



Optimierung der Nährstoffaufnahme unter Trockenstress durch die züchterische Verbesserung des Wurzelwachstums bei Gerste



Projektbericht

Projektförderung: Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
Ludwigstr. 2,
80539 München

Finanzierung: Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
Ludwigstr. 2,
80539 München

Förderkennzeichen: Kapitel 15 02 TG 85

Geschäftszeichen A 7396-1 / 11

Projektlaufzeit: 01.05.2015 bis 31.12.2018

Projektleiter: Dr. Markus Herz

Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste
Am Gereuth 6
85354 Freising
Tel.:08161/71-3629; Fax: 08161/71-4085
E-Mail: markus.herz@lfl.bayern.de

Projektbearbeiter: Dr. Wouter. K. Vahl

Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste
Am Gereuth 6
85354 Freising
Tel.:08161/71-4098; Fax: 08161/71-4085
E-Mail: wouter.vahl@lfl.bayern.de

Herausgegeben im: Juli 2019

**Optimierung der Nährstoffaufnahme unter Trockenstress durch
die züchterische Verbesserung des Wurzelwachstums bei Gerste**

Dr. Markus Herz

Dr. Wouter K. Vahl

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	9
1 Zielsetzung	11
2 Zusammensetzung des Projektteams	12
3 Projektdaten	13
3.1 Versuche an der Moving Fields Anlage	13
3.1.1 Aufbau der Versuche	15
3.1.2 Zielsetzung der Versuche	17
3.1.3 Versuchsmerkmale	19
3.1.4 Bildaufnahmen	19
3.2 Versuche im Rollgewächshaus	24
4 Auswertung der Projektdaten	25
4.1 Erstellung eines Basismodells	25
4.2 Überprüfung der Modellannahmen	26
4.3 Erweiterung des Basismodells: Modellierung der Varianz	26
4.4 Korrektur für mehrfaches Testen	28
4.5 Varianzanalyse	28
4.6 Paarweise Vergleiche der Behandlungskategorien	28
4.7 Grafische Darstellung der Statistik	28
5 Projektergebnisse	29
5.1 Ergebnisse der Versuche an der Moving Fields Anlage der LfL	29
5.1.1 Trockenstress während der Blattentwicklung	30
5.1.2 Trockenstress während der Bestockung	31
5.1.3 Trockenstress während des Ährenschiebens	32
5.2 Quantifizierung der Menge Wurzel-DNA in Böden	40
5.3 Ergebnisse der Versuche im Rollgewächshaus der LfL	42
5.4 Kreuzungsarbeiten	45
6 Diskussion	46
7 Öffentlichkeitsarbeit	47
7.1 Information direkt für die Bevölkerung	47
7.2 Präsenz in der Medien	47
7.3 Referendarausbildungen	47
7.4 Poster	47
7.5 Vorträge	48
7.6 Führungen	49
7.6.1 Führungen im Jahr 2015	49
7.6.2 Führungen im Jahr 2016	49
7.6.4 Führungen im Jahr 2017	50
7.6.5 Führungen im Jahr 2018	50

8	Supplement – Auswertung der Wachstumsdaten aus dem Versuch 125	51
8.1	Wurzelwachstum im Versuch 125	51
8.1.1	Die Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode	55
8.1.2	Die Höhe der maximalen Wurzelfläche	55
8.1.3	Der Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche	55
8.1.4	Korrelation zwischen Höhe und Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche	56
8.2	Sprosswachstum im Versuch 125	61
8.2.1	Die Sprossfläche am Ende der trockenen Periode im Versuch 125	64
8.2.2	Sprossbiomasse zur Ernte im Versuch 125	64
8.3	Korrelation Spross- versus Wurzelwachstum im Versuch 125	67
8.4	Zusammenfassung Trockenstress im Versuch 125	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Die Moving fields Anlage der LfL.	13
Abbildung 2	Die an der Moving Fields Anlage eingesetzten Pflanzenbehälter.....	15
Abbildung 3	Ansicht auf der Abstellfläche der Moving Fields Anlage.....	20
Abbildung 4	Ein Bild von den Sprossen eines Kleinstbestandes samt Auswertung.....	21
Abbildung 5	Beispiel eines Bildauswertungsprotokolles.	22
Abbildung 6	Ein Bild von den Wurzeln eines Kleinstbestandes samt Auswertung.....	23
Abbildung 7	Das Rollgewächshaus der LfL.....	24
Abbildung 8	Beispiel einer grafischen Überprüfung der Modellannahmen.	27
Abbildung 9	Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 117.....	33
Abbildung 10	Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 120.....	34
Abbildung 11	Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 121.....	35
Abbildung 12	Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 124.....	36
Abbildung 13	Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 125.....	37
Abbildung 14	Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 127.....	38
Abbildung 15	Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 128.....	39
Abbildung 16	Korngewicht im Rollgewächshausversuch 122.	43
Abbildung 17	Vergleich der neu-entwickelten Trockenstress-Indizes.	44
Abbildung 18	Die Wachstumsdynamik der Wurzeln im Versuch 125.	52
Abbildung 19	Die Wurzelwachstumsdaten aus dem Versuch 125 samt statistischer Beschreibung.	53
Abbildung 20	Die statistische Beschreibung der Wurzelwachstumsdaten aus dem Versuch 125 samt Beispielen für identifizierten Merkmale.	54
Abbildung 21	Die Wurzelfläche am Ende der Bestockung im Versuch 125.....	57
Abbildung 22	Die Höhe der maximalen Wurzelfläche im Versuch 125.	58
Abbildung 23	Der Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche im Versuch 125.	59
Abbildung 24	Die Korrelation zwischen der Höhe und dem Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche im Versuch 125.	60
Abbildung 25	Die Wachstumsdynamik der Sprosse im Versuch 125.	62
Abbildung 26	Die statistische Beschreibung der Sprosswachstumsdaten aus dem Versuch 125 samt Beispielen für identifizierte Merkmale.	63
Abbildung 27	Die Sprossfläche am Ende der Bestockung im Versuch 125.....	65
Abbildung 28	Trockengewicht der Sprosse im Versuch 125.....	66
Abbildung 29	Die Korrelation zwischen der Sprossfläche und der Wurzelfläche am Ende der Bestockung bei einer optimalen Versorgung mit Stickstoff im Versuch 125.	68
Abbildung 30	Die Korrelation zwischen der Sprossfläche und der Wurzelfläche am Ende der Bestockung bei einer reduzierten Versorgung mit Stickstoff im Versuch 125.	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Die Laufzeit und den Umfang der im Lauf des Projektes durchgeführten Versuche.....	14
Tabelle 2	Die in den Moving Fields Versuchen eingesetzten Bakterien und ihre Eigenschaften.....	18
Tabelle 3	Zusammenfassung der Testergebnisse der fünf am besten geeigneten DNS-Extraktion-Kits.	41

Zusammenfassung

Ziel dieses Forschungsprojektes war es, eine Grundlage zu schaffen, um Sommergerste züchterisch für eine bessere Wasser- und Nährstoffaufnahme zu optimieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Reihe von sieben Gewächshausversuchen an der Moving Fields Anlage der LfL, sowie zwei Versuche im Rollgewächshaus der LfL, durchgeführt. Parallel zu diesen Versuchen wurde mittels Labortechniken versucht eine Methode zu etablieren, um die Menge Wurzeln in Bodenproben zu quantifizieren.

In den Versuchen an der Moving Fields Anlage wurde das Wachstum von Wurzeln und Sprossen phänotypisiert. Mehrmals pro Woche wurden Bilder des ober- und unterirdischen Bereichs angebauter Kleinstbestände gesammelt. Die Bilder des oberirdischen Bereichs der Kleinstbestände konnten im Haus erfolgreich ausgewertet werden. Für die Auswertung der Bilder des unterirdischen Bereichs der Kleinstbestände wurde über Software der Firma Wolution, welche auf dem Prinzip des Maschinenlernens beruht, eine kostenpflichtige Methode etabliert. Für die statistische Auswertung der Wachstumsdaten wurde in der Programmiersprache ‚R‘ eine höchstflexible Infrastruktur entwickelt.

Parallel zu den Versuchen im Moving Fields Gewächshaus wurde im Labor versucht, eine Methode zu etablieren, um anhand von DNS-Analysen die Menge Wurzeln in Bodenproben zu bestimmen. Zuerst wurde erfolgreich ein kommerzielles Kit eingesetzt, um DNS zu isolieren aus Proben, die sich rein aus Gerste-Wurzeln zusammensetzten. Mit Hilfe eines unspezifischen Primers konnte die Menge DNS aus diesen Proben über eine qPCR-Technik (quantitative Polymerase-Chain-Reaction) quantifiziert werden. Angewendet auf Proben, die sich aus einer Mischung von Boden und Wurzeln zusammensetzten, stellte die Effizienz dieses Verfahrens sich zunächst als nicht stabil heraus. Daraufhin wurde umfangreiche Erfahrung mit alternativen DNS-Extraktion-Kits gesammelt und einen neuen, Gerste-spezifischen Primer entwickelt. Noch eignet sich die Methode der Bestimmung von Wurzelmasse aus dem Boden über qPCR nicht für die routinemäßige Untersuchung großer Probenzahlen in der Pflanzenzüchtung; für Weiterentwicklung in Nachfolgeprojekten jedoch bietet sie eine solide Basis.

Die beiden Versuche im Rollgewächshaus der LfL stellten sicher, dass ausreichend Material für die Entwicklung der Labormethode verfügbar war. Gleichzeitig lieferten sie Daten bezüglich des Effektes, den Trockenstress unter annähernd natürlichen Bedingungen auf das Erntegut hat. Die verschiedenen agronomisch-bedeutsamen Merkmale wurden mittels univariater Analyse ausgewertet. Um eine schnelle Einschätzung der sortenspezifischen Wassereffizienz zu ermöglichen, wurden zusätzlich Indizes entwickelt, welche die große Zahl der beschreibenden Merkmale zusammenfassen.

Die Projektergebnisse zeigen, dass Gerstenpflanzen allgemein, bei Mangel von Wasser oder Nährstoff, ihre Wurzeln eher reduzieren, als ausdehnen. Dies widerspricht bisherigen Annahmen, nach denen die Pflanzen mit einer Ausweitung des Wurzelsystems Nährstoffe und Wasser „suchen“. Weiterhin hat sich ergeben, dass die neueren Sorten den älteren Sorten und Exoten bei der Betrachtung aller Merkmale in der Reaktion auf Stress überlegen zu sein scheinen. Dennoch zeigen einzelne ältere Sorten und exotische Akzessionen positive Einzelmerkmale, die züchterisch genutzt werden können, neue Sorten mit verbesserter Toleranz gegen Trockenstress zu entwickeln. Für die meisten der im Projekt untersuchten Merkmale konnte ein signifikanter Einfluss des Genotyps festgestellt werden. Dies ist die wichtigste Grundlage für die züchterische Bearbeitung dieser Merkmale.

Die gesammelten Kenntnisse bezüglich des Genotyp-spezifischen Zusammenhangs zwischen Wurzelwachstum einerseits und Wasser- und Stickstoffeffizienz andererseits bieten einen innovativen Ansatz für die Gestaltung zukunftsorientierter Zuchtprogramme für die Entwicklung effizienter und stresstoleranter Sorten. Als Solches stehen sie öffentlichen und privaten Pflanzenzüchtern zur Verfügung.

1 Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojektes war es, Pflanzenmaterial und Selektionsmarker für die Pflanzenzüchtung bereitzustellen, um gezielt und effizient auf eine bessere Wasser und Nährstoffaufnahme bei Sommergerste selektieren zu können. Eine Ergänzung des Bayerischen Genpools für Sommergerste um diese Eigenschaften ist notwendig um eine wettbewerbsfähige Genetik für angepasste Sommergerstensorten zur Verfügung stellen zu können.

Eine Reihe von Gewächshausversuchen sollte dazu dienen, um das Wurzelwachstum verschiedener Sommergersten-Genotypen zu bestimmen und so potenziell interessante Züchtungskandidaten zu identifizieren. In dieser Versuchsreihe sollte der Zusammenhang zwischen Wurzelwachstum und Nährstoff/Wassereffizienz analysiert werden und festgestellt werden. Zusätzlich sollte festgestellt werden, ob sich die Stickstoff- und Wasser-Effizienz verschiedener Sommergersten-Genotypen mit Hilfe der rhizosphärischen Bakterien verbessern lässt.

Um Sortenunterschiede in Biomasseproduktion zu quantifizieren, sollte die „Moving Fields“ Hochdurchsatz-Phänotypisierungs-Anlage der LfL bei dieser Reihe von Gewächshausversuchen eingesetzt werden. Diese Anlage ermöglicht es, die Entwicklung der ober- und unterirdischen Biomasse mittels Bildaufnahmen kontinuierlich und zerstörungsfrei zu verfolgen. Um Schätzungen von der Wurzelbiomasse, die über die Bildanalyse zustande kommen, zu kalibrieren, sollte ein qPCR-Verfahren (quantitative Polymerase-Chain Reaction) entwickelt werden, womit die Menge Wurzel-DNA in Boden quantifiziert werden kann. Um landwirtschaftliche Relevanz zu garantieren sollte, parallel zu den Gewächshausversuchen, ein Teilsortiment über zwei Jahre im Rollgewächshaus der LfL angebaut werden.

Durch die neuen, zerstörungsfreien, bzw.- armen Methoden kann die Selektion auch auf die unterirdischen Pflanzenbestandteile ausgedehnt werden. Durch die genetische Information können die beteiligten Gene identifiziert werden, um weitere Aufklärung über Stoffwechselwege im Zusammenhang mit Wasser- und Nährstoffaufnahme zu erlangen.

Interessante Genotypen sollten noch während des Projektes als Kreuzungspartner eingesetzt werden, um einerseits die genetischen Grundlagen zu validieren und andererseits unmittelbar am Praxisbedarf orientiertes Zuchtmaterial zu erstellen.

Das im Rahmen des Projektes entwickelte Pflanzenmaterial, sowie sämtliche Informationen über die genetischen Marker, die Eigenschaften des Testsortimentes und des Zuchtmaterials sollten den bayerischen Pflanzenzüchtern zur Verfügung gestellt werden. Damit ist es möglich auf breiter Basis an geänderte Klimabedingungen und speziell an die regionalen Gegebenheiten Bayerns angepasste Sorten zu züchten.

Darüber hinaus ist zu erwarten, dass im Hinblick auf ihre Nährstoffeffizienz optimierte Sorten auch für den ökologischen Landbau eine wichtige Rolle spielen werden.

2 Zusammensetzung des Projektteams

Das Projekt wurde auf folgende Weise mit Personal besetzt:

Angestellter	Anstellung	Periode	VZÄ
Robin Käser	Agrartechnischer Assistent	01.01.2015 – 30.09.2015	1.00
Mathias Freudenreich	Agrarwirtschaftlich-technischer Assistent	16.11.2015 – 31.05.2017	1.00
		01.06.2017 – 31.12.2018	0.50
Dr. Milad Kassem	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	01.01.2015 – 30.09.2018	0.70
		01.10.2018 – 31.12.2018	0.95
Dr. Wouter Vahl	Wissenschaftlicher Mitarbeiter	01.01.2015 – 31.12.2018	0.80

Die Arbeitskraft der o. a. Personen wurde über die gesamte Projektlaufzeit während Arbeitsspitzen durch Aushilfen und Hilfskräfte im Versuchswesen ergänzt. Darüber hinaus wurde bei Bedarf noch vom Stammpersonal der Arbeitsgruppe Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste (IPZ 2b) Unterstützung geleistet.

3 Projektdaten

Für dieses Projekt wurde ein Sortiment mit 56 genetisch diversen Sommergerstengenotypen aus Genbankherkünften, Sorten und Zuchtstämmen zusammengestellt. Das vollständige Sortiment wurde in zwei Versuchen im Rollgewächshaus angebaut. Eine Auswahl der interessantesten Genotypen wurde für den Anbau in der Moving Fields-Anlage ausgewählt. Acht Referenzsorten wurden in allen Versuchen angebaut, um einen quantitativen Vergleich zwischen den Versuchen zu ermöglichen.

3.1 Versuche an der Moving Fields Anlage

Im Laufe des Projektes wurde erfolgreich eine Serie von sieben Versuchen im Moving Fields Gewächshaus durchgeführt (siehe Abbildung 1). Diese Versuchsserie diente dazu, das Wurzelwachstum verschiedener Sommergersten-Genotypen zu bestimmen und so potenziell interessante Züchtungskandidaten zu identifizieren. In der Versuchsserie wurde der Zusammenhang zwischen Wurzelwachstum und Nährstoff/Wassereffizienz analysiert und festgestellt (siehe Tabelle 1). Zusätzlich wurde festgestellt werden, ob sich die Stickstoff- und Wasser-Effizienz verschiedener Sommergersten-Genotypen mit Hilfe der rhizosphärischen Bakterien verbessern lässt.



Abbildung 1 Die Moving fields Anlage der LfL. Diese Anlage ermöglicht es, Pflanzenbestände durch ein Gewächshaus fahren zu lassen. Pflege (Bewässerung, Wiegung, Düngung) und Phänotypisierung (Bilddaufnahme) können dadurch vollautomatisch und äußerst exakt geschehen.

Tabelle 1 Die Laufzeit und den Umfang der im Lauf des Projektes durchgeführten Versuche.

Versuchsnummer	Versuchsort	Substrat (Typ: Firma)	Anbau-Datum (Jahr.Monat)	Ernte-Datum (Jahr.Monat)	Versuchs-laufzeit (Wochen)	Versuchs- umfang (Einheiten) ²	Versuchsfaktoren ¹				
							G	H ₂ O	N	Bak	Wdh
117	Moving Fields	Torf: Höfter	2015.06	2015.07	8	384	32	2	2	1	3
120			2015.08	2015.12	16			1	3	2	
121			2016.01	2016.05	20			2	1	1	
124			2016.09	2017.02	24						
125		Torf: Hawita	2017.05	2017.07	8	16	14	3	1	1	
127			2017.08	2017.12	16						
128			2018.04	2018.08							126
122	Rollgewächshaus	Natürlicher Boden	2016.04	2016.08	17	672	56	4	1	1	2
126			2017.03	2017.08	19	564	47				

¹ Die jeweilige Versuchsfaktoren pro Versuch werden kodiert angegeben; ‚G‘: die Zahl der verglichenen Genotypen, ‚H₂O‘: die Zahl der unterschiedlichen Bewässerungsbehandlungen, ‚N‘: die Zahl der unterschiedlichen Stickstoff-Behandlungen, ‚Bak‘: die Zahl der unterschiedlichen Behandlungen mit Rhizobakterien und ‚Wdh‘: die Zahl der reinen Wiederholungen pro Behandlungskategorie. Die Behandlungen wurden in allen Versuchen außer im Versuch 120 gekreuzt: Im Versuch 117 zum Beispiel wurden Kleinstbestände der beiden Bewässerungsbehandlungen jeweils bei den beiden Stickstoffbehandlungen unterzogen. Im Versuch 120 wurde nur eine der 3 N-Behandlungen sowohl mit als auch ohne Bakterien behandelt.

² Die Versuchseinheiten in den Versuchen an der Moving Fields Anlage waren Kleinstbestände mit einer Fläche von 0.1 m². Die Versuchseinheiten in den Versuchen im Rollgewächshaus waren Doppelreihen.

3.1.1 Aufbau der Versuche

3.1.1.1 Pflanzengefäße

Die Moving Fields Anlage soll es ermöglichen, das unterirdische Wachstum von Kleinstbeständen sowie den Wassergehalt des Bodens mittels Bilderfassung zu dokumentieren. Die Anwendung dieser Möglichkeit erforderte Sonder-Pflanzengefäße. In allen im Laufe des Projektes durchgeführten Versuchen wurde Pflanzengefäße eingesetzt, die im Frühling 2014 zusammen mit der Firma JS Maschinen speziell für Einsatz an der Moving Fields Anlage entwickelt wurden. Diese Pflanzengefäße, blaue Eurobehälter (RAL 5010) in der Abmessung 40 * 30 * 32 cm, sind an zwei gegenüberliegenden Seiten mit einer Klarsichtscheibe ausgerüstet (siehe Abbildung 2). Diese Klarsichtscheiben ermöglichen es, die Menge der an diesen Seiten wachsenden Wurzeln optisch zu verfolgen und damit zu quantifizieren.

Als Klarsichtscheiben wurden bis dem Jahr 2016 Makrolon-Klarsichtscheiben in der Stärke 8 mm eingesetzt. Leider stellte sich heraus, dass sich auf diesen Makrolon-Klarsichtscheiben beim Einbauen und bei ihrem Einsatz in den Versuchen Kratzer bildeten, welche die spätere Bildauswertung stark störten und deswegen nicht wiederverwendbar waren. Als Alternative wurden ab dem Jahr 2016 PMMA-Klarsichtscheiben eingesetzt. Um das Risiko für Kratzer beim Einbauen der Klarsichtscheiben zu verringern, wurde für eine geringere Stärke (5 mm) entschieden. Beim Einsatz in den Versuchen stellte sich heraus, dass auch PMMA-Klarsichtscheiben nicht wiederverwendbar sind. Um Kosten zu sparen, werden seit Mai 2017 für jeden Versuch neue PMMA-Klarsichtscheiben in der Stärke 4 mm eingesetzt.



Abbildung 2 Die an der Moving Fields Anlage eingesetzten Pflanzenbehälter. Um Bilder vom Wurzelwachstum zu ermöglichen, werden seit Sommer 2014 als Pflanzengefäße blaue Eurobehälter in der Abmessung 40 * 30 * 32 cm eingesetzt, die an zwei gegenüberliegenden Seiten mit Scheiben aus Plexiglas versehen sind.

3.1.1.2 Anbausubstrat

Der Anbau von Versuchspflanzen in einem Gewächshaus erfordert eine Entscheidung über das Substrat, worin die Versuchspflanzen angebaut werden. Die grundsätzliche Wahl ist zwischen natürlichem Boden aus dem Freiland und einem künstlichen Substrat. Für die in Rahmen dieses Projektes an der Moving Fields Anlage durchgeführten Versuche wurde gegen den Einsatz von natürlichem Boden und für den Einsatz eines künstlichen Substrats entschieden.

