 | -0,19 | 0,50 | -0,51 | | | -0,59 | 0,50 |
| Bf unbew | 0,36 | -0,29 | 0,25 | -0,52 | 0,25 | | | | -0,53 |
| Bew | 0,31 | -0,16 | 0,18 | -0,41 | 0,13 | -0,59 | | | -0,38 |
| $rL \sqrt{\quad}$ | -0,53 | 0,26 | -0,47 | | -0,34 | 0,50 | -0,53 | -0,38 | |

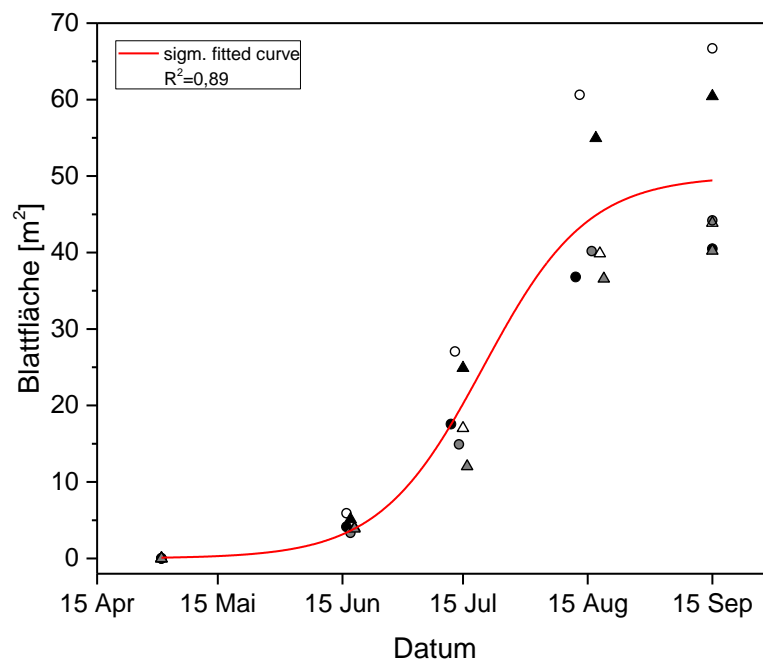


Abbildung 61: Gesamtblattfläche der Sorte Herkules im Laufe der Vegetationsperiode. Die Blattfläche wurde auf Grundlagen nach Engelhard *et al.* (2011) nach der Formel $f(x) = \frac{50,05}{1+e^{(-0,08(x-2,46 \times 10^{-6})}}$ errechnet.

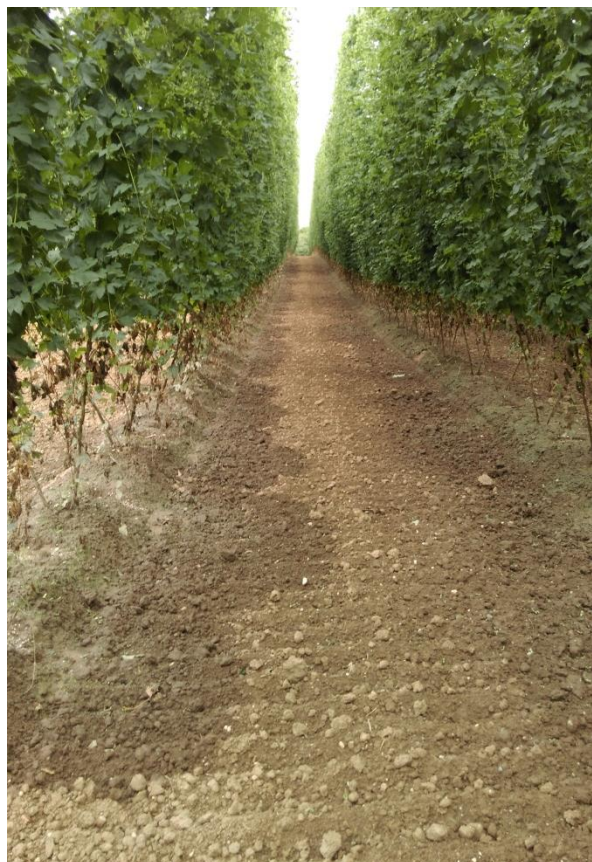


Abbildung 62: Verteilung des Wassers im Hopfengarten bei oberirdischer Installation des Tropfschlauches im Gerüst. Der Tropfschlauch in diesem Betrieb wurde mittels eines Drahtes über dem Bifang installiert. Die Verteilung des Wassers geht dabei über den Bifang hinaus.