Gegen den Einsatz von natürlichem Boden sprach dessen Einzigartigkeit und Heterogenität: Die genaue Zusammensetzung von natürlichem Boden ist in jedem Freiland unterschiedlich und ist oft bis auf der kleinsten Skala variabel. Auf der praktischen Ebene spielte bei dieser Entscheidung zusätzlich mit, dass natürlicher Boden oft Sand enthält und dadurch schwer ist; das Gewicht von den Versuchsobjekten, das heißt, das Gesamtgewicht von einem Werkstückträger, einem mit Substrat gefüllten Pflanzengefäß, eventuell Pflanzenunterstützer und den in dem Pflanzengefäß angebauten Pflanzen, ist von der Wiegekapazität der in der Moving Fields Anlage eingebauten Waagen beschränkt.

Für den Einsatz eines künstlichen Substrats sprach der Anforderung, die Versuchspflanzen auf einem homogenen Substrat anzubauen und die genaue Zusammensetzung dieses Substrats bestimmen zu können. Ein homogenes Substrat war gewünscht, da es die besten Voraussetzungen bietet, die Phänotypen der Versuchseinheiten vergleichen zu können. Experimentelle Kontrolle über die genaue Zusammensetzung des Anbausubstrats war deswegen gewünscht, weil es einerseits den Anbau von Versuchspflanzen unter optimalen Bedingungen und andererseits der experimentellen Anwendung von z.B. Nährstoffunterschieden zwischen Versuchseinheiten ermöglicht.

Im Vorgängerprojekt wurden verschiedene künstliche Substrate in ihren Eigenschaften bezüglich Wasserhaltekapazität, Nährstoffzusammensetzung, Gewicht und Eignung für die Bildauswertung verglichen. Auf Grund dieses Vergleichs wurde dann für den Einsatz von Kübelpflanzenerde von der Firma Höfter, eine Mischung aus hauptsächlich Weiß- und Schwarztorf entschieden. Ausschlaggebend bei der Entscheidung für dieses Substrat war u.a. dessen Gewicht: Eine Torfmischung ist einer der leichtesten angebotenen Substrate. Die genaue Zusammensetzung des Substrats von der Firma Höfter wurde im Vorgängerprojekt im Laufe der Versuche nach und nach angepasst bis eine Sondermischung zusammenkam. Wichtige Eigenschaften dieser Sondermischung sind u.a., dass kratzende Komponenten, welche die Klarsichtscheiben (siehe Abschnitt 3.1.1.1) besonders leicht beschädigen könnten (z.B. Blähton), sowie Wurzelähnliche Strukturen und Strukturen die sonst die Bildauswertung im Weg stehen könnten (z.B. Tongranulat) aus der Zusammensetzung herausgenommen wurden.

Im Sommer 2016 stellte sich heraus, dass der natürliche Stickstoff-Gehalt der Sondermischung von der Firma Höfter, trotz Zusagen von deren Seite, schon so hoch war, dass die Möglichkeit, Versuchspflanzen unter stark reduzierten Stickstoffbedingungen anzubauen – eines der Versuchsziele dieses Projektes und dessen Folgeprojektes – von vornherein ausgeschlossen wurde. Für die Versuche die im Jahr 2017 angebaut wurden, wurde Fruhstorfer Nullerde von der Firma Hawita genutzt, ein Substrat, das kein Schwarztorf und deswegen auch weniger Stickstoff beinhaltet.

3.1.2 Zielsetzung der Versuche

Ziel aller Versuche außer Versuch 120 war es, den Einfluss von Trockenstress auf das Wurzelwachstum verschiedener Sommergersten Genotypen zu bestimmen und so potenziell interessante Züchtungskandidaten zu identifizieren. Die Periode in der einer Trockenbehandlung unterzogen wurde, variierte zwischen den Versuchen: Sie fiel entweder während der Blattentwicklung (um BBCH-Wachstumsstadium 15; im Versuch 117), während der Bestockung (um BBCH-Wachstumsstadium 25; in den Versuchen 125 und 128) oder während des Ährenschiebens (um BBCH-Wachstumsstadium 55; in den Versuchen 121, 124, 127 und 128). In vier dieser Versuchen (Versuche 117, 124, 125 und 127) wurde der Effekt einer trockenen Periode in Zusammenhang mit einer Reduzierung von der Stickstoffdüngungsmenge gebracht. Versucht wurde dabei, den Effekt einer trockenen Periode auf Kleinstbestände die optimal mit Stickstoff versorgt waren, zu vergleichen mit dem Effekt einer trockenen Periode auf Kleinstbestände wofür die Stickstoffdüngungsmenge reduziert war. Wie in den Zwischenberichten berichtet, hat sich nach dem Anbau und nach der Stickstoffdüngung im vierten Versuch (Versuch 124) herausgestellt, dass die ursprüngliche N-Konzentration im von der Firma Höfter gelieferten Torfsubstrat schon so hoch war, dass die Variante mit reduzierter Stickstoffversorgung nicht mehr zu Stande gekommen ist. Die Versuche 117 & 124 werden deswegen hauptsächlich im Bereich Trockenstress aussagekräftig sein. Für die Versuchen 125 und 127 wurde Torfsubstrat von der Firma Hawita eingesetzt; dieses Torfsubstrat beinhaltet wesentlich weniger Stickstoff, wodurch die beiden Versuche 125 & 127 sowohl im Bereich Trockenstress als auch im Bereich Stickstoffdüngung aussagekräftig sind.

Im Versuch 121 wurde untersucht, ob sich die Wasser-Effizienz verschiedener Sommergersten-Genotypen mit Hilfe der rhizosphärischen Bakterien verbessern lässt. Ziel des Versuches 120 war es, Kreuzungskandidaten mit einer höheren Stickstoff-Effizienz zu selektieren und gleichzeitig Genotypen zu identifizieren, deren Stickstoff-Effizienz mit Hilfe der rhizosphärischen Bakterien erhöht werden kann. Da im Versuch 120 Stickstoff-haltiges Torfsubstrat von der Firma Höfter eingesetzt wurde, ist dieser Versuch hauptsächlich im Bereich Bakterien aussagekräftig. Um der Effekt von rhizosphärischen Bakterien zu bestimmen, wurde eine Methode etabliert, wobei ein Teil der Kleinstbestände in den Versuchen 120 und 121 mit einer Mischung von fünf Bakterienstämmen behandelt wurden (Für einen Überblick der eingesetzten Bakterien und ihren Eigenschaften, siehe Tabelle 2). Die etablierte Methode wurde im Detail dokumentiert und bei IPZ 2b archiviert.

Tabelle 2 Die in den Moving Fields Versuchen eingesetzten Bakterien und ihre Eigenschaften.

Bakterien	Gramfärbung	Stickstoff-Fixierung	Phosphat Solubilisierung	ACC deaminase	Phytohormone	Modus
<i>Azospirillum brasilense</i> Az39	negative	+	-	+	++	Epiphyt
<i>Pseudomonas fluorescens</i> WCS417r	negative	-	++	+	+	Epiphyt
<i>Burkholderia phytofirmans</i> PsJN	negative	-	-	+	+	Epiphyt
<i>Herbaspirillum frisingense</i> GSF30	negative	+	-	+	+	Endophyt
<i>Rhizobium radiobacter</i> F4	negative	+ (Gerste)	-	+	+	Endophyt

3.1.3 Versuchsmerkmale

Für alle Versuche, die an der Moving Fields Anlage durchgeführt wurden, wurden die Wachstumsdynamik der Wurzeln und die Wachstumsdynamik der Sprosse an Hand der Bildaufnahme, sowie die Halmzahl, die Frischmasse und die Trockenmasse bei der Ernte, bestimmt. In zwei der Versuchen (Versuche 117 und 125) lag der Fokus dabei auf das Wachstum in den ersten zwei Monaten, in denen die Wurzeln zu vollem Wachstum kommen: Kleinstbestände in diesen beiden Versuchen wurden nach 52 Tagen geerntet. In allen anderen Versuchen (die Versuche 120, 121, 124, 127 und 128) wurde das Wachstum der Wurzeln und der Sprossen über die ganze Vegetationszeit verfolgt; Kleinstbestände in diesen Versuchen wurden erst nach der Reife geerntet. In diesen Versuchen wurden zusätzlich zu dem Wachstum und den Frisch- und Trockenmassen das Gewicht und die Größe der Körner bestimmt. In Versuch 120 außerdem der Stickstoffgehalt in Körner und Stroh bestimmt und die Aufnahme und Zuteilung vom Stickstoff in den Pflanzen ausgewertet.

3.1.4 Bildaufnahmen

Um das Wachstum von Wurzeln und Sprossen zu quantifizieren, wurde in der Wurzel-Kabine und in der VIS-Kabine der Moving Fields Anlage mehrmals pro Woche Bilder gesammelt.

Die Wurzel-Kabine und die VIS-Kabine sind als Beobachtungskammern wichtiger Bestandteil der Moving Fields Anlage. In diesen Beobachtungskammern werden die Pflanzenbestände mit verschiedenen Kameras fotografiert, was die gleichzeitige Phänotypisierung des Sprosswachstums und des Wurzelwachstums ermöglicht. Die Bilderfassung in diesen Kammern ist zerstörungsfrei; es schadet den Kleinstbeständen nicht von der Anlage fotografiert zu werden. Diese Eigenschaft der Anlage ermöglicht eine wiederholte Vermessung (Phänotypisierung) der Kleinstbestände und damit eine Beschreibung ihres Wachstums – ein Merkmal, das vorher nicht oder nur unter dem größten Aufwand erfassbar war.

3.1.4.1 Bilderfassung

Die VIS-Kabine der Moving fields Anlage ist mit zwei Kameras die eine Erfassung hochauflösender Farbbilder im normalen Lichtbereich ermöglichen ausgerüstet. Diese beiden Kameras sind auf dem oberirdischen Bereich gerichtet und dienen die Phänotypisierung vom Sprosswachstum. Mit einer dieser Kameras lassen sich die Kleinstbestände von der Seite im Bild erfassen, wobei der Einfallswinkel beliebig variiert werden kann. Mit der zweiten dieser Kameras können die Kleinstbestände senkrecht von oben fotografiert werden. Die beiden Kameras der VIS-Kabine sind seit dem ersten an der Anlage angebauten Versuch im Jahr 2013 nach Zufriedenheit genutzt worden. Im jetzigen Projekt hat sich herausgestellt, dass die Bilder, die senkrecht von oben von den Kleinstbeständen gemacht werden keine wesentliche Information zufügen. Deswegen wurde im Laufe des Projektes entschieden, auf den Einsatz dieser Kamera zu verzichten, auch um den rechnerischen Speicherplatz nicht unnötig zu belasten.

Die Wurzel-Kabine der Moving Fields Anlage wurde im Laufe des Jahres 2014 aktiviert. In dieser Kabine befinden sich zwei unterschiedliche Kameras; eine RGB-Kamera und eine Nahinfrarot (NIR) Kamera. Beide Kameras sind auf dem unterirdischen Bereich der Kleinstbestände gerichtet. Die RGB-Kamera ermöglicht es, Bilder vom Wurzelwachstum im sichtbaren Lichtbereich zu machen; mit der Nahinfrarot-Kamera können Bilder vom Substrat gemacht werden, welche Information über die Wasserverteilung im Substrat geben können sollten. Die Wurzel-Kabine ist mit beiden Kameratypen in allen Versuchen zwischen August 2014 und Februar 2017 eingesetzt worden. Da die Kapazität des Projektteams es nicht ermöglichte, die mit der Nahinfrarot-kamera gesammelten Bilder erfolgreich auszuwerten, wurde Anfang 2017 entschieden, weiterhin auf den Einsatz der Nahinfrarot-Kamera zu verzichten, auch um den rechnerischen Speicherplatz nicht unnötig zu belasten. Im Herbst 2016 wurde die Wurzel-Kabine in Zusammenarbeit mit dem Institut für Landtechnik der LfL um ein Gebläse erweitert. Dieses Gebläse sorgt dafür, dass Blätter die über den Rand eines Pflanzengefäßes herunterhängen hochgepusht

werden und so nicht länger die Sicht auf der Klarsichtscheibe hindern. Dieses Gebläse ist seit September 2016 bei allen Versuchen im Einsatz gewesen.

3.1.4.2 Bildoptimierung

Die in die Pflanzengefäße eingebauten Klarsichtscheiben ermöglichen es, die Entwicklung der an diesen Seiten wachsenden Wurzeln optisch zu verfolgen und damit zu quantifizieren. Manchmal wird die Sicht auf den an den Seiten wachsenden Wurzeln jedoch von sich auf der Klarsichtscheibe bildendem Kondenswasser reduziert. Kondenswasser bildet sich insbesondere dann auf den Klarsichtscheiben, wenn das Substrat viel Wasser enthält und wenn die Temperatur der Luft im Gewächshaus und damit der Klarsichtscheibe sich stark von der Temperatur des Substrats unterscheidet.

Unterschiede in der Temperatur zwischen Substrat und Gewächshaus treten unter anderem auf, wenn es für längere Zeit direkte Sonneneinstrahlung auf den Klarsichtscheiben gibt. Um solcher Sonneneinstrahlung vorzubeugen, wurde an Kopf- und Fußende der Gewächshausreihen über die ganze Länge des Gewächshauses Abdeckfließ aufgehängt (siehe Abbildung 3).

Unterschiede in der Temperatur zwischen Substrat und Gewächshaus treten auch auf, wenn die Temperatur tagsüber sich stark von der Temperatur in der Nacht unterscheidet; in diesem Fall kühlt das Gewächshaus schneller ab als das Substrat. Um solche Temperaturunterschiede vorzubeugen, werden bei der Einstellung der Temperatur im Gewächshaus konstante Temperaturen angestrebt.



Abbildung 3 Ansicht auf der Abstellfläche der Moving Fields Anlage. Um Sonneneinstrahlung auf die Klarsichtscheiben vorzubeugen, wurde an Kopf- und Fußende der Gewächshausreihen über die ganze Länge des Gewächshauses Abdeckfließ aufgehängt. Um Insekten abzufangen, hängen im Moving Fields Gewächshaus Gelb- und Blautafeln; die Glitzerstreifen sollen Sperlinge abschrecken.

3.1.4.3 Bildauswertung

Ausgewertet wurden in diesem Projekt die Bilder, die mit der seitlichen Kamera der VIS-Kabine vom oberirdischen Teil der Kleinstbestände gesammelt wurden, sowie die Bilder, die mit der seitlichen Kamera der Wurzel-Kabine vom unterirdischen Teil der Kleinstbestände gesammelt wurden.

3.1.4.3.1 Auswertung der Sprossbilder

Die von der Anlage aufgenommenen Bilder des oberirdischen Bereichs der Kleinstbestände enthalten eine Vielzahl an Information über das Wachstum der Sprossen. Diese Information wird erst nach Auswertung der Bilder sichtbar. Im Laufe des Projektes wurden alle Bilder des oberirdischen Bereichs der Kleinstbestände mit dem Programm LemnaGrid, einer der LemnaTec-betriebseigenen Software-Programme, die gleichzeitig mit der Anlage angeschafft wurden, erfolgreich ausgewertet.

Ziel der Auswertung der Aufnahmen des oberirdischen Teils der Kleinstbestände ist, den im Bild erfassten Kleinstbestand als solchen von dem Rechner automatisch erkennen zu lassen (siehe Abbildung 4). Das Softwareprogramm LemnaGrid ermöglicht die Erstellung von Bildauswertungsalgorithmen; dieses Programm enthält viele Algorithmen, die miteinander verbunden werden können um bestimmte morphologische Eigenschaften der in den Bildern aufgenommenen Kleinstbestände zu isolieren und zu quantifizieren (siehe Abbildung 5). Sobald dies gelungen ist, können verschiedene morphologische Messwerte leicht quantifiziert werden. Dank zunehmender Erfahrung im Projektteam stellte die Auswertung dieser oberirdischen Aufnahmen in diesem Projekt keine große Herausforderung mehr dar; pro Versuch wurden etwa zwei Wochen gebraucht, um einen passenden Algorithmus zur Identifikation des oberirdischen Teils der Kleinstbestände zu entwickeln.

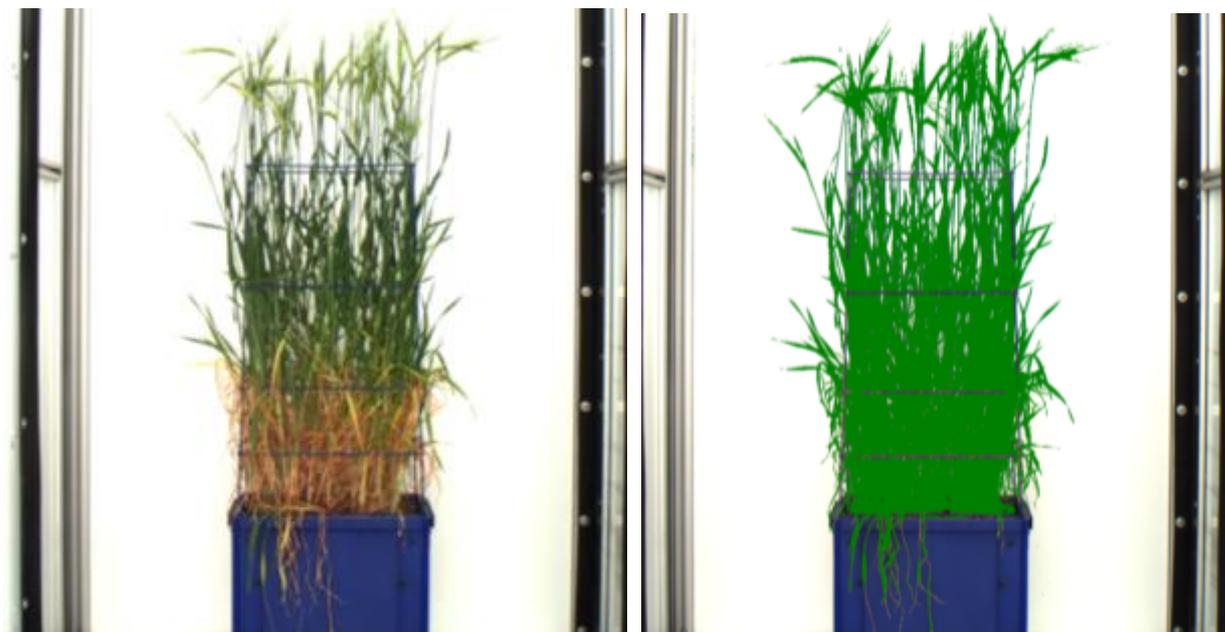


Abbildung 4 Ein Bild von den Sprossen eines Kleinstbestandes samt Auswertung. Ziel der Auswertung eines VIS-Seitenbildes (Foto links) ist es, den Kleinstbestand als solchen zu erkennen und zu isolieren (Foto rechts; von allem was grün ist wird angenommen, dass es zum Kleinstbestand gehört).

3.1.4.3.2 Auswertung der Wurzelbilder

Die von der Anlage aufgenommenen Bilder des unterirdischen Bereichs der Kleinstbestände enthalten eine Vielzahl an Information über das Wachstum der Wurzeln. Diese Information wird erst nach Auswertung der Bilder sichtbar. Ziel der Auswertung der unterirdischen Aufnahmen ist, die Wurzeln zu erkennen und zu isolieren.

Im Laufe des Projektes wurde versucht, die Wurzelbilder wie die Sprossbilder mit dem Programm LemnaGrid auszuwerten. Angefangen wurde dabei mit der Auswertung der im Versuch 124 gesammelten Bilder. Mit sehr großem Zeit- und Personalaufwand ist es tatsächlich gelungen, die im Versuch 124 gesammelten Wurzelbilder auszuwerten. Während der Auswertung der Aufnahmen der unterirdischen Wachstumsdynamik stellte sich heraus, dass die Auswertung mit der von der Fa. Lemnatec zur Verfügung gestellten Software speziell für Aufnahmen von Wurzeln einen sehr großen Zeit- und Personalaufwand benötigt, und dabei keine vollständig befriedigenden Ergebnisse erbringt. Erschwert wurde diese Auswertung durch viele störende Elemente und durch die Unauffälligkeit der meisten Wurzeln.

In einem Versuch die Auswertung des Wurzelwachstums von Pflanzen anhand der mit der Moving-Fields-Anlage gesammelten Aufnahmen effizienter zu gestalten, wurde im Jahr 2017 eine Pilotstudie durchgeführt, wobei die Aufnahmen des Wurzelwachstums mit Hilfe der Software von der Firma Wolution in München, welche auf dem Prinzip des Maschinenlernens beruht, ausgewertet wurden. Die Ergebnisse dieser Pilot-Analyse waren vielversprechend. Im Winter 2018 - 2019 wurde diese kostenpflichtige Software zur Auswertung aller Versuche außer Versuch 124 erfolgreich eingesetzt. Damit wurde eine Methode etabliert, die es ermöglicht, Wurzel-Aufnahmen effizient und mit einer befriedigenden Qualität auszuwerten.

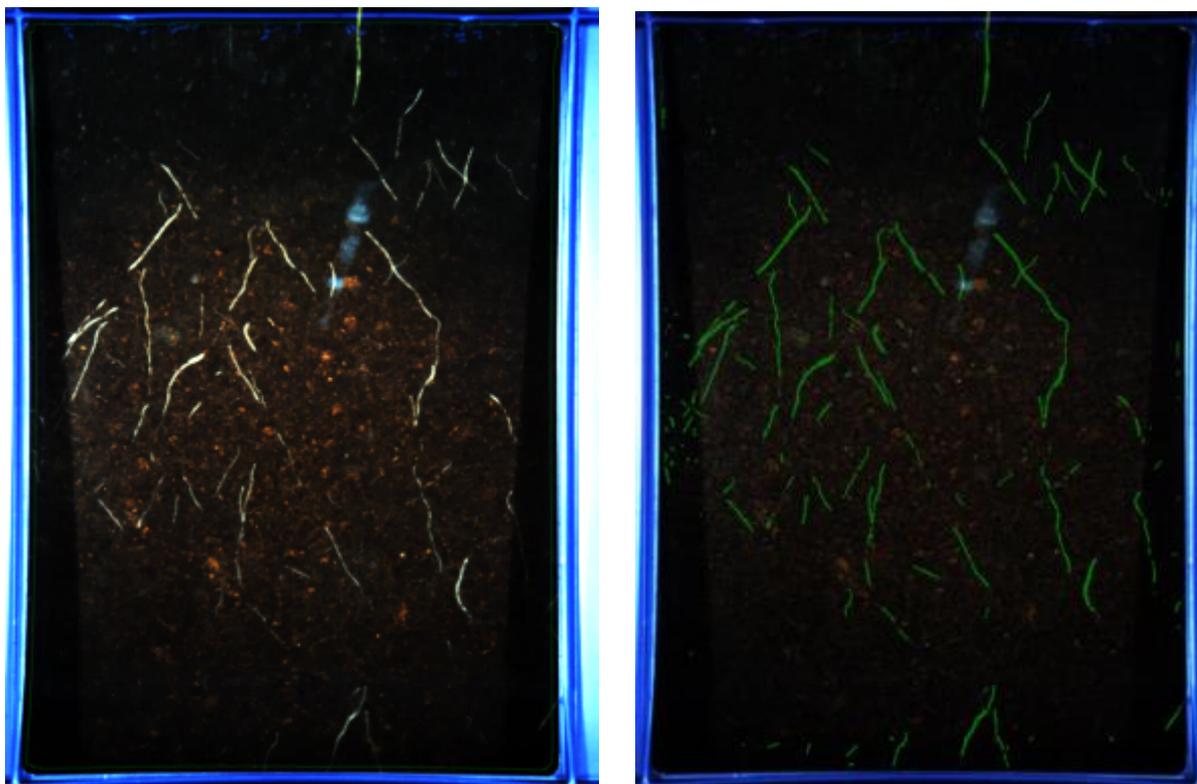


Abbildung 6 Ein Bild von den Wurzeln eines Kleinstbestandes samt Auswertung. Für ein VIS-Wurzel-Bild (Foto links) ist es Ziel, die Wurzeln zu erkennen und zu isolieren (Foto rechts; von allem was grün ist wird angenommen, dass es Wurzeln betrifft).

3.2 Versuche im Rollgewächshaus

Zur Unterstützung der zu etablierenden Methode zur Quantifizierung von der Menge Wurzel-DNS in Bodenproben wurden im Laufe des Projektes erfolgreich zwei Versuche im Rollgewächshaus der LfL durchgeführt. Diese beiden Versuche sollten an erster Stelle sicherstellen, dass ausreichend interessantes Material für die Entwicklung dieser Methode verfügbar war. An zweiter Stelle dienten diese beiden Versuche dazu, der Effekt von Trockenstress auf das Wurzelwachstum unter annähernd natürlichen Bedingungen festzustellen.

Im Jahr 2016 wurde im Versuch 122 das vollständige Sortiment angebaut; im Jahr 2017 wurde im Versuch 126 das vollständige Sortiment mit Ausnahme einiger Problemsorten angebaut. Ziel der beiden Versuche im Rollgewächshaus war, den Einfluss von Trockenstress auf verschiedene Sommergerstengenotypen unter annähernd natürlichen Bedingungen zu bestimmen und so potenziell interessante Züchtungskandidaten zu identifizieren. Hierzu gab es in beiden Versuchen vier Behandlungen: eine Rollgewächshaus-interne Behandlung und –Kontrolle, sowie eine Rollgewächshaus-externe Behandlung und –Kontrolle. Pflanzen in der *internen Kontrolle* wurden im Rollgewächshaus bei optimaler Bewässerung angebaut; Pflanzen in der *internen Behandlung* wurden im Rollgewächshaus bei einer reduzierten Bewässerung angebaut. Pflanzen in der *externen Kontrolle* wurden im freien Feld angebaut und ausschließlich über Regen bewässert; Pflanzen in der *externen Behandlung* wurden ebenso im freien Feld angebaut und ausschließlich über Regen bewässert, nach der Bestockung jedoch chemisch behandelt um Trockenstress einzuleiten.

Für die beiden Versuche, die im Rollgewächshaus durchgeführt wurden, wurden folgende Merkmale bestimmt: die Zahl der Halme, das Datum des Ährenschiebens, der Chlorophyll-Gehalt im Laufe der Vegetationsentwicklung, die Frischmasse und die Trockenmasse bei der Ernte, das Gewicht und die Größe der Körner.



Abbildung 7 Das Rollgewächshaus der LfL. Das Rollgewächshaus fährt bei Regen automatisch über im Freiland angebauten Pflanzen und ermöglicht somit eine vollständige Kontrolle über die Bewässerung dieser Pflanzen. Foto: Tom Freudenberg.

4 Auswertung der Projektdaten

Die Versuchsdaten wurden mit der Open-Source Software ‚R‘ (R Core Team 2018) ausgewertet. Da es in den Versuchen im Moving Fields Gewächshaus eine Vielfalt von abhängigen Variablen gibt wäre eine multivariate Datenanalyse am besten geeignet. So eine Datenanalyse wird jedoch schnell sehr komplex. Um die Komplexität der Analyse in Grenzen zu halten, wurde deswegen entschieden, jede abhängige Variable einzeln mittels univariater Datenanalysen auszuwerten.

Für jeden der Versuche wurde Programmiercode entwickelt, um die Erntedaten bezüglich der unterschiedlichen Merkmale zusammen zu bringen und sie einheitlich zu machen. Zusätzlich wurde Programmiercode für die statistische Auswertung der Erntedaten entwickelt. Um eine grafische Darstellung der Behandlungseffekte zu ermöglichen, wurde Programmiercode aus dem Vorgängerprojekt angepasst und erweitert. Anhand dieses Programmiercodes können für jedes Merkmal nicht nur die Daten aus unterschiedlichen Perspektiven (z.B. Behandlung pro Genotyp, Behandlung versus Behandlung oder Merkmal versus Merkmal) visualisiert, sondern gleichzeitig die Ergebnisse der statistischen Prüfungen grafisch zusammengefasst werden.

Auch für die Auswertung der Wachstumsdaten wurde Programmiercode entwickelt: Mit Hilfe dieses Programmiercodes werden alle Daten bezüglich des Wachstums der Wurzeln und der Sprosse aus den verschiedenen Versuchen einheitlich gemacht und in einen einzigen Datensatz zusammengebracht. Für die grafische Darstellung aller Wachstumsdaten wurde Programmierfunktionen aus der R Paket ‚ggplot2‘ (Wickham 2009) eingesetzt. Um die Behandlungseffekte auf das Wurzelwachstum statistisch zu beschreiben, wurde mit Hilfe der ‚loess‘-Funktion aus dem ‚stats‘-Paket im Statistikprogramm ‚R‘ pro Kleinstbestand ein lokal polynomiales Regressionsmodell erstellt. Anhand dieser Regressionsmodelle wurden interessante Eigenschaften der Wachstumsdynamik identifiziert und quantifiziert: die maximale Wurzelfläche die pro Kleinstbestand erreicht wurde, den Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Wurzelfläche und die Wurzelfläche am Anfang und Ende der trockenen Periode. Diese Eigenschaften wurden jeweils auf Behandlungseffekte untersucht. Somit wurde eine Infrastruktur entwickelt, welche statistische Auswertung der Wachstumsdaten und die grafische Darstellung der Daten samt Statistik höchstflexibel ermöglicht. Um das Potenzial der Auswertung einsichtig zu machen, ist die Auswertung der Wachstumsdaten aus dem Versuch 125 als Beispiel im Supplement mitaufgenommen.

Zusätzlich zu der separaten Auswertung von jedem einzelnen Merkmal wurde versucht einen neuen Index zu entwickeln, der eine große Zahl der beschreibenden Merkmale zusammenfasst, um anhand der Versuchsergebnisse eine schnelle Einschätzung der sortenspezifischen Stickstoff- und Wassereffizienz zu ermöglichen. Dieser Index hilft bei der Identifikation leistungsstärker Sorten, die über die verschiedenen Merkmale hinweg wenig von einer Reduktion der Wasser- oder Stickstoffversorgung befallen waren.

4.1 Erstellung eines Basismodells

Um die abhängige Variable als lineare Regressionsgleichung der unabhängigen Variablen zu modellieren wurde die Funktion ‚gls‘ (Englisch: Generalised Least Squares) aus dem ‚nlme‘ Paket (Pinheiro et al. 2018) benutzt. Diese Funktion sucht die Verbindung zwischen der abhängige und den unabhängigen Variablen, welche die quadrierten Abweichungen (Englisch: least squared residuals) minimalisiert und es gleichzeitig ermöglicht unterschiedliche Varianz-Strukturen aufzulegen.

Jede abhängige Variable (y) wurde normalisiert und danach wie folgt als lineare Regressionsgleichung aller möglichen Kombinationen der unabhängigen Variablen Sorte (G), Behandlung (E) modelliert:

Formel 1
$$y_{\text{norm}} = G * E$$

4.2 Überprüfung der Modellannahmen

Die wichtigsten Annahmen, die einem solchem Modell zur Grunde liegen sind, dass 1) die Residuen normal verteilt sind und dass 2) die Varianz der Residuen homogen ist (Zuur et al. 2009, Seite 19). Um diese Annahmen zu überprüfen wurden folgende sieben Grafiken erstellt (siehe Abbildung 8) ein Histogramm der Residuen, 2) ein Normales Wahrscheinlichkeitsdiagramm, 3) eine Grafik mit den modellierten Werten im Vergleich zu den beobachteten Werten und Grafiken mit den normalisierten Residuen im Vergleich zu 4) den modellierten Werten, 5) den Sorten, 6) den Behandlungen und 7) den Wiederholungen.

4.3 Erweiterung des Basismodells: Modellierung der Varianz

Da sich bei einigen der abhängigen Variablen herausstellte, dass die Annahmen der Normalität und der Homogenität der Varianz Annahme wiederlegt wurde, wurde eine Methodik entwickelt, die automatisch 9 zusätzliche Modelle erstellt, die das Basis Modell mittels dem ‚weights‘ Argument der gls Funktion um eine Modellierung der Varianz erweiterten.

Um das am besten geeignete Modell der 21 erstellten zu selektieren, wurde für jedes der Modelle das korrigierte AIC-Kriterium (Englisch: ‚Akaike‘s Information Criterion‘) berechnet (für ein Beispiel, siehe Tabelle 8). Ein AIC-Kriterium benutzt die Kullback-Leibler Information als Basis für die Selektion von Modellen (Burnham & Anderson 1998, Seite 61); das korrigierte AIC-Kriterium ‚AICc‘ ist eine verbesserte Version des ursprünglichen AIC-Kriterium (Burnham & Anderson 1998, Seite 66). Selektiert wurde pro abhängige Variable das Modell mit dem niedrigsten AICc-Wert, wobei auch für dieses Modell die Residuen wie oben beschrieben überprüft wurden.

Von dem am besten geeigneten Modell wurde eine „ANOVA“ Varianzanalyse-Tabelle erstellt, welche zusammenfasst, wieviel Variation von jeder der unabhängigen Variablen erklärt werden kann. Da es zu schwierig war, für das mit der gls-Funktion erstellten Modell direkt eine ANOVA-Tabelle zu erstellen, wurde das Basis-Modell erneut, aber diesmal mit Hilfe der ‚lm‘ Funktion (R Core Team 2018) für lineare Modelle erstellt. Diese Vorgehensweise ist dadurch gerechtfertigt, dass die Varianz-Analyse selber nicht von Struktur in der Variation der Residuen beeinflusst wird (eigene Beobachtung).

In diesem Bericht werden nur Ergebnisse bezüglich des Basismodells präsentiert; die Methodik zur Erweiterung des Basismodells wurde für die hier präsentierten Ergebnisse nicht angewendet.

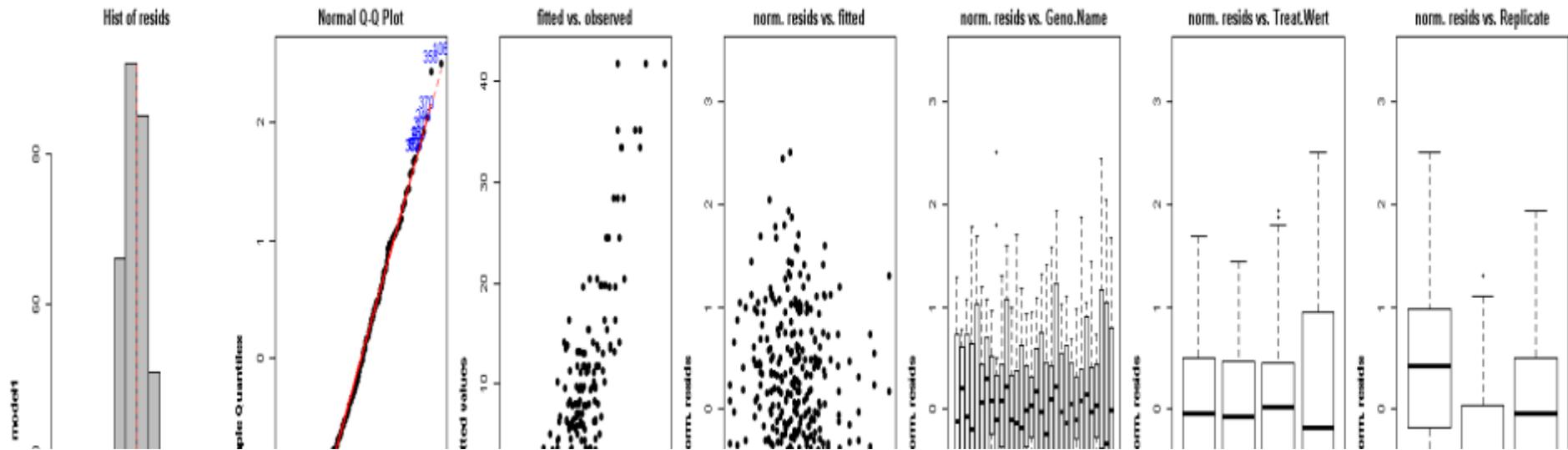


Abbildung 8 Beispiel einer grafischen Überprüfung der Modellannahmen. Für jedes Modell, das erstellt wurde, wurde automatisch eine Grafik zur Überprüfung der Modellannahmen erstellt. Diese Grafik setzte sich aus sieben Teilgrafiken zusammen. Von links nach rechts zeigen diese Teilgrafiken: 1) ein Histogramm der Residuen, 2) ein Normales Wahrscheinlichkeitsdiagramm, 3) eine Grafik mit den modellierten Werten im Vergleich zu den beobachteten Werten und Grafiken mit den normalisierten Residuen im Vergleich zu 4) den modellierten Werten, 5) den Sorten, 6) den Behandlungen und 7) den Wiederholungen.

4.4 Korrektur für mehrfaches Testen

Für mehrfaches Testen wurde mittels dem ‚fdr‘ (Englisch: ‚falsch discovery rate‘) Argument zu der ‚cld‘ Funktion korrigiert. Diese Methode kontrolliert die erwartete Proportion der Typ-I Fehler unter den verworfenen Hypothesen (Quinn & Keough 2002, Seite 49).

4.5 Varianzanalyse

Mithilfe einer Varianzanalyse wurde bestimmt, ob ein Einfluss auf eine Messwertgröße einen signifikanten Einfluss besitzt. Dabei ist ein p-Wert von $< 0,05$ ein signifikantes Ergebnis, ein p-Wert von $< 0,01$ ein sehr signifikantes Ergebnis und ein p-Wert von $< 0,001$ ein hoch signifikantes Ergebnis.

4.6 Paarweise Vergleiche der Behandlungskategorien

Für das selektierte Modell wurden alle mögliche Paare der Behandlungskategorien mittels der ‚cld‘ (Englisch: Compact Letter Display) Funktion aus dem ‚lsmeans‘ (Englisch: Least Square Means) Paket (Lenth 2016) statistisch verglichen und in von Buchstaben gekennzeichneten Gruppen eingeteilt, wobei Behandlungskategorien die eine Buchstabe teilen als nicht signifikant unterschiedlich zu interpretieren sind.

4.7 Grafische Darstellung der Statistik

Diese Buchstaben, welche die Signifikanz der paarweisen Vergleichen der Behandlungskategorien zusammenfassen, wurden oberhalb der Behandlungskategorien in den Ergebnis-Grafiken mit aufgenommen, um über die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Behandlungsgruppen unterschiedlicher Genotypen zu informieren. Zusätzlich wurde die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Behandlungsgruppen innerhalb der Genotypen mit Hilfe von Asterisken oberhalb der Behandlungskategorien in den Ergebnis-Grafiken mit aufgenommen.

5 Projektergebnisse

5.1 Ergebnisse der Versuche an der Moving Fields Anlage der LfL

Das Hauptziel der im Moving Fields Gewächshaus durchgeführten Serie von sieben Versuchen war die Phänotypisierung des Wurzelwachstums verschiedener Sommergersten-Genotypen. Dieses Ziel wurde erreicht: Die Versuchsserie wurde erfolgreich durchgeführt, nach Anfangsschwierigkeiten ist es gelungen das Wurzelwachstum im Bild zu fangen, die Wurzelbilder auszuwerten, die Daten bezüglich des Wurzelwachstum grafisch darzustellen und die Versuchsergebnisse mit den Versuchsfaktoren in bedeutsamer Verbindung zu stellen. Ebenso konnte das Wachstum der Sprosse erfolgreich phänotypisiert werden, so dass das Wurzelwachstum zusätzlich in Verbindung mit dem Wachsen der Sprossen gebracht werden konnte.

Die wichtigsten Ereignisse des Projektes sind in Abbildung 9 bis Abbildung 15 dargestellt. Jede dieser Abbildungen zeigt für einen der Versuche erstmalig für alle untersuchten Genotypen der Effekt der Behandlungen auf die Wachstumsdynamik der Wurzeln und der Sprosse.

Die Ergebnisse der Auswertung dieses Datensatzes sind vielversprechend. Zuerst: die Messungen des Wurzelwachstums sind sowohl intern konsistent (es gibt keine sehr große Schwankungen) als auch zwischen den Wiederholungen gut vergleichbar. Zunächst: Kleinstbestände bauen ihre Wurzelmasse im Laufe der Vegetationszeit nach anfänglichem Aufbau stets deutlich, jedoch Genotyp-spezifisch ab. Die Wurzelfläche wächst an allen Versuchen s-förmig bis zu einem Maximum, um sich danach s-förmig zu reduzieren, wodurch sich eine deutliche Optimum-Kurve zeigt. Obwohl das Grundmuster der Wurzelwachstumsdynamik zwischen den Versuchen stark vergleichbar ist, unterscheiden die Versuche sich im Ausmaß des Musters. Im Versuch 120 (siehe Abbildung 10) ist der Abbau fast vollständig, wodurch die Optimum-Kurve fast symmetrisch ist; im Versuch 127 dagegen (siehe Abbildung 14) ist der Abbau viel geringer. Was sonst auffällt: Einige der Behandlungen haben einen starken Effekt auf das Wurzelwachstum. So führte eine trockene Periode je früher sie in der Vegetationszeit stattfand zu einem desto stärkeren Abbau der Wurzelmasse. Die Behandlungseffekte sind qualitativ vergleichbar zwischen den Genotypen; quantitativ bilden sie aber große Unterschiede zwischen den Genotypen ab. Effekte auf das Wachstum der Sprosse waren weitgehend weniger ausgeprägt, konnten jedoch zu einigen der Wurzelmerkmale in Verbindung gebracht werden.

Die Projektergebnisse zeigen, dass Gerstenpflanzen allgemein, bei Mangel von Wasser oder Nährstoff, ihre Wurzeln eher reduzieren, als ausdehnen. Anhand der Projektergebnisse lässt sich bislang nicht ableiten, dass ältere Sorten grundsätzlich ein deutlich stärkeres Wurzelwachstum zeigen, als moderne, ertragreiche Sorten. Stattdessen hat sich ergeben, dass die neueren Sorten den älteren Sorten und Exoten bei der Betrachtung aller Merkmale in der Reaktion auf Stress überlegen zu sein scheinen. Dennoch zeigen einzelne ältere Sorten und exotische Akzessionen positive Einzelmerkmale, die züchterisch genutzt werden können, neue Sorten mit verbesserter Toleranz gegen Trockenstress zu entwickeln. Für die meisten der im Projekt untersuchten Merkmale konnte ein signifikanter Einfluss des Genotyps festgestellt werden.

5.1.1 Trockenstress während der Blattentwicklung

Der Effekt einer trockenen Periode während der Blattentwicklung wurde ausschließlich im Versuch 117 untersucht. In diesem Versuch führte eine trockene Periode während der Blattentwicklung für alle untersuchten Genotypen zu einer deutlichen Reduktion der Wurzelfläche. Das Ausmaß dieses Effektes war für alle Genotypen groß, für einige Genotypen jedoch größer als für andere. Kleinstbestände die einer trockenen Periode unterzogen wurden, erreichten eine maximale Wurzelfläche die sowohl niedriger als auch früher war als die maximale Wurzelfläche der Kleinstbestände aus der Kontrollgruppe. Diese Korrelation zwischen Höhe und Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche war ausschließlich Folge der trockenen Periode und weitgehend unabhängig von genotypischen und residualen Variation.

Die trockene Periode während der Blattentwicklung hatte einen ähnlich deutlichen Effekt auf die zeitliche Entwicklung der Sprossfläche: Für alle Genotypen war die Sprossfläche am Ende der trockenen Periode signifikant niedriger als die Sprossfläche der Kleinstbestände die beim Bestocken keiner trockenen Periode unterzogen wurden. Das Ausmaß dieser Reduzierung war Genotyp-spezifisch. In der Regel jedoch war die Reduktion der maximalen Sprossfläche größer für die Genotypen die in der Kontrollgruppe eine hohe maximale Sprossfläche erreichten.

Wegen der starken Effekte der trockenen Periode, waren die Sprossfläche und die Wurzelfläche am Ende dieser Periode stark positiv korreliert: Kleinstbestände mit einer kleineren (größeren) Wurzelfläche hatten in der Regel eine kleinere (größere) Sprossfläche. Keiner dieser Effekte wurde maßgeblich von der Stickstoffdüngungsmenge beeinflusst.

5.1.2 Trockenstress während der Bestockung

Der Effekt einer trockenen Periode während der Bestockung wurde sowohl im Versuch 125 als auch im Versuch 128 untersucht. In beiden Versuchen führte eine trockene Periode während der Bestockung bei allen untersuchten Genotypen zu einer stärkeren Reduktion der Wurzel- und der Sprossfläche als in den Kontrollbehandlungen wahrgenommen wurde, wobei die Reduktion der Wurzelfläche im Vergleich zu der maximalen Wurzelfläche stärker war als die Reduktion der Sprossfläche im Vergleich zu der maximalen Sprossfläche. Am Ende der trockenen Periode war die Wurzelfläche positiv mit der Sprossfläche korreliert. Diese Korrelation war ausschließlich Folge der Behandlung. Unterschiede zwischen den Genotypen wirkten dieser Korrelation ein wenig entgegen.

Eine trockene Periode während der Bestockung führte bei einigen der untersuchten Genotypen zu einer signifikant niedrigeren maximalen Wurzelfläche als in der Kontrollgruppe und bei allen untersuchten Genotypen zu einem früheren Erreichen der maximalen Wurzelfläche, wobei das Ausmaß der Verfrühung stark Genotyp-spezifisch war. Auch der Effekt einer trockenen Periode während der Bestockung auf die maximale Sprossfläche war stark Genotyp-spezifisch: Die meisten aber nicht allen Genotypen im Versuch 128 erreichten eine maximale Sprossfläche die signifikant niedriger und signifikant später war als die der Kontrollgruppe, wobei die Höhe der maximalen Sprossfläche nur schwach mit dem Zeitpunkt davon korrelierte. Die Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode korrelierte besonders stark und positiv mit der Sprossfläche am Ende der trockenen Periode: Die Kleinstbestände die am Ende der trockenen Periode eine kleine (große) Wurzelfläche hatten, hatten meistens auch eine kleine (große) Sprossfläche.

Der Effekt der Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge war abhängig von der Bewässerung. Bei optimaler Bewässerung führte die Stickstoffreduktion für fast alle Genotypen nicht zu einer signifikanten Änderung der Höhe der maximalen Wurzelfläche, wurde die maximale Wurzelfläche jedoch schon früher erreicht. Bei reduzierter Bewässerung erreichten 4 Genotypen eine signifikant höhere maximale Wurzelfläche wenn Stickstoff-unterversorgt als wenn optimal mit Stickstoff versorgt, hatte die Stickstoffreduktion jedoch keinen Effekt auf den Zeitpunkt des Erreichens dieser maximalen Wurzelfläche. Anders als auf der Wurzelfläche führte die Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge bei optimaler Bewässerung zu einer deutlichen Reduktion der Sprossfläche. Die trockene Periode während der Bestockung führte bei den Stickstoff-unterversorgten Kleinstbeständen für alle Genotypen zu einer weiteren Reduktion der Sprossfläche. Diese Reduktion war jedoch bedeutend geringer als die Reduktion der Sprossfläche bei Kleinstbeständen die optimal mit Stickstoff-versorgt waren. Die Korrelation zwischen der Sprossfläche und der Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode war bei den Stickstoff-unterversorgten Kleinstbeständen zwar auch positiv, jedoch bedeutend schwächer als diese Korrelation bei den Kleinstbeständen die optimal mit Stickstoff versorgt waren. Auch bei den Stickstoff-unterversorgten Kleinstbeständen war die positive Korrelation ausschließlich Folge der Behandlung. Unterschiede zwischen den Genotypen wirkten dieser Korrelation ein wenig entgegen.

5.1.3 Trockenstress während des Ährenschiebens

Der Effekt einer trockenen Periode während des Ährenschiebens wurde in den Versuchen 121, 124, 127, 128 untersucht. In diesen Versuchen führte eine trockene Periode während des Ährenschiebens bei alle untersuchten Genotypen zu einer stärkeren Reduktion der Wurzel- als in den Kontrollbehandlungen wahrgenommen wurde. Diese Beschleunigung trat weitgehend unabhängig von der Stickstoffversorgung auf, war im Ausmaß jedoch Genotyp-spezifisch.

Der Effekt der trockenen Periode während des Ährenschiebens auf die Sprossfläche am Ende der trockenen Periode variierte zwischen den Versuchen. Im Versuch 124 war die Sprossfläche vieler Genotypen von der trockenen Periode unbeeinflusst, während sie bei einigen Genotypen signifikant reduziert wurde. Im Versuch 127 hatte die trockene Periode während des Ährenschiebens kaum einen Effekt auf die Sprossfläche der Kleinstbestände. In den Versuchen 128 und 121 führte die trockene Periode bei den meisten der untersuchten Genotypen zu einer Verringerung der Sprossfläche der Kleinstbestände.

Auch der Effekt der trockenen Periode während des Ährenschiebens auf die maximale Sprossfläche, die erreicht wurde, variierte zwischen den Versuchen. In den Versuchen 124, 127 und 128 war die Höhe der maximalen Sprossfläche kaum von der trockenen Periode während des Ährenschiebens beeinflusst. Im Versuch 121 führte die trockene Periode während des Ährenschiebens bei etwa der Hälfte der untersuchten Genotypen dazu, dass eine geringere maximale Sprossfläche erreicht wurde. Der Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Sprossfläche wurde in den Versuchen 124 und 127 kaum von der trockenen Periode beeinflusst. Im Versuch 128 führte die trockene Periode während des Ährenschiebens bei einigen der Genotypen zu einer Verfrüfung des Erreichens der maximalen Sprossfläche; im Versuch 128 war dies für fast alle Genotypen den Fall.

In der Regel korrelierte die Höhe der maximalen Sprossfläche positiv mit dem Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Sprossfläche: Die Kleinstbestände, die früher (später) ihre maximale Sprossfläche erreichen, erreichen in der Regel eine niedrigere (höhere) maximale Sprossfläche. Das Ausmaß dieser Korrelation variierte jedoch zwischen den Versuchen.

Im Versuch 124 war die positive Korrelation zwischen der Höhe und dem Zeitpunkt der maximalen Sprossfläche relativ schwach ($r_{\text{Pearson}}: 0.49$), auch nach Korrektur für die Variation die den Genotypen zugeschrieben werden konnte ($r_{\text{Pearson}}: 0.39$). Im Versuch 127 war die Korrelation stärker ($r_{\text{Pearson}}: 0.61$), insbesondere nach Korrektur für die Variation die den Genotypen zugeschrieben werden konnte ($r_{\text{Pearson}}: 0.78$). Das Ausmaß dieser Korrelation war jedoch hauptsächlich Folge der Variation die von der Stickstoffbehandlung erzeugt wurde; nach Korrektur für die Variation die den Behandlungen zugeschrieben werden konnte war die Korrelation zwar auch positiv, jedoch viel schwächer ($r_{\text{Pearson}}: 0.45$). Im Versuch 128 waren die Höhe und der Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Sprossfläche relativ stark korreliert ($r_{\text{Pearson}}: 0.64$). Korrektur für die Variation die den Genotypen zugeschrieben werden konnte schwächte diese Korrelation ($r_{\text{Pearson}}: 0.41$). Im Versuch 121 korrelierte die Höhe der maximalen Sprossfläche über den Genotypen und Behandlungen hinweg nur minimal mit dem Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Sprossfläche ($r_{\text{Pearson}}: 0.13$). Korrigiert für die Variation in diesen beiden Merkmalen, die den Genotypen zugeschrieben werden kann, war die Korrelation ziemlich stark positiv ($r_{\text{Pearson}}: 0.73$).

Die Sprossfläche und die Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode während des Ährenschiebens waren in den Versuchen 124 und 127 kaum korreliert. In den Versuchen 128 und 121 dagegen waren diese beiden Merkmale stark positiv korreliert, insbesondere wenn für Variation die den Genotypen zugeschrieben werden konnte korrigiert wurde. Hauptsächlich wegen der trockenen Periode während des Ährenschiebens hatten Kleinstbestände mit einer kleineren (größeren) relativen Wurzelfläche in der Regel eine kleinere (größere) relative Sprossfläche.

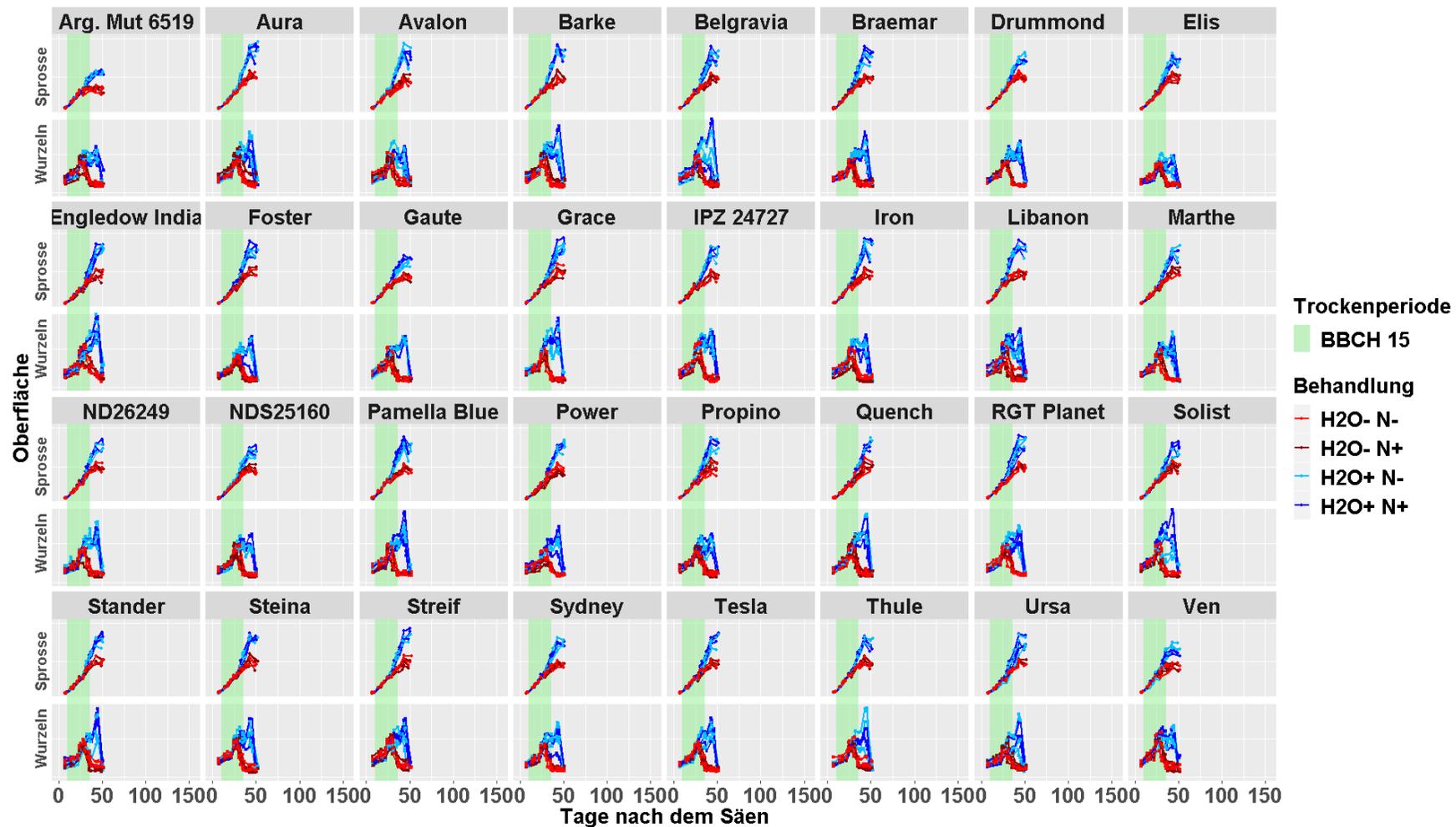


Abbildung 9 Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 117. Für je der 32 Sorten (Felder) ist der zeitliche Verlauf der Bildfläche der Sprosse (obere Hälfte der Felder) und der Wurzeln (untere Hälfte der Felder) für die 3 Wiederholungen in je der 4 Behandlungskategorien (Farben) dargestellt. Die 4 Behandlungskategorien stellen sich als Kreuzung zweier Behandlungen zusammen; „H2O-“: eine trockene Periode während der Blattentwicklung [vom Tag 10 bis Tag 36; um BBCH 15], „H2O+“: keine trockene Periode, „N-“: eine Reduzierung der Stickstoffdüngungsmenge bis auf 50 % der „N+“ Kategorie, „N+“: die konventionell gedüngten Stickstoffdüngungsmenge.

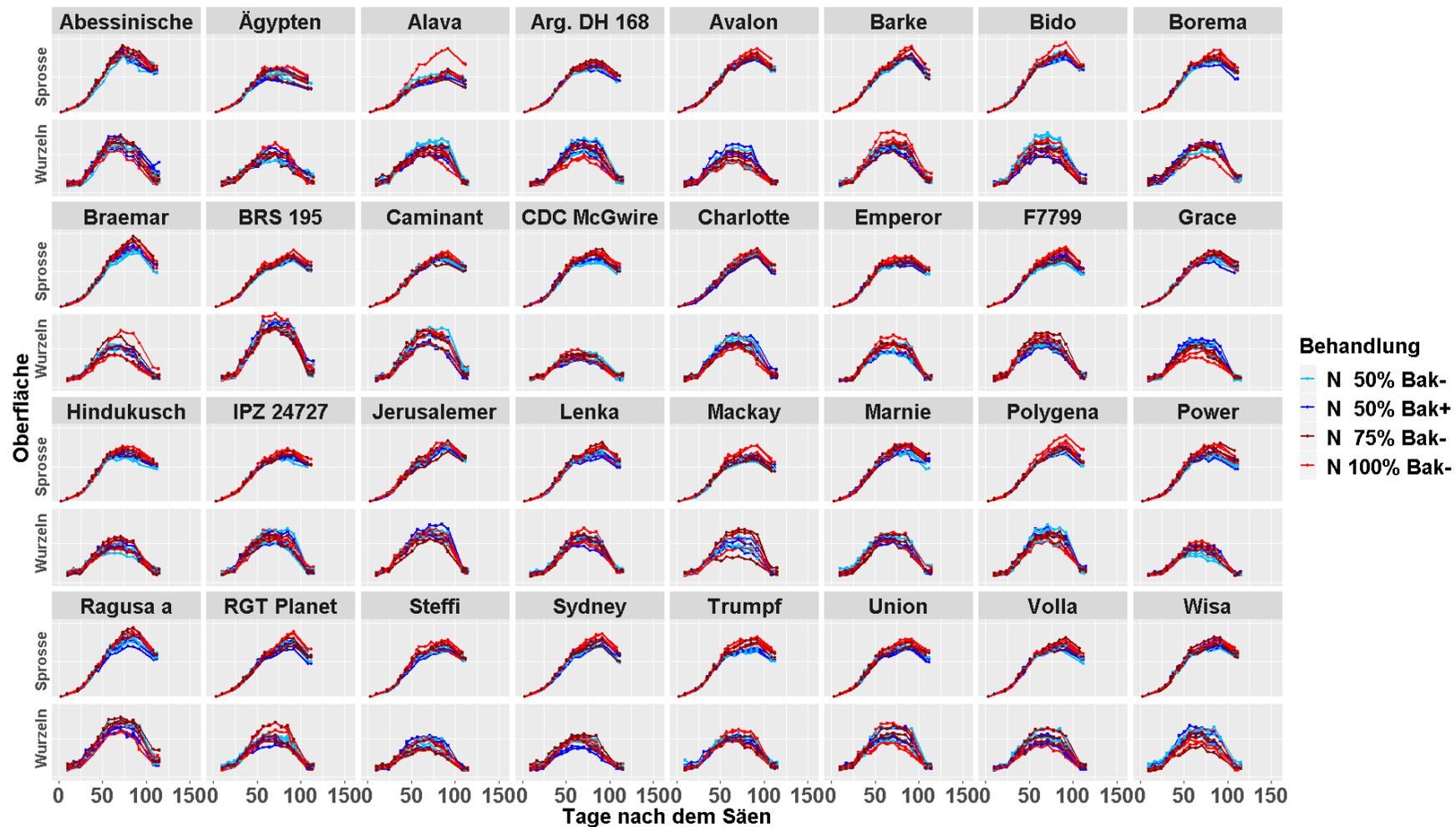


Abbildung 10 Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 120. Aufbau der Abbildung wie beschrieben in der Abbildung 9. Die 4 Behandlungskategorien stellen sich als inkomplette Kreuzung der Behandlungen zusammen; ‚N 100%‘, ‚N 75%‘ und ‚N 50%‘: Stickstoffdüngungsmenge 100 %, 75 % und 50% der konventionellen Düngungsmenge, ‚Bak-‘: keine Behandlung mit Bakterien, ‚Bak+‘: Behandlung mit Bakterien.

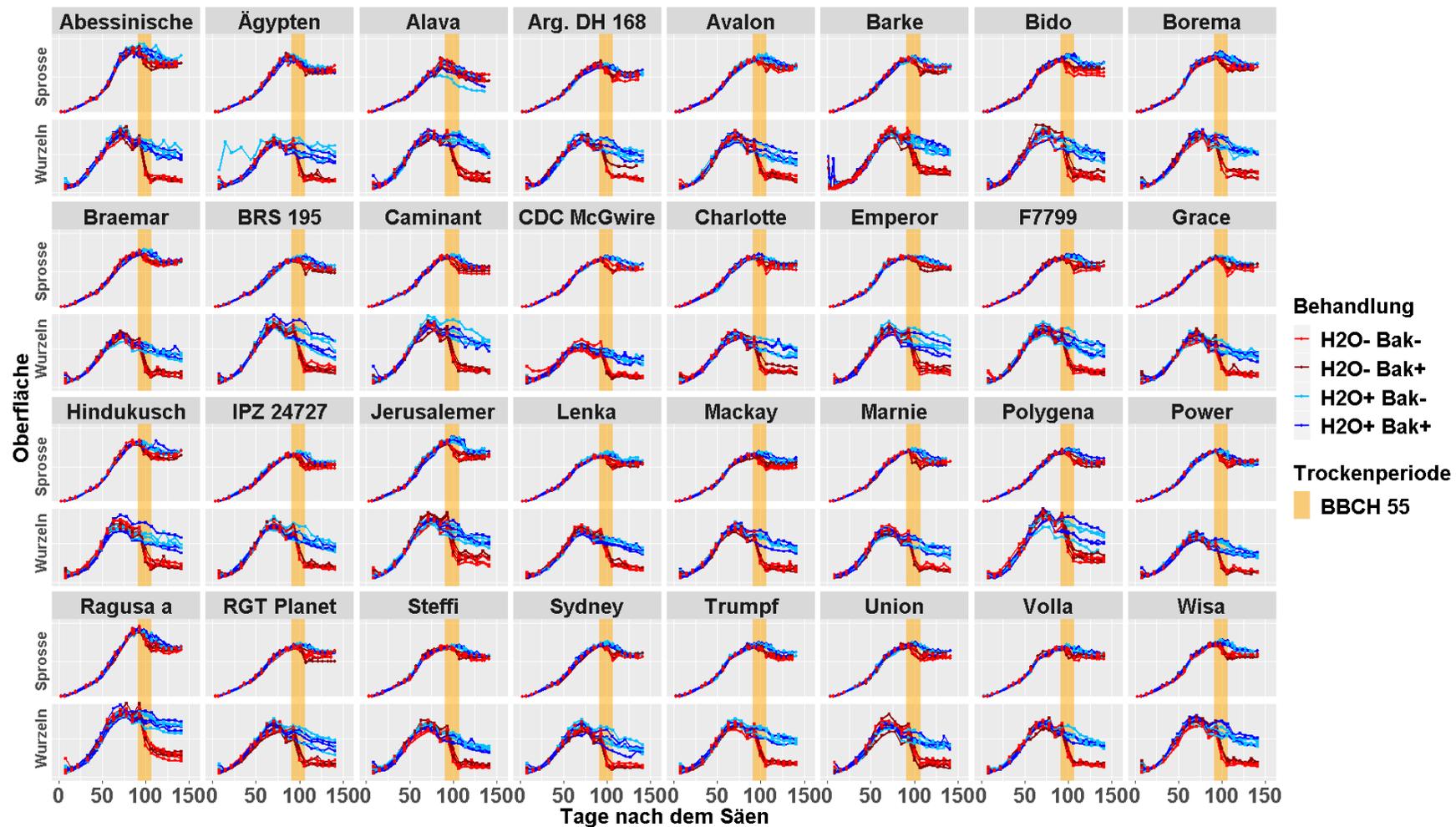


Abbildung 11 Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 121. (Aufbau der Abbildung, wie beschrieben in der Abbildung 9. Die 4 Behandlungskategorien stellen sich als Kreuzung zweier Behandlungen zusammen; ‚H₂O-‘: eine trockene Periode während des Ährenschiebens [vom Tag 90 bis Tag 106; um BBCH 55], ‚H₂O+‘: keine trockene Periode, ‚Bak-‘: keine Behandlung mit Bakterien, ‚Bak+‘: Behandlung mit Bakterien.

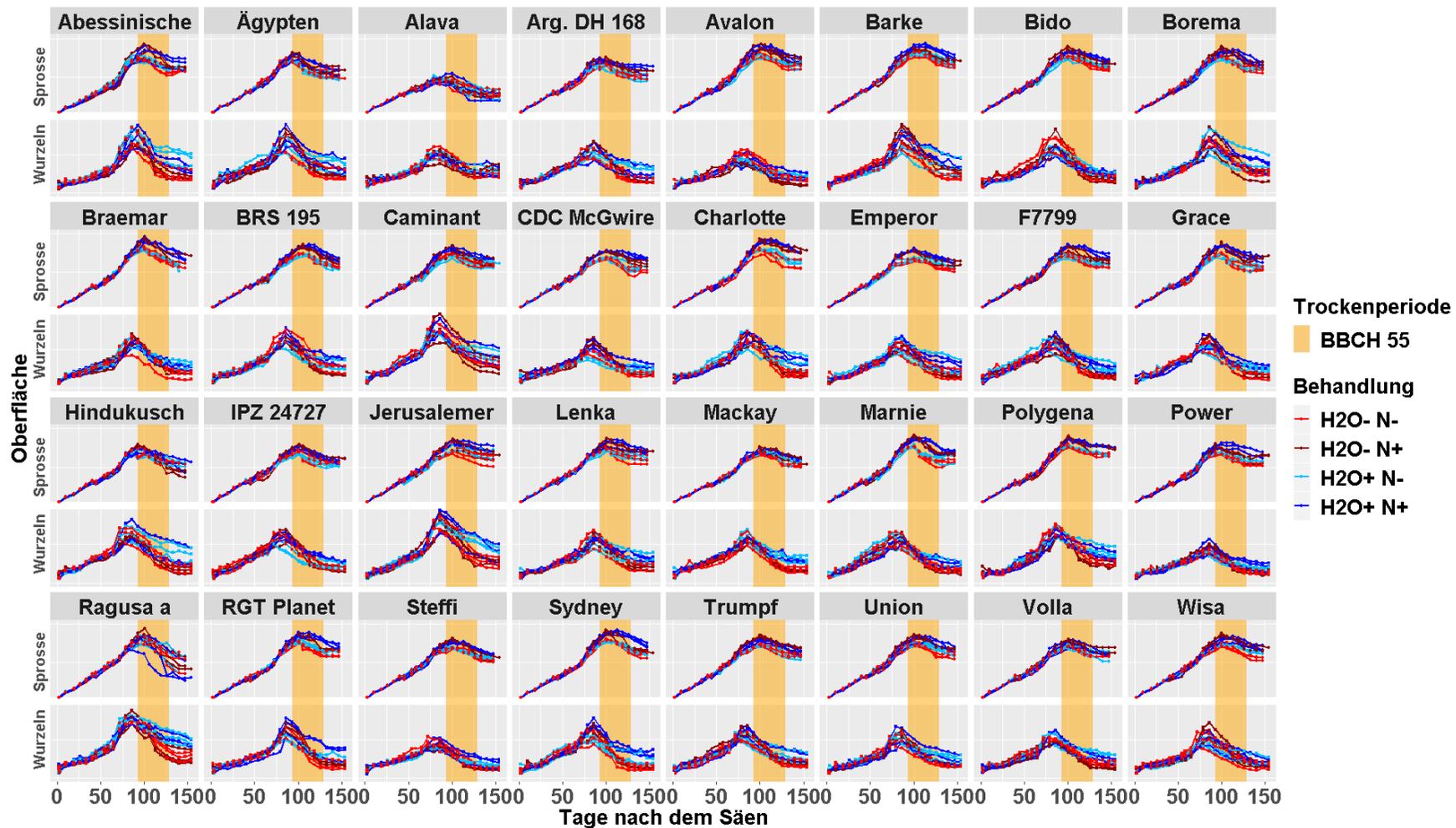


Abbildung 12 Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 124. Aufbau der Abbildung wie beschrieben in der Abbildung 9. Die 4 Behandlungskategorien stellen sich als Kreuzung zweier Behandlungen zusammen; ‚H2O-‘: eine trockene Periode während des Ährenschiebens [vom Tag 93 bis Tag 129; um BBCH 55], ‚H2O+‘: keine trockene Periode, ‚N-‘: eine Reduzierung der Stickstoffdüngungsmenge bis auf 50 % der ‚N+‘ Kategorie, ‚N+‘: die konventionell gedüngten Stickstoffdüngungsmenge.

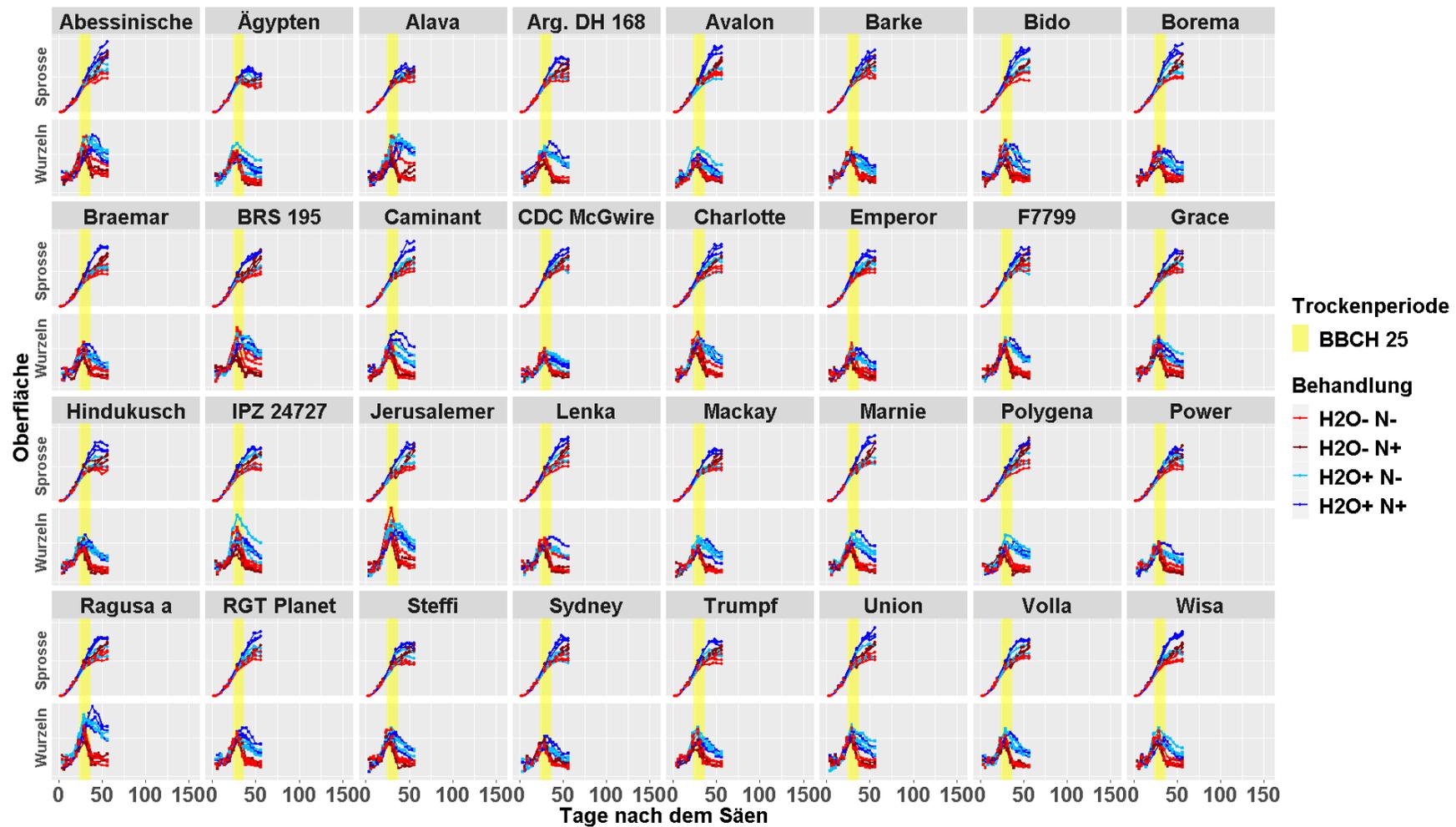


Abbildung 13 Die Wachstumsdynamik der Sprosse und Wurzeln im Versuch 125. Aufbau der Abbildung und Interpretation der Behandlungskategorien wie beschrieben in der Abbildung 9.

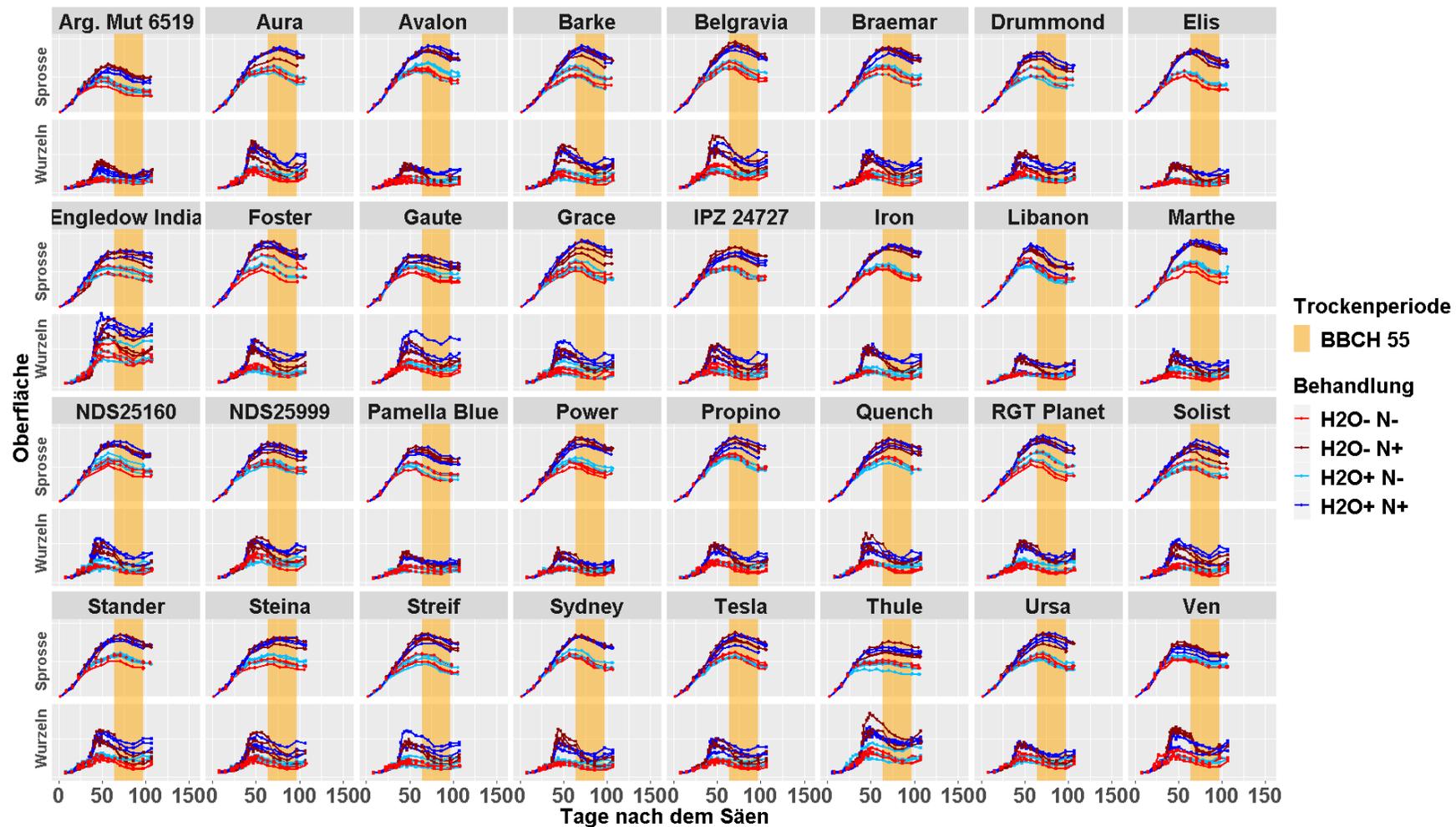


Abbildung 14 Die Wachstumskurve der Sprosse und Wurzeln im Versuch 127. Aufbau der Abbildung, wie beschrieben in der Abbildung 9. Die 4 Behandlungskategorien stellen sich als Kreuzung zweier Behandlungen der beiden Versuchsfaktoren zusammen; „H₂O-“: eine trockene Periode während des Ährenschiebens [vom Tag 64 bis Tag 97; um BBCH 55], „H₂O+“: keine trockene Periode, „N-“: eine Reduzierung der Stickstoffdüngungsmenge bis auf 50 % der „N+“ Kategorie, „N+“: die konventionell gedüngten Stickstoffdüngungsmenge.

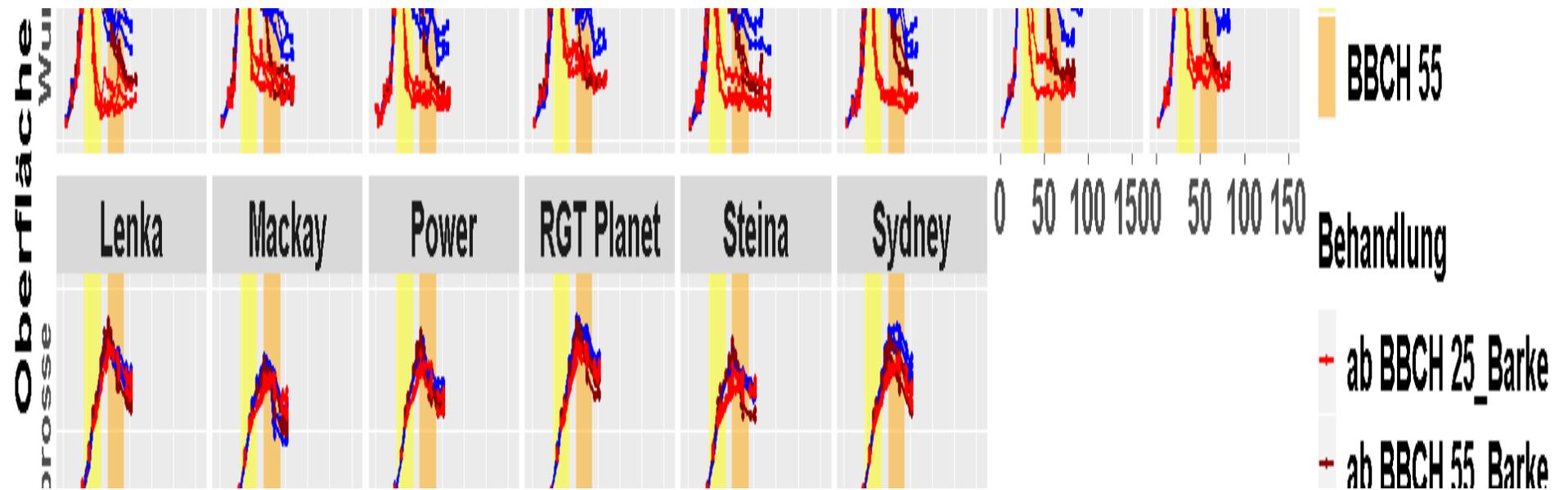


Abbildung 15 Die Wachstumsgeschichte der Sprosse und Wurzeln im Versuch 128. Aufbau der Abbildung, wie beschrieben in der Abbildung 9. Die 3 Behandlungskategorien stellen sich wie folgt zusammen; ‚ab BBCH 25_Banke‘: eine trockene Periode während der Bestockung [vom Tag 24 bis Tag 43; um BBCH 25], ‚ab BBCH 55_Banke‘: eine trockene Periode während des Ährenschiebens [vom Tag 50 bis Tag 69; um BBCH 55], ‚kein Trockenstress‘: keine trockene Periode.

5.2 Quantifizierung der Menge Wurzel-DNA in Böden

Im Laufe des Projektes wurde versucht eine Methode zu etablieren, um mittels Labortechniken die Menge Wurzeln in Bodenproben zu bestimmen, um die Messungen aus der Moving Fields Anlage kalibrieren zu können. Die zu etablierende Methode besteht aus vier wichtigen Schritten: 1) die Probenahme, 2) die Homogenisierung der Proben, 3) das Extrahieren von DNS aus der Proben und 4) das Quantifizieren der isolierten DNS.

Bodenproben sind oft von einer Größe, die im Labor nicht bearbeitet werden kann. Um Bodenproben für die Arbeit im Labor geeignet zu machen, wurde ein Verfahren entwickelt, wobei darauf geachtet wurde, dass der Abbau vom DNS minimalisiert gleichzeitig wurde Erfahrung mit dem Homogenisieren der Bodenproben gesammelt.

Die Extraktion der Wurzel-DNS wurde zuerst mit einer klassischen Methode (basiert auf Chloroform-Isoamyl Alkohol) versucht. Diese Extraktionsmethode hat sich dabei als ungeeignet ausgestellt. Daraufhin wurde ein kommerzielles Kit („Stratec“) eingesetzt. Mit Hilfe dieses Kits konnte erfolgreich DNS aus reinen Wurzeln isoliert werden. Um die Menge der isolierten DNS einer Probe zu quantifizieren wurde die qPCR (quantitative polymerase-chain-reaction) Technik mit Hilfe eines unspezifischen Primers eingesetzt. Die Menge DNS in reinen Wurzelproben konnte so erfolgreich quantifiziert werden.

Angewendet auf Proben, die aus einer Mischung von Boden und Wurzeln zusammengesetzt waren, stellte die Extraktionseffizienz des Stratec Kits sich, trotz mehrerer Versuche, das Extraktionsprotokoll dieser Kit zu optimieren, als nicht stabil heraus. Da auch die Kapazität des Kits sich als um ein Vielfaches zu gering für die Anwendung an Boden-Proben herausstellte, wurde dieses Kit für ungeeignet befunden. Daraufhin wurde Erfahrung mit alternativen DNS-Extraktion-Kits gesammelt. Auch wurde versucht anhand von ITS-Sequenzen (internal transcribed spacer sequences) einen neuen Gerstespezifischen Primer zu entwickeln, um die Quantifizierung von DNS aus Boden-Wurzel Proben zu ermöglichen. Erste Ergebnisse zeigten, dass die mit den selbst entwickelten Primern ITS2 Standardkurven im Vergleich mit GAPDH eine deutlich bessere Reproduzierbarkeit aufwiesen. Zwei der getesteten Kits – das ‚FastDNA Spin Kit for Soil‘ von der Firma MP Biomedicals und das ‚InnuPREP Plant DNA Kit‘ von der Firma Analytik Jena – zeigten beste und maximale Quantifizierung der Gerste-Wurzel DNS aus Proben, zusammengesetzt aus einer Mischung von Gerstenwurzeln und Boden. Vorteile des FastDNA-Kits im Vergleich zum InnuPREP-Kit sind eine höhere Effizienz in der Quantifizierung der Menge Wurzel-DNS, sowie eine höhere Extraktionskapazität bei Proben mit einem größeren Volumen (bis 500 mg).

Diese beiden letztgenannten Verfahren konnten leider innerhalb der Laufzeit vom Projekt nicht vollständig abgeschlossen werden. Der hohe Aufwand für die Analysen zeigt, dass sich die Methode der Bestimmung von Wurzelmasse aus dem Boden über qPCR (noch) nicht für die routinemäßige Untersuchung großer Probenzahlen in der Pflanzenzüchtung eignet. Methoden und Ergebnisse sind bei IPZ 2b dokumentiert und bilden somit eine solide Basis für Weiterentwicklung von Nachfolgeprojekten.

Tabelle 3 Zusammenfassung der Testergebnisse der fünf am besten geeigneten DNS-Extraktion-Kits. ¹

DNS-Extraktion-Kit	Firma	Maximales Probenvolumen (mg)	Preis pro Probe (€)	Gerstenwurzel (mg) pro 10 g Boden	Extraktion-Effizienz	Reinheit & Qualität	Stabilität	Zeitlicher Aufwand	Verdünnungs-Faktor
FastDNA Spin Kit for Soil	MP Biomedicals	250-500	390	50	++++	+++	++	++++	10 ⁻³
FastDNA Spin Kit for Plant and Animals Tissues	MP Biomedicals	100-300	433	100	+++	+++	++	+++	10 ⁻²
DNeasy PowerPlant Pro Kit	Qiagen	50-100	242	50	++	++++	nicht untersucht	+	10 ⁻²
InnuPREP Plant DNA Kit	Analytik Jena	100	143-	50-	+++	++	+++	++	10 ⁻²
			566	250					
HigherPurity Soil	Canvax Biotech	250-1000	56-	20-	++	++	++	++	10 ⁻² - 10 ⁻³
			179	100					

¹ Angegeben ist für je der fünf am besten geeigneten DNS-Extraktion-Kits (neben der Hersteller): 1) das maximale Volumen pro Probe, das von dem jeweiligen Kit untersucht werden kann, 2) der Preis pro Probe, 3) die Menge Gerstenwurzel pro 10 g Bodenprobe wofür das jeweiligen Kit am besten funktioniert hat, 4) die (relative) Effizienz der DNS-Extraktion, 5) die Reinheit und Qualität der extrahierten DNS, 6) die Stabilität der DNS-Extraktion, 7) der zeitliche Aufwand der DNS-Extraktion und 8) die qPCR-Verdünnungsfaktor, die zum besten Ergebnis geführt hat.

5.3 Ergebnisse der Versuche im Rollgewächshaus der LfL

Bodenproben aus den beiden Rollgewächshausversuchen wurden bei der Entwicklung der zu etablierenden Methode zur Quantifizierung von der Menge Wurzel-DNS in Bodenproben vereinzelt eingesetzt.

Das Ziel, anhand dieser beiden Versuche der Effekt von Trockenstress auf die Wurzelmasse unter annähernd natürlichen Bedingungen festzustellen, konnte nicht erreicht werden. Grund dafür ist, dass bei der Entwicklung dieser Methode im Laufe des Projektes zwar wichtige Fortschritte gemacht wurden, diese Methode jedoch nicht für Einsatz mit großen Anzahlen von Bodenproben operational gemacht werden konnte.

Obwohl nicht spezifisch dafür durchgeführt, eignen sich die beiden Rollgewächshaus-Versuche einwandfrei, um der Effekt von Trockenstress auf das Erntegut unter annähernd natürlichen Bedingungen festzustellen. Tatsächlich wurde im Laufe des Projekts Programmiercode entwickelt, um für jedes der verschiedenen agronomisch-bedeutsamen Merkmale aus den beiden Rollgewächshausversuchen, den sortenspezifischen Effekt vom Trockenstress zu bestimmen und grafisch darzustellen. Dabei wurden sowohl im Rollgewächshaus (interne Kontrolle versus interne Behandlung) als auch im freien Feld (externe Kontrolle versus externe Behandlung) große Effekte von Trockenstress gefunden (für ein Beispiel, siehe Abbildung 16). Diese Effekte waren in starkem Maß Genotyp-spezifisch und die Versuchsergebnisse bieten somit einen interessanten Ansatz für die Züchtung von Sorten mit verbesserter Resistenz gegen Trockenstress.

Zusätzlich zu einer Analyse der Einzelmerkmale bezüglich der Sprosse und des Ernteguts, wurden die Daten aus den beiden Rollgewächshausversuchen eingesetzt bei der Entwicklung eines Indexes, der eine große Zahl der beschreibenden Merkmale zusammenfasst, um anhand der Versuchsergebnisse eine schnelle Einschätzung der sortenspezifischen Wassereffizienz zu ermöglichen. Spezifisch wurden fünf Indizes entwickelt, die alle auf einer mathematisch unterschiedlichen Art und Weise die Messwerte der verschiedenen Merkmale kodieren und damit quantitativ vergleichbar machen. Die Kodierung basiert entweder auf dem absolute Abstand zum Median-Messwert, auf den relative Abstand zum Median-Messwert (an Hand der statistische Verteilung der Messwerte), auf die Rangordnung der Messwerte innerhalb einer Behandlung, auf die Rangordnung der Messwerte über die verschiedenen Behandlungen oder auf die Verteilung der Messwerte relativ zum Median und Standardabweichung der Messwerte. Die fünf Indizes wurden erfolgreich eingesetzt, um die sortenspezifische Wassereffizienz der angebauten Sorten einzuschätzen. Bevor einer dieser Indizes für Anwendung in der Praxis freigegeben werden kann, soll das Verhalten der fünf Indizes in einem Nachfolgeprojekt im Detail untersucht und verglichen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht generell, so wie in der Praxis oft angenommen, ältere Sorten oder Exoten eine bessere Stresstoleranz aufweisen. Ohne auf die Leistung einzelner Sorten einzugehen, zeigt sich der Trend, dass die neueren Sorten bei der Betrachtung aller Merkmale in der Reaktion auf Stress den älteren Sorten und Exoten überlegen zu sein scheinen. Dennoch zeigen einzelne ältere Sorten und exotische Akzessionen positive Einzelmerkmale, die züchterisch genutzt werden könne, neue Sorten mit verbesserter Toleranz gegen Trockenstress zu entwickeln.

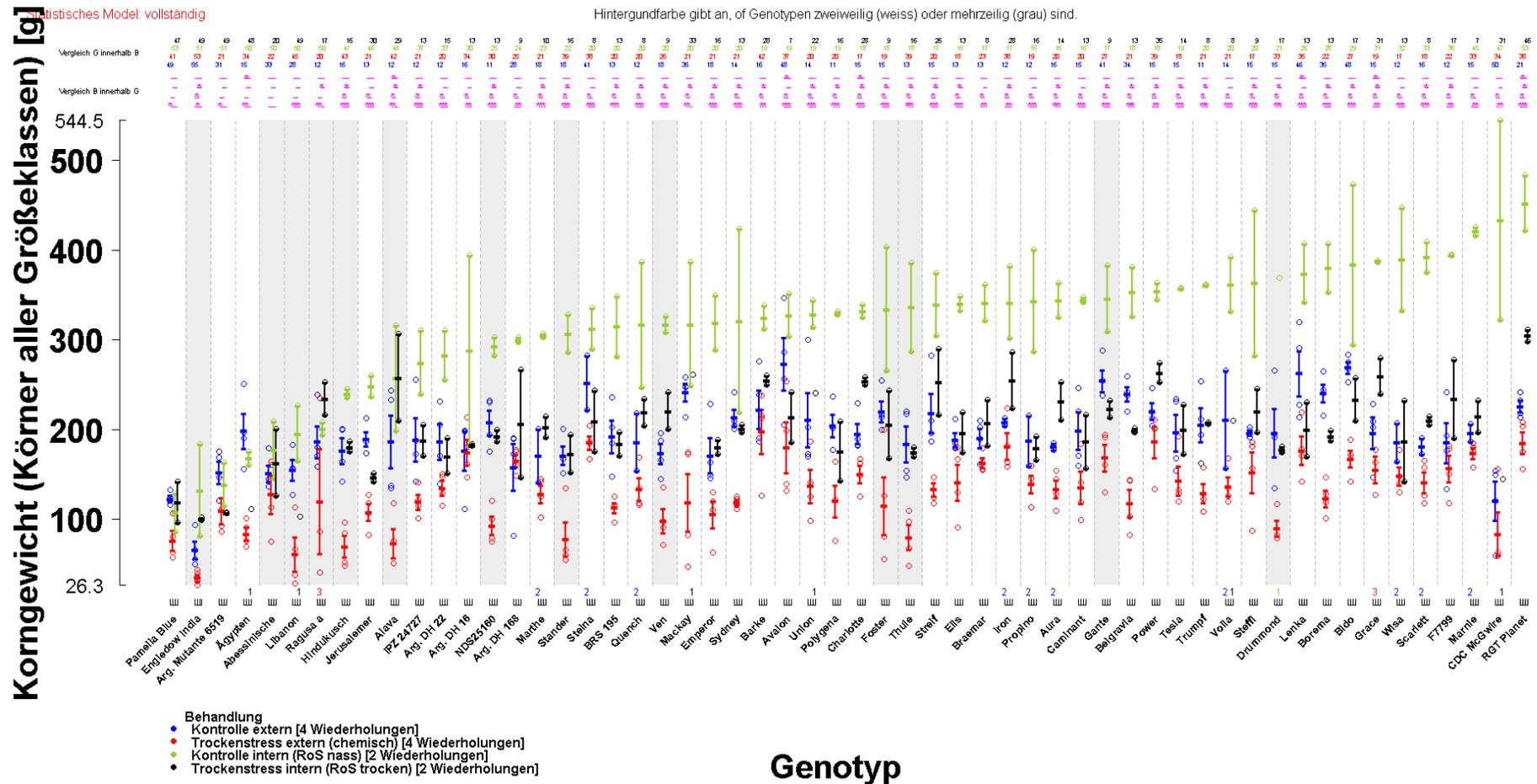


Abbildung 16 Korngewicht im Rollgewächshausversuch 122. Die Rohdaten sind als offene Symbole den 4 Trockenstress-Behandlungen (unterscheidbar anhand der Farben) und den 56 Genotypen (x-Achse) zugeordnet. Mittelwerte pro Kombination aus Genotyp und Behandlung sind als geschlossene Symbole zusammen mit deren Standardfehler (Fehlerbalken) dargestellt. Oberhalb der Grafik ist die Statistik zusammengefasst. Die violetten Sternchen geben pro Behandlungspaar (verbunden durch eine violette Linie) an, dass der Unterschied statistisch signifikant ist. Die Zahlen in den Behandlungsfarben geben pro Genotyp und Behandlungskategorie an, wieviel Genotypen sich innerhalb dieser Kategorie statistisch signifikant vom diesem Genotyp unterscheiden.

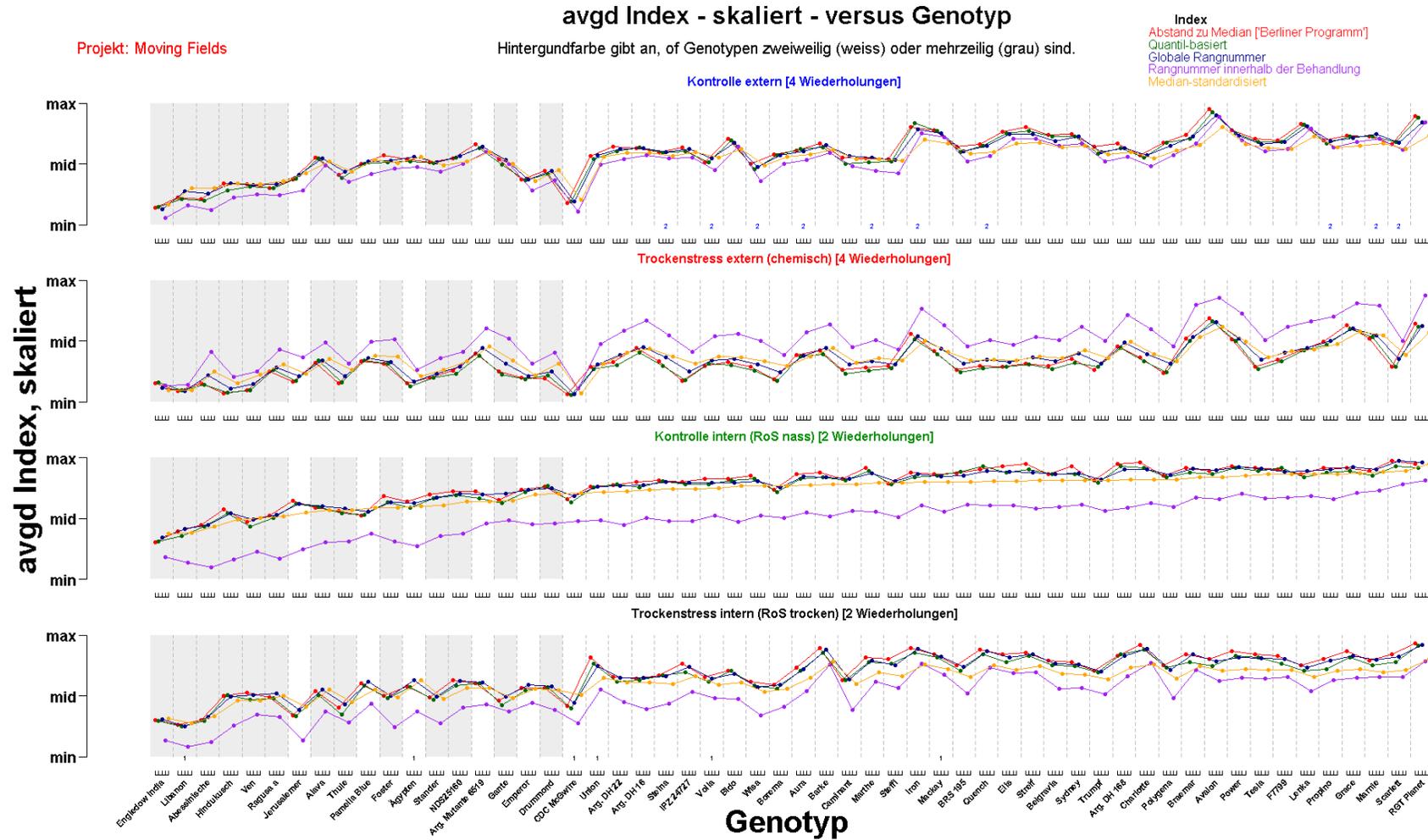


Abbildung 17 Vergleich der neu-entwickelten Trockenstress-Indizes. Punkte verbinden den Wert verschiedener Indizes (Farbe) mit den in Versuch 122 im Rollgewächshaus untersuchten Genotypen für je der 4 Behandlungen (Zeilen). Das Verhalten dreier Indizes (Abstand zu Median, Quantil-basiert und Globale Rangnummer) ist weitgehend vergleichbar: Die beiden anderen Indizes unterscheiden sich quantitativ in kleinere (Rangnummer innerhalb der Behandlung) oder größere (Median-Standardisiert) Maße.

5.4 Kreuzungsarbeiten

Um die genetischen Grundlagen zu validieren und unmittelbar am Praxisbedarf orientiertes Zuchtmaterial zu erstellen, wurden anhand der ersten Ergebnisse im Jahr 2016 drei Genotypen mit jeweils drei aktuellen Hochleistungssorten verkreuzt. Erste Ergebnisse aus diesen Kreuzungen werden 2021 erwartet. Nach Abschluss der Auswertung aller Daten werden weitere Kreuzungen mit interessanten Kandidaten aus dem Sortiment durchgeführt.

6 Diskussion

Als großer Erfolg des Projektes ist zu werten, dass die Wachstumsdynamik von Wurzeln und Sprossen erstmalig im Bild erfasst, quantifiziert, grafisch dargestellt und in Genotyp-spezifischen Zusammenhang mit der Nährstoff- und Wassereffizienz gebracht werden konnten. Damit ist eine Grundlage für die Anwendung der Kenntnis über das Wachstum der Wurzeln und das Wachstum der Sprosse in der Züchtungsforschung geschaffen.

Die Projektergebnisse zeigen, dass Gerstenpflanzen allgemein, bei Mangel von Wasser oder Nährstoff, ihre Wurzeln eher reduzieren, als ausdehnen. Dies widerspricht bisherigen Annahmen, nach denen die Pflanzen mit einer Ausweitung des Wurzelsystems Nährstoffe und Wasser „suchen“. Weiterhin hat sich ergeben, dass die neueren Sorten den älteren Sorten und Exoten bei der Betrachtung aller Merkmale in der Reaktion auf Stress überlegen zu sein scheinen. Dennoch zeigen einzelne ältere Sorten und exotische Akzessionen positive Einzelmerkmale, die züchterisch genutzt werden können. Für die meisten der im Projekt untersuchten Merkmale konnte ein signifikanter Einfluss des Genotyps festgestellt werden. Dies ist die wichtigste Grundlage für die züchterische Bearbeitung dieser Merkmale und ermöglicht damit die Entwicklung effizienter und stresstoleranter Sorten.

Einen offensichtlichen, nächsten Schritt zu diesem Zweck stellt die Verbindung der umfangreichen, phänotypischen Daten aus den Versuchen an der Moving Fields Anlage und im Rollgewächshaus dar. Besonders interessant ist die Assoziation dieser Merkmale mit genetischen Markern, insbesondere, da auch die genetischen Daten im Haus zur Verfügung stehen: das Sortiment wurde schon im Jahr 2014 komplett mit einer Hochdurchsatzmethode für molekulargenetische Marker (iSelect Chip) untersucht, was pro Genotyp 9000 Marker-Datenpunkte lieferte. Diese umfassende Datenbasis reicht für eine erste Assoziationsstudie mehr als aus, und es wird angestrebt, eine solche Studie umzusetzen, sobald die Kapazität in der Arbeitsgruppe das erlaubt.

Auch die Weiterführung der Labortechniken zur Bestimmung der Menge Wurzel-DNS in Böden bleibt äußerst relevant, da sie das Potenzial hat, sowohl die Messungen aus der Moving Fields Anlage zu bestätigen, als auch die Wurzelmessungen im Freiland zu ermöglichen. Im Laufe der Projektzeit konnte die Methodik dafür nicht vollständig etabliert werden. Die Projektergebnisse bieten jedoch eine solide Basis für Weiterentwicklung in Nachfolgeprojekten. Am ehesten steht dabei an, eine DNS-Extraktion-Methode zu etablieren, die auch bei niedriger Konzentration von Wurzel-DNS in Bodenproben Variation in dieser Konzentration detektieren lässt.

Möglichkeiten zur Erweiterung der Datenanalyse gibt es verschiedene. Als logischer Folgeschritt kann versucht werden, die Daten der unterschiedlichen Versuche auch quantitativ mit einander in Verbindung zu bringen: Anhand der Messwerte an den acht Referenzsorten die in alle Versuche dabei waren können pauschale Unterschiede zwischen den Versuchen verrechnet werden. Weiterhin können die Wachstumsdaten in direkter, quantitativer Verbindung mit den Ernte-Merkmalen gebracht werden und es können Effekte vom Trockenstress und Stickstoffmangel auf unterschiedliche Merkmale in einer multivariaten Analyse zusammen gebracht werden.

Alle gesammelten Kenntnisse über die untersuchten Genotypen stehen öffentlichen und privaten Pflanzenzüchtern zur Verfügung und bieten wertvolle Informationen für die Gestaltung zukunftsorientierter Zuchtprogramme. Die Daten, die im Projekt generiert wurden, können auch später noch eventuell mit anderen Methoden und unter anderen Aspekten ausgewertet werden und stellen damit einen Wertvollen Fundus dar, um gezielt und effizient auf eine bessere Wasser und Nährstoffaufnahme bei Sommergerste selektieren zu können. Auch das Pflanzenmaterial, das über Kreuzungen erstellt wurde, steht nach entsprechender Selektion und Prüfung Züchtern und öffentlichen Einrichtungen zur Verfügung

7 Öffentlichkeitsarbeit

In dieser Sektion wird von der Öffentlichkeitsarbeit, die in der Laufzeit des Projektes geleistet wurde, berichtet. Die Präsentation der Versuchsergebnisse wurde jedoch über diese Laufzeit hinaus fortgesetzt.

7.1 Information direkt für die Bevölkerung

2015.07 LfL-Tag der offenen Tür. Grub. Demonstrationsobjekte und Vorstellung des Projektes

2017.07 Hoffest Landwirtschaftsministerium. München. Informationsstand.

2017.09 LfL-Tag der offenen Tür. Freising. Führungen im Moving Fields Gewächshaus.

7.2 Präsenz in der Medien

Die Anlage und das Forschungsprojekt wurden in der Laufzeit des Projektes in einem Fernsehbeitrag vorgestellt.

Auch wurde das Projekt im Zeitschrift LOP (Landwirtschaft ohne Pflug) 2017 / 12 präsentiert.

7.3 Referendarausbildungen

Im Rahmen der Ausbildung für Anwärter und Referendare an der LfL wird das Projekt jährlich in Schulungsvorträgen und den dazugehörigen Unterlagen sowie in Führungen vorgestellt.

7.4 Poster

2015.07 LfL-Tag der offenen Tür. Grub.

2015.10 Phenodays 2015. Freising, Deutschland

2015.10 Regionalkonferenz Alpen - Klimaforschung Bayern. München, Deutschland.

2016.04 Landtag. Vorstellung des Jahresberichtes der LfL.

7.5 Vorträge

- 2015.10 Regionalkonferenz Alpen - Klimaforschung Bayern. München, Deutschland.
- 2015.12 Treffen der bayerischen Gerstenzüchter und der Arbeitsgruppe Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der LfL. Freising, Deutschland.
- 2015.12 25. Thüringer Landesbraugerstentagung. Stadtroda, Deutschland.
- 2016.07 Treffen der bayerischen Gerstenzüchter und der Arbeitsgruppe Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der LfL. Freising, Deutschland.
- 2016.12 ZLF- Bühnenprogramm des Staatsministeriums für Wirtschaft und Energie, Medien und Technologie. München, Deutschland.
- 2016.12 Unterrichtsstunde im Kurs 'Experimentell Arbeiten' der Fachhochschule Weihenstephan-Triesdorf. LfL, Freising, Deutschland.
- 2017.03 Ministerkonferenz der LfL. Freising, Deutschland.
- 2017.10 Besuch der Delegation des ukrainischen Landwirtschaftsministeriums. Freising, Deutschland.
- 2017.12 Workshop Feldphänotypisierung. Kleinaltdorf, Deutschland.
- 2017.12 Treffen des Arbeitskreises Öko-Getreidezüchtung. Freising, Deutschland.
- 2018.02 Treffen der bayerischen Gerstenzüchter und der Arbeitsgruppe Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der LfL. Freising, Deutschland.
- 2018.03 Treffen der AG Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste der LfL. Freising, Deutschland.
- 2018.08 Treffen der bayerischen Gerstenzüchter und der Arbeitsgruppe Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der LfL. Freising, Deutschland.
- 2019.01 Unterrichtsstunde im Kurs 'Experimentell Arbeiten' der Fachhochschule Weihenstephan-Triesdorf. LfL, Freising, Deutschland.
- 2019.02 Bioland Ackerbautag. Blaubeuren-Asch, Deutschland.
- 2019.02 Treffen der bayerischen Gerstenzüchter und der Arbeitsgruppe Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der LfL. Freising, Deutschland.
- 2019.04 Breeders Meeting Secobra. Freising, Deutschland.
- 2019.06 Treffen der AG Züchtungsforschung Winter- und Sommergerste der LfL. Freising, Deutschland.

7.6 Führungen

In der Laufzeit des Projektes wurden in der Moving Fields Anlage 50 Führungen mit nach Schätzung 949 Besuchern, wovon 361 aus dem Ausland, durchgeführt.

7.6.1 Führungen im Jahr 2015

04.05.2015	Referendare aller Fachrichtungen. Bayern. [20]
05.05.2015	Landwirtschaftliche Fachschule Hollabrunn. Österreich. [20]
18.05.2015	Landwirtschaftliche Fachschule LFS Otterbach. Österreich. [33]
26.05.2015	Besucherguppe der South East Training Academy. Türkei. [20]
27.05.2015	Informationsfahrt BBV Kreisverband Erding. [45]
11.06.2015	Fachleute aus der Erzeugungskette, Baden-Württemberg. [4]
11.06.2015	Mälzer, Brauer und Landwirte, Baden-Württemberg. [4]
25.06.2015	Ehemalige TUM 50 Jahre Diplom – Dr. Keydel. Deutschland. [10]
26.06.2015	M.Sc.-Studenten aus Wien. [30]
24.07.2015	KWS. Russland. [8]
21.09.2015	Fa. Münchner Rück mit Gästen von der Fa. Rural Affinity. Australien. [3]
19.10.2015	Fa. Indega mit 4 chinesischen Kollegen. [5]
28.10.2015	Internationale Wissenschaftler der Tagung ‘Phenodays 2015’. International. [43]
29.10.2015	Internationale Wissenschaftler der Tagung ‘Phenodays 2015’. International. [42]
30.10.2015	Internationale Wissenschaftler der Tagung ‘Phenodays 2015’. International. [14]
02.11.2015	Wissenschaftler aus der USA. [27]
16.12.2015	Studenten der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf. Freising. [6]

7.6.2 Führungen im Jahr 2016

02.02.2016	Sortengremium des Berliner Programmes. [5]
02.05.2016	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit & Fa. Triesdorf Consult mit Besuchern aus Afrika und Indien. [15]
21.07.2016	StMELF Abteilung L. München. [25]
15.09.2016	Herrn Donauer mit seinem Abitur-Jahrgang. [15]
28.09.2016	Delegation des chinesischen Landwirtschaftsministeriums. [10]
05.10.2016	Behördenleiter/Bereichsleiter an Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und mithin Lehrkräfte Agrarpolitik. [50]
14.11.2016	Landwirtschaftsministerium China. [25]
22.11.2016	Fachdelegation „Soja-Züchtung“, VR China. [8]
22.11.2016	Gewächshausengineers. [5]
12.12.2016	StMELF Amtschef mit Gästen aus Polen.[15]
14.12.2016	Studenten der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf. [10]

7.6.4 Führungen im Jahr 2017

- 27.01.2017 Wissenschaftler Helmholtz Zentrum München. [5]
- 07.03.2017 Führung Landtagsabgeordnete Fraktion der Freie Wähler. Bayern. [20]
- 07.03.2017 Wissenschaftler Helmholtz Zentrum München. [2]
- 24.05.2017 FüAk Kurs Pflanzliche Erzeugung und Vermarktung. Deutschland. [25]
- 08.06.2017 Fa. Eurochem. Russland. [50]
- 21.06.2017 Wissenschaftler/Mitarbeiter des Projektverbund BayKlimaFit. Deutschland. [30]
- 27.06.2017 Besuchergruppe IPS 3c. Deutschland. [20]
- 29.06.2017 Wissenschaftler, Projektpartner. Deutschland. [5]
- 03.07.2017 Erzeugergemeinschaft Qualitätsgetreide Bayern. [15]
- 17.07.2017 Referendare QE4. Bayern. [45]
- 29.06.2017 Wissenschaftler, Projektpartner des Verbundprojektes PHÄNOBRID. [4]
- 24.08.2017 Wissenschaftler & Agraringenieur aus Chile & Argentinien. [2]
- 05.10.2017 AgroImpuls München mit Vertretern des Kiewer Landwirtschaftsministeriums. [15]
- 23.11.2017 BBV Touristik (Bay. Bauernverband) mit Mitglieder des norwegischen Akershus Bondelags. [45]
- 27.11.2017 Führungskräfte aus westafrikanischen Ländern und Tunesien. [20]
- 29.11.2017 Club der Landwirte Straubing. [25]

7.6.5 Führungen im Jahr 2018

- 24.04.2018 Führung für die staatliche ATA Schule Landsberg. [25]
- 05.06.2018 Wissenschaftler Heil- und Gewürzpflanzen. [25]
- 12.06.2018 Refendare. Bayern. [28]
- 07.07.2018 Wissenschaftler und Landwirte der Cooperativa Agraria. Brasil. [21]
- 26.07.2018 Wissenschaftler aus Süd-Afrika. [2]
- 05.11.2018 Wissenschaftler aus Indien. [3]

8 Supplement – Auswertung der Wachstumsdaten aus dem Versuch 125

Im Mai 2017 wurde Versuch V125 an der Moving Fields Anlage angebaut. Ziel dieses Versuches war, die Ergebnisse vom im September 2016 angebauten Versuch V124 in Bezug auf Trockenstress und Stickstoff-Reduktion zu bekräftigen.

Versuch V125 war im Aufbau identisch zum Versuch V124: die gleichen 32 Sommergersten-Genotypen wie im Versuch V124 wurden mit jeweils 12 Wiederholungen verteilt über 4 Behandlungen in 384 Kleinstbestände ausgelegt. Die vier Behandlungen waren eine optimale Wasserversorgung und eine reduzierte Wasserversorgung, jeweils gekreuzt mit einer optimalen Stickstoffversorgung und einer reduzierten Stickstoffversorgung. Um eine reduzierte Stickstoff-Versorgung zu ermöglichen, wurde anders als im Versuch 124 ein Torfkultursubstrat von der Firma Hawita statt das Torfkultursubstrat von der Firma Höfter eingesetzt.

Da sich in früheren Versuchen herausgestellt hatte, dass das Wurzelwachstum während des ersten Monats nach dem Anbau besonders schnell verläuft, wurde die über- und unterirdische Biomasse-Entwicklung der Versuchspflanzen mit Hilfe der Moving-Fields-Anlage über eine Periode von 2 Monaten intensiv fotografisch verfolgt. Nach diesen 2 Monaten wurde Versuch V125 beendet, auch um sicherzustellen, dass am Tag der offenen Tür 2017 ein neuer Versuch präsentiert werden konnte. Da Versuch 125 vor der Reife der Körner geerntet wurde, konnten nach der Ernte zwar die produzierte Trockenmasse und die Halmzahl, nicht aber der Kornertrag bestimmt werden.

Die Wachstumsdaten aus dem Versuch 125 sind in der Abbildung 13 zusammengefasst: Die Trockenstress-Behandlung im Versuch 125 führte zu einer starken Reduktion der Wurzelfläche der untersuchten Kleinstbestände, sowie zu einer Reduktion der Sprossfläche, die aber weniger stark ausgeprägt war.

8.1 Wurzelwachstum im Versuch 125

Wie in allen Versuchen, wächst die Wurzelfläche im Versuch 125 schnell zu einem Maximum, um sich danach stark zu reduzieren, wodurch sich eine fast symmetrische Optimum-Kurve zeigt (siehe Abbildung 18). Was sonst auffällt: Die trockene Periode während der Bestockung führte in Versuch 125 zu einer deutlich schnelleren Reduktion der Wurzelfläche als in der Kontrollgruppe. Dieser Effekt der trockenen Periode scheint weitgehend unabhängig von der Stickstoffdüngungsmenge zu sein und die Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge hat pauschal keinen deutlichen Effekt auf das Wachstum der Wurzeln.

Um die Behandlungseffekte auf das Wurzelwachstum statistisch zu beschreiben, wurde mit Hilfe der ‚loess‘-Funktion aus dem ‚stats‘-Paket im Statistikprogramm ‚R‘ pro Kleinstbestand ein lokal polynomiales Regressionsmodell erstellt (für eine grafische Darstellung der Regressionsmodelle, siehe Abbildung 19). Anhand dieser Regressionsmodelle wurden interessante Eigenschaften der Wachstumsdynamik identifiziert und quantifiziert: Die maximale Wurzelfläche die pro Kleinstbestand erreicht wurde, den Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Wurzelfläche und die Wurzelfläche am Anfang und Ende der trockenen Periode (siehe Abbildung 20). Diese Eigenschaften wurden jeweils auf Behandlungseffekte untersucht.

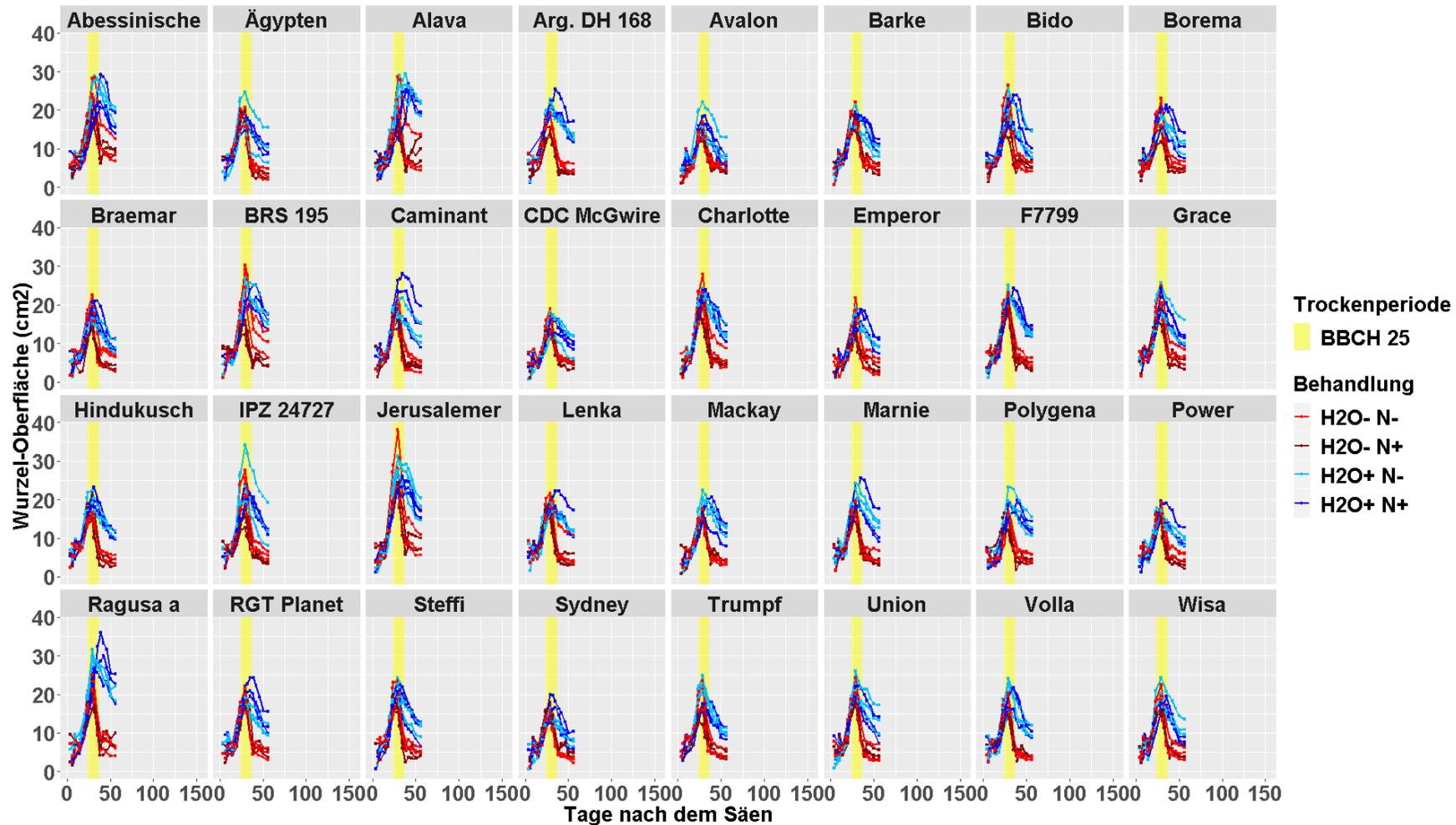


Abbildung 18 Die Wachstumsdynamik der Wurzeln im Versuch 125. Für je der 32 Sorten (Felder) ist der zeitliche Verlauf der Bildfläche der Wurzeln für die 3 Wiederholungen in je der 4 Behandlungskategorien (Farben) dargestellt: Punkte zeigen die Rohdaten, Linien verbinden die wiederholte Messungen pro Kleinstbestand. Die 4 Behandlungskategorien stellen sich als Kreuzung zweier Behandlungen zusammen; „H₂O⁻“: eine trockene Periode während der Bestockung [vom Tag 24 bis Tag 37; um BBCH 25], „H₂O⁺“: keine trockene Periode, „N⁻“: eine Reduzierung der Stickstoffdüngungsmenge bis auf 50 % der „N⁺“ Kategorie, „N⁺“: die konventionell gedüngten Stickstoffdüngungsmenge.

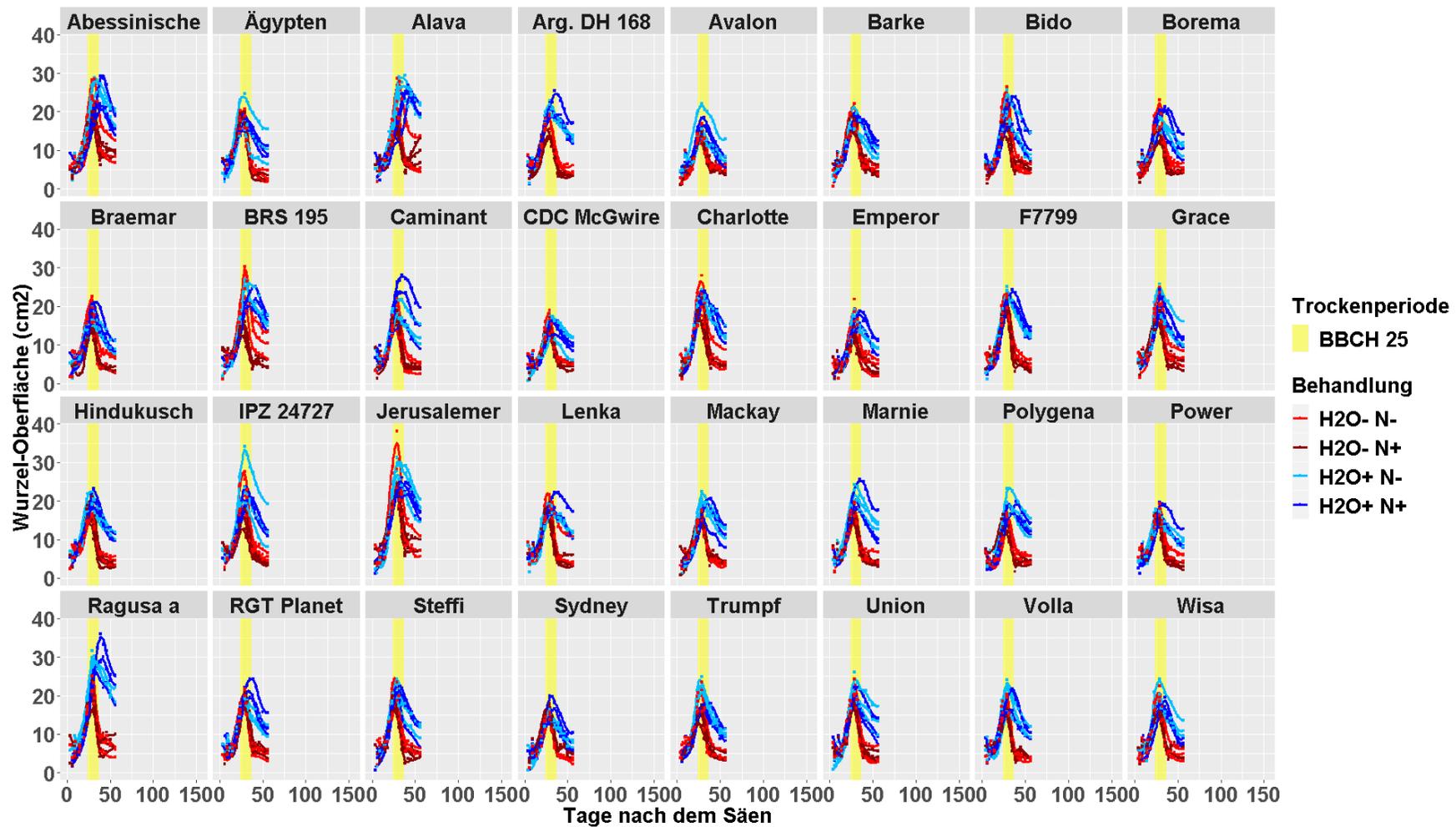


Abbildung 19 Die Wurzelwachstumsdaten aus dem Versuch 125 samt statistischer Beschreibung. Aufbau der Abbildung wie in der Abbildung 18, nur sind die Rohdaten (Punkte) nicht länger mit einer Linie verbunden. Stattdessen ist für jeden Kleinstbestand ein lokal polynomiales Regressionsmodell (Linie) als statistische Beschreibung der Wachstumsdynamik gezeigt.

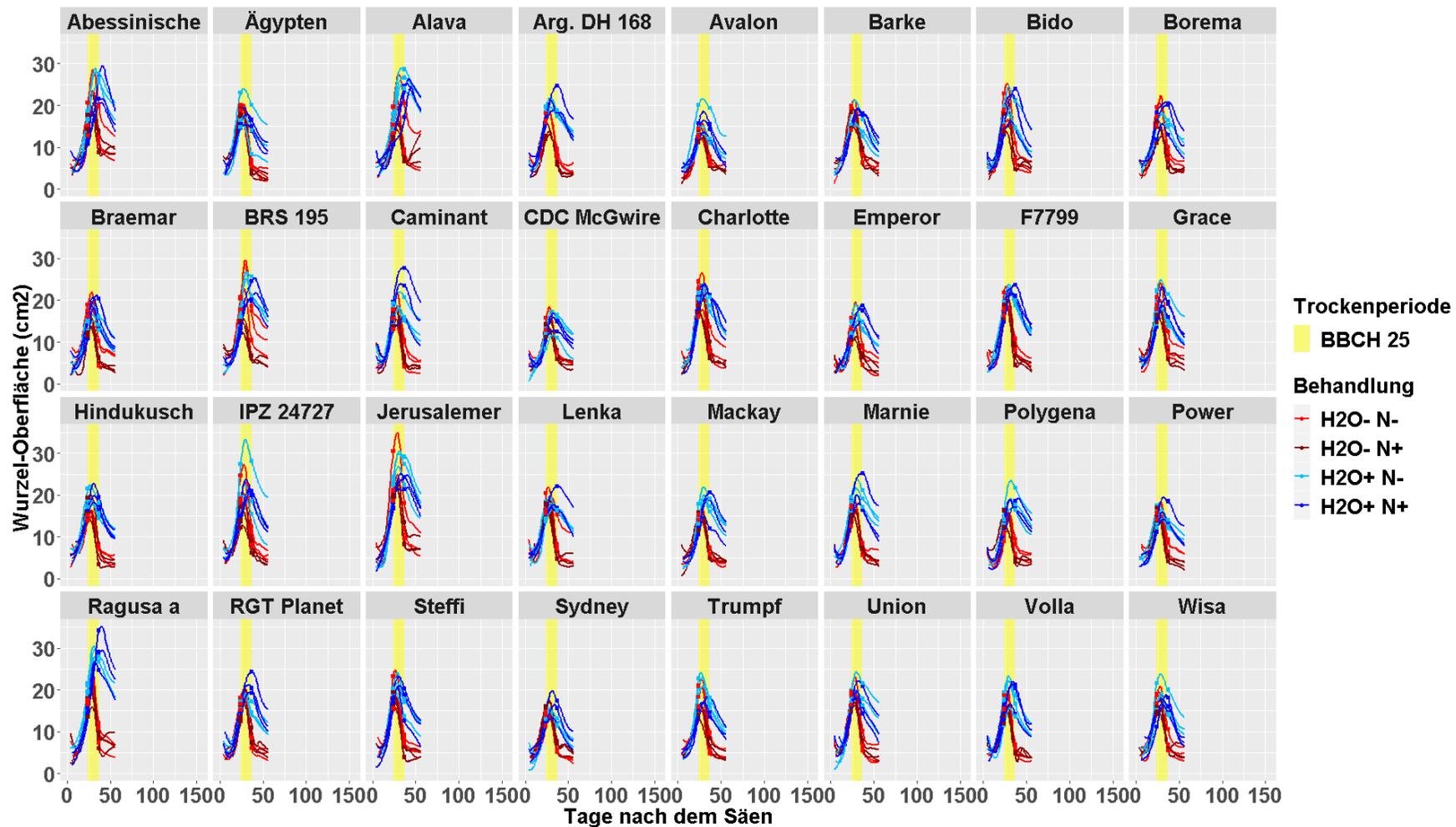


Abbildung 20 Die statistische Beschreibung der Wurzelwachstumsdaten aus dem Versuch 125 samt Beispielen für identifizierte Merkmale. Aufbau der Abbildung wie in der Abbildung 19, nur sind die Rohdaten nicht länger dargestellt. Stattdessen ist für jeden Kleinstbestand die Wurzelfläche am Anfang und Ende der trockenen Periode (Punkte) angegeben, als Beispiel der Eigenschaften der Wachstumsdynamik, die anhand der lokal polynomialen Regressionsmodelle identifiziert und quantifiziert wurden.

8.1.1 Die Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode

Kleinstbestände die optimal mit Stickstoff versorgt waren, hatten am Ende der trockenen Periode eine signifikant niedrige Wurzelfläche als die Kleinstbestände, die beim Bestocken keiner trockenen Periode unterzogen wurden (siehe Abbildung 21: braune versus dunkelblaue Punkte; Statistik in der zweiten Zeile von oben). Dieser Reduktion war für alle untersuchten Genotypen groß, für einige der Genotypen jedoch weniger groß als für andere. Die Sorte Ägypten und der Zuchtstamm Abessinische zum Beispiel, die in der Kontrollbehandlung relativ wenige beziehungsweise relativ viele Wurzeln hatten, reduzierten ihre Wurzelfläche weniger als Genotypen mit einer vergleichbaren Wurzelfläche in der Kontrollbehandlung (z.B. Sydney & Trumpf und Caminant & Ragusa a). Die Reduktion der Wurzelfläche in Folge der trockenen Periode während der Bestockung war ähnlich deutlich für die Kleinstbestände, die mit weniger Stickstoff gedüngt wurden (rote versus hellblaue Punkte; Statistik in der dritten Zeile von oben), allerdings reduzierten einige Genotypen, insbesondere Lenka, BRS 195 und Alava, ihre Wurzelfläche weniger stark, wenn die Stickstoffversorgung nicht optimal war als wenn sie schon optimal war.

8.1.2 Die Höhe der maximalen Wurzelfläche

Der Effekt der trockenen Periode während der Bestockung auf die maximale Wurzelfläche bei optimaler Stickstoffversorgung variierte stark zwischen den Genotypen (siehe Abbildung 22). Bei acht der 32 Genotypen führte die trockene Periode dazu, dass die maximale Wurzelfläche die erreicht wurde, signifikant niedriger war, als die maximale Wurzelfläche die von diesen Genotypen in der Kontrollbehandlung erreicht wurde (siehe Abbildung 22; braune versus dunkelblaue Punkte; Statistik in der zweiten Zeile von oben). Insbesondere bei den Zuchtstämmen Argentinische DH 168 und IPZ 24727, sowie bei den Sorten Emperor, Alava und Ragusa a war dieser negative Effekt auf die maximale Wurzelfläche besonders stark. Bei den anderen 24 Genotypen war der Unterschied zwischen der maximalen Wurzelfläche in der Wasser-unterversorgten Kategorie und der maximalen Wurzelfläche in der Kontrollgruppe kleiner und dadurch nicht signifikant bis zu gar nicht präsent (z.B. Power, Sydney, Ägypten, Barke, Lenka, Jerusalemer).

Die Reduktion der Stickstoffmenge an sich hatte nur bei einem der untersuchten Genotypen einen signifikanten Effekt auf die maximale Wurzelfläche (siehe Abbildung 22; hellblaue versus dunkelblaue Punkte; Statistik in der vierten Zeile von oben, rechts): Die Sorte Trumpf erreichte eine größere maximale Wurzelfläche, wenn Stickstoff-unterversorgt, als wenn optimal mit Stickstoff versorgt. Die maximale Wurzelfläche aller anderen Genotypen war nicht signifikant von der Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge beeinflusst. Bei reduzierter Bewässerung erreichten vier Genotypen (IPZ 24727, BRS 195, Abessinische und Alava) bei einer Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge eine signifikant höhere, maximale Wurzelfläche als bei der optimalen Stickstoffversorgung (siehe Abbildung 22; rote versus braune Punkte; Statistik in der vierten Zeile von oben, links).

Der Effekt der trockenen Periode während der Bestockung auf die maximale Wurzelfläche bei einer reduzierten Stickstoffversorgung war auch Genotyp-spezifisch (siehe Abbildung 22; rote versus hellblaue Punkte; Statistik in der dritten Zeile von oben), obwohl die Variation der Effektgröße zwischen den Genotypen kleiner war als bei den optimal mit Stickstoff versorgten Kleinstbeständen. Nur bei einer Sorte (Ragusa a: die Sorte mit der höchsten maximalen Wurzelfläche) war die maximale Wurzelfläche die bei der reduzierten Stickstoffdüngungsmenge erreicht wurde, signifikant niedriger, als die maximale Wurzelfläche die von diesem Genotyp in der Kontrollbehandlung erreicht wurde.

8.1.3 Der Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche

Die trockene Periode während der Bestockung führte bei alle Genotypen dazu, dass die maximale Wurzelfläche bei optimaler Stickstoffversorgung früher erreicht wurde als in der Kontrollgruppe (sie-

he Abbildung 23; braune versus dunkelblaue Punkte; Statistik in der zweiten Zeile von oben); nur bei drei Sorten (Avalon, Union, Braemar) war dieser Effekt statistisch nicht signifikant.

Bei einer optimalen Bewässerung sorgte die Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge an sich auch für ein früheres Erreichen der maximalen Wurzelfläche (siehe Abbildung 23; hellblaue versus dunkelblaue Punkte; Statistik in der vierten Zeile von oben, rechts); ein Effekt, der bei 18 der untersuchten Genotypen statistisch signifikant war. Bei Kleinstbeständen, die einer trockenen Periode unterzogen wurden, führte die Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge jedoch für keine der Genotypen zu einer signifikanten Änderung im Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Wurzelfläche (siehe Abbildung 23; rote versus braune Punkte; Statistik in der vierten Zeile von oben, links).

Auch bei den Kleinstbeständen die Stickstoff-unterversorgt waren, führte die trockene Periode während der Bestockung pauschal zu einem früheren Erreichen der maximalen Wurzelfläche (siehe Abbildung 23; rote versus hellblaue Punkte; Statistik in der dritten Zeile von oben); das Ausmaß dieses Effekts jedoch war Genotyp-spezifisch. Nur bei fünf der Genotypen (CDC McGwire, Polygena, Mackay, Abessinische und Alava) war die Verfrühung des Erreichens der maximalen Wurzelfläche statistisch signifikant.

8.1.4 Korrelation zwischen Höhe und Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche

Die Höhe der maximalen Wurzelfläche und der Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Wurzelfläche korrelierten kaum miteinander, sowohl über die Behandlungen hinweg als auch innerhalb der Behandlungen (siehe Abbildung 24): Kleinstbestände, die früher (später) ihre maximale Wurzelfläche erreichten, tendieren nur wenig dazu, eine niedrigere (höhere) Wurzelfläche zu erreichen.

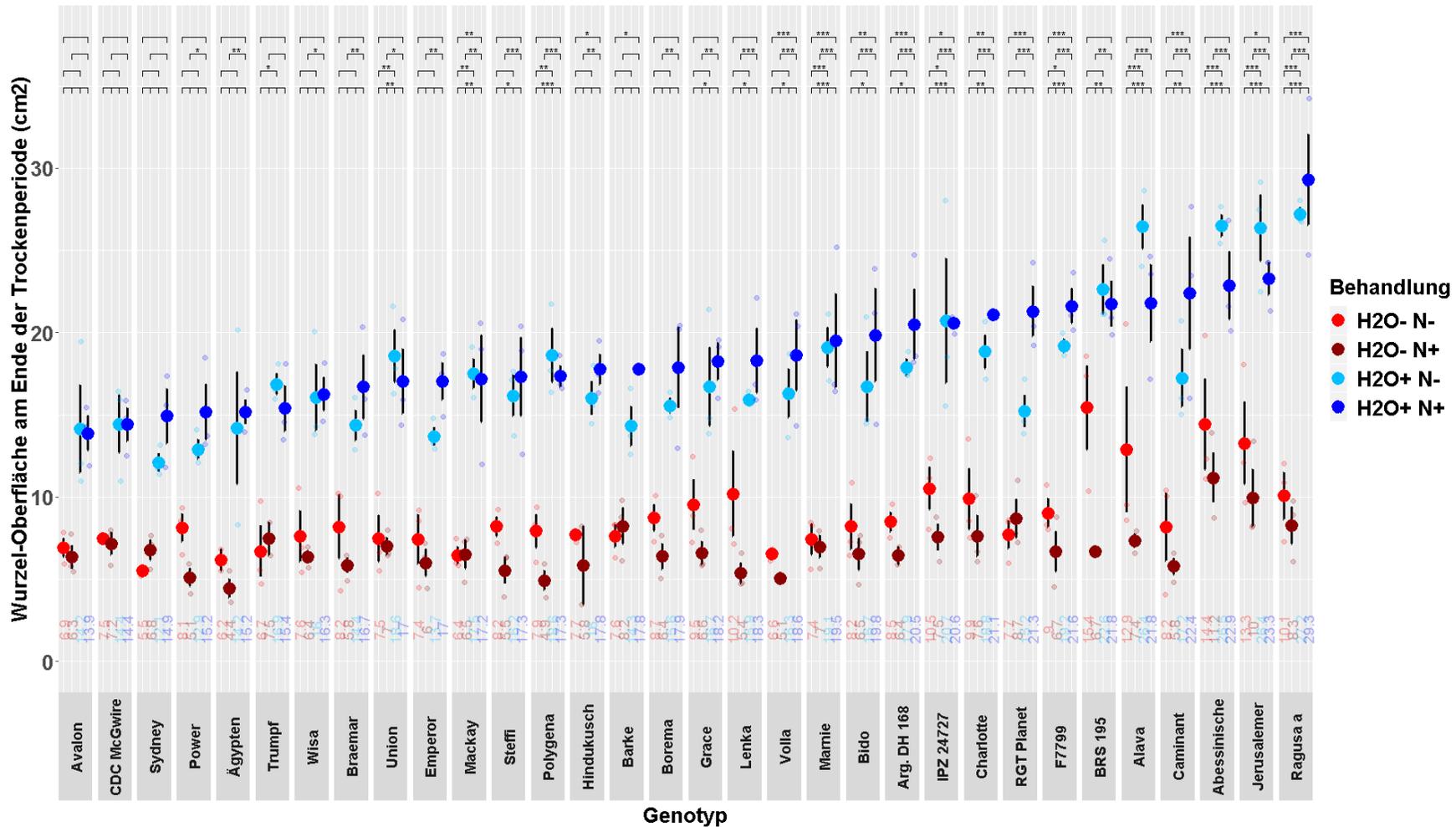


Abbildung 21 Die Wurzelfläche am Ende der Bestockung im Versuch 125. Dargestellt ist pro Genotyp (Felder) und Behandlung (Farbe) die maximale Wurzelfläche in cm², sortiert nach Mittelwert der Kontrollbehandlung. Symbole mit Fehlerbalken zeigen die Mittelwerte über die 3 Wiederholungen und die Standardfehler dieser Mittelwerte. Die Rohdaten sind als transparente Punkte hinterlegt. Oberhalb der Symbole ist die Signifikanz der Unterschiede jeweils zweier Behandlungskategorien, von horizontalen Linien miteinander verbunden, innerhalb einer Sorte angegeben, ob der p-Wert kleiner als 0.001 (***), kleiner als 0.01 (**), kleiner als 0.05 (*) oder größer als 0.05 (kein Symbol) war.

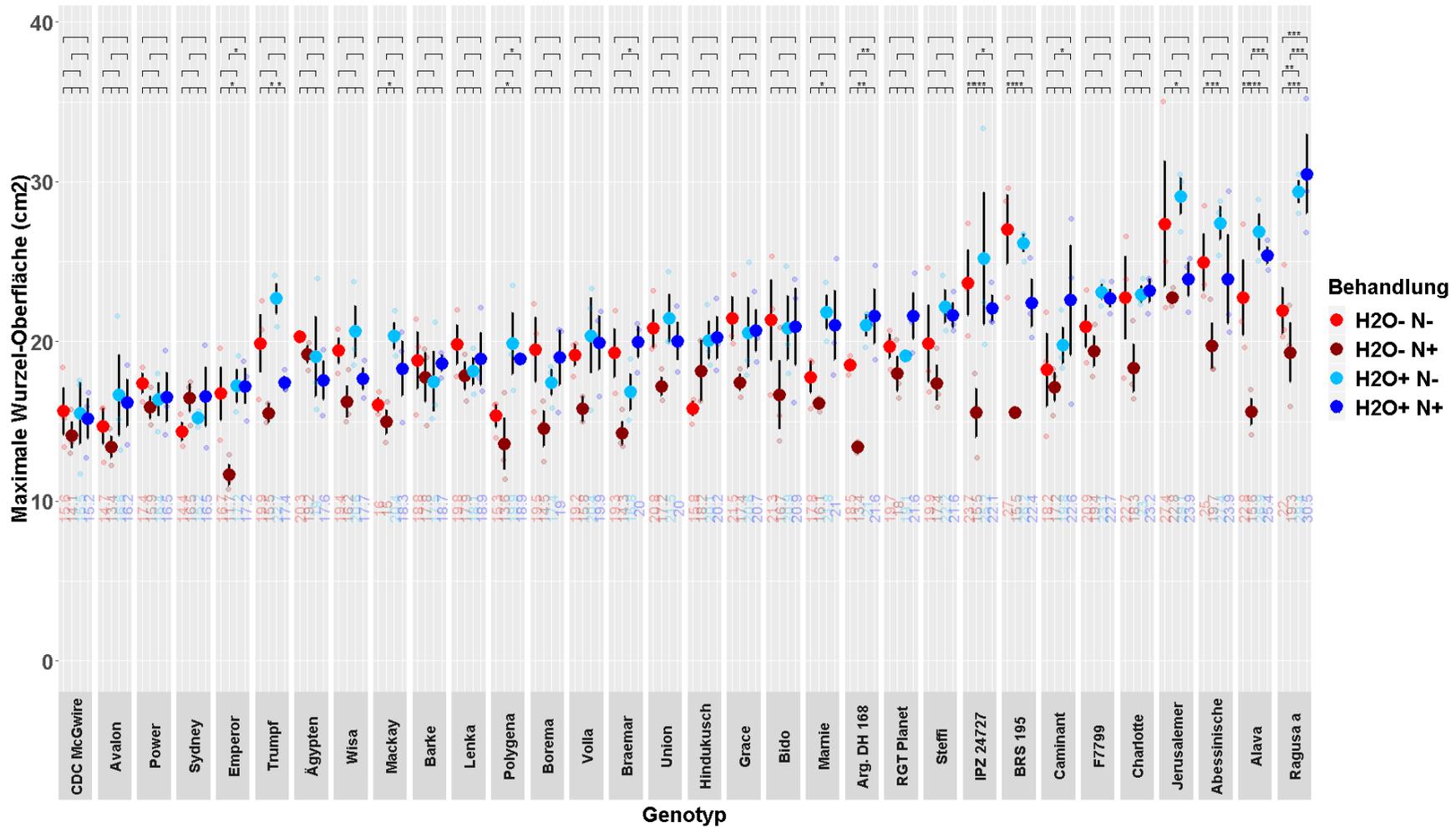


Abbildung 22 Die Höhe der maximalen Wurzelfläche im Versuch 125. Der Aufbau der Abbildung ist wie beschrieben bei Abbildung 21.

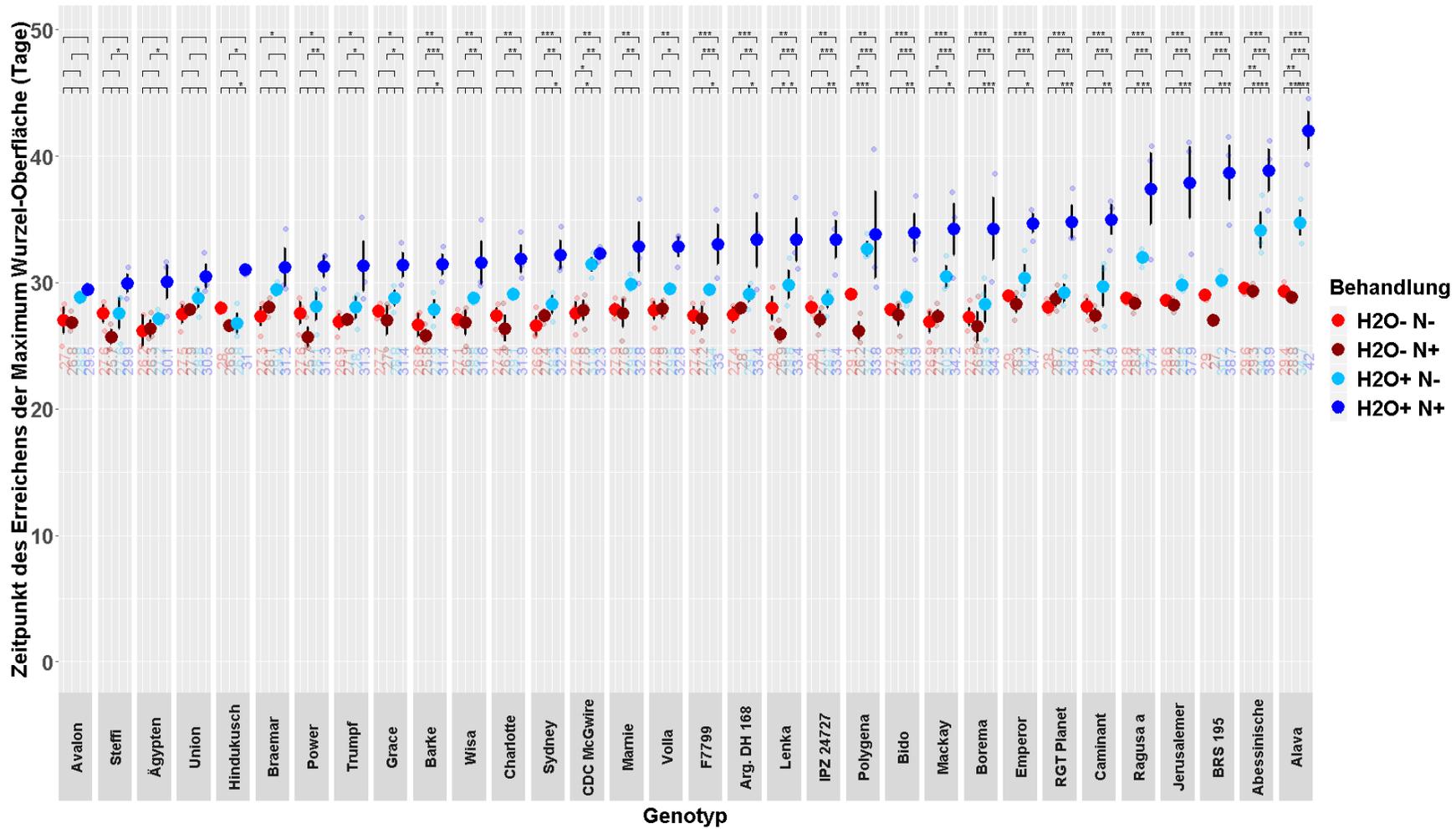


Abbildung 23 Der Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche im Versuch 125. Der Aufbau der Abbildung ist wie beschrieben bei Abbildung 21.

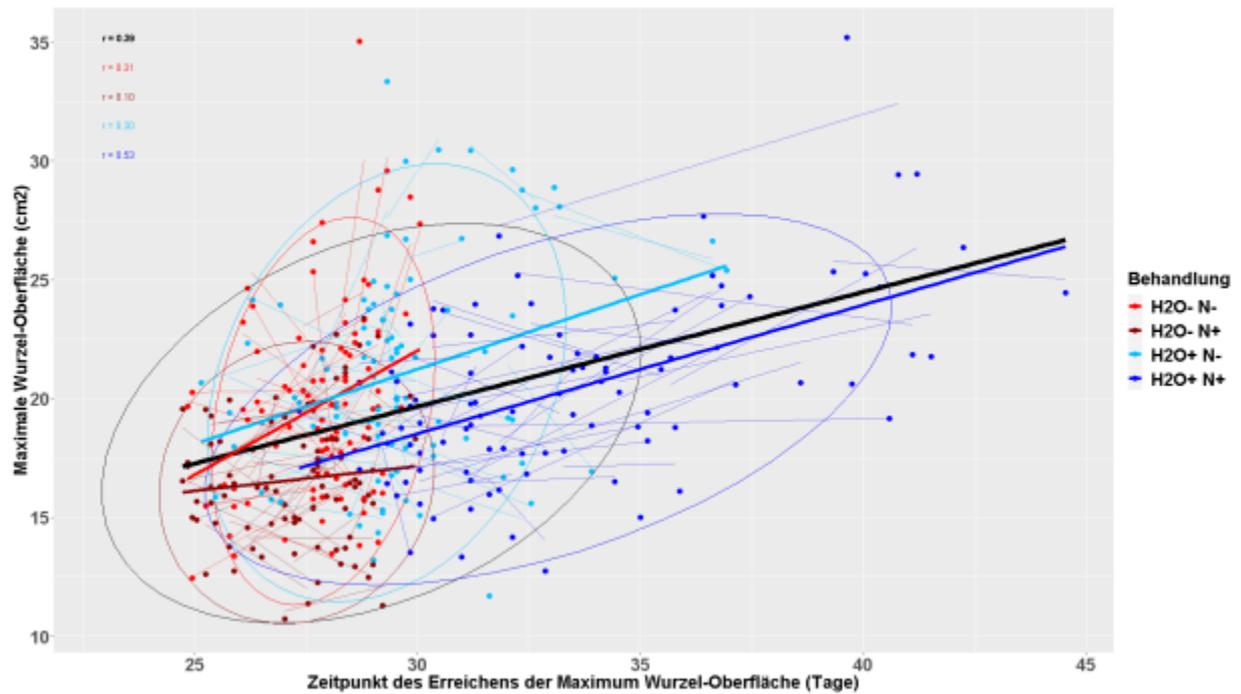


Abbildung 24 Die Korrelation zwischen der Höhe und dem Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche im Versuch 125. Punkte verbinden pro Genotyp (nicht dargestellt) und Behandlung (Farbe) die Höhe der maximalen Wurzelfläche mit dem Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche. Linien stellen die lineare Regression (gerade Linien) und die Korrelation (Ellipsen) dieser beiden Merkmale dar, sowohl innerhalb der Behandlungen (farbig), sowie über die Behandlungen hinweg (schwarz).

8.2 Sprosswachstum im Versuch 125

Der Fokus im Versuch 125 lag bei der Entwicklung der Wurzeln in der Phase der Vegetationszeit, als die Wurzeln sich am schnellsten entwickelten. Dementsprechend wurde diesen Versuch nach 52 Tagen beendet. Die Sprosse der Kleinstbestände entwickelten sich in dieser Zeit stark (siehe Abbildung 25). Bei den meisten der Kleinstbestände flachte die Entwicklung der Sprosse am Ende des Versuches ab; bei einigen der Kleinstbestände und abhängig von der Behandlung hatte sich eine solche Abflachung beim Ende des Versuches noch nicht eingesetzt.

Wie bei der Analyse des Wurzelwachstums beschrieben (siehe Abschnitt 8.1), wurde auch das Wachstum der Sprosse mittels eines lokal polynomialen Regressionsmodells zusammengefasst, anhand wovon interessante Eigenschaften der Wachstumsdynamik identifiziert und quantifiziert wurden. Dabei lag der Fokus auf die Sprossfläche am Anfang und Ende der trockenen Periode (siehe Abbildung 26). Diese Eigenschaften wurden jeweils auf Behandlungseffekte untersucht. Wegen der kurzen Laufzeit des Versuches, wurden die meisten Kleinstbestände noch während des Wachsens und bevor dem Erreichen einer maximalen Sprossfläche geerntet. Eine Analyse der Höhe des Zeitpunktes der maximalen Sprossfläche ist für diesen Versuch deswegen nicht sinnvoll.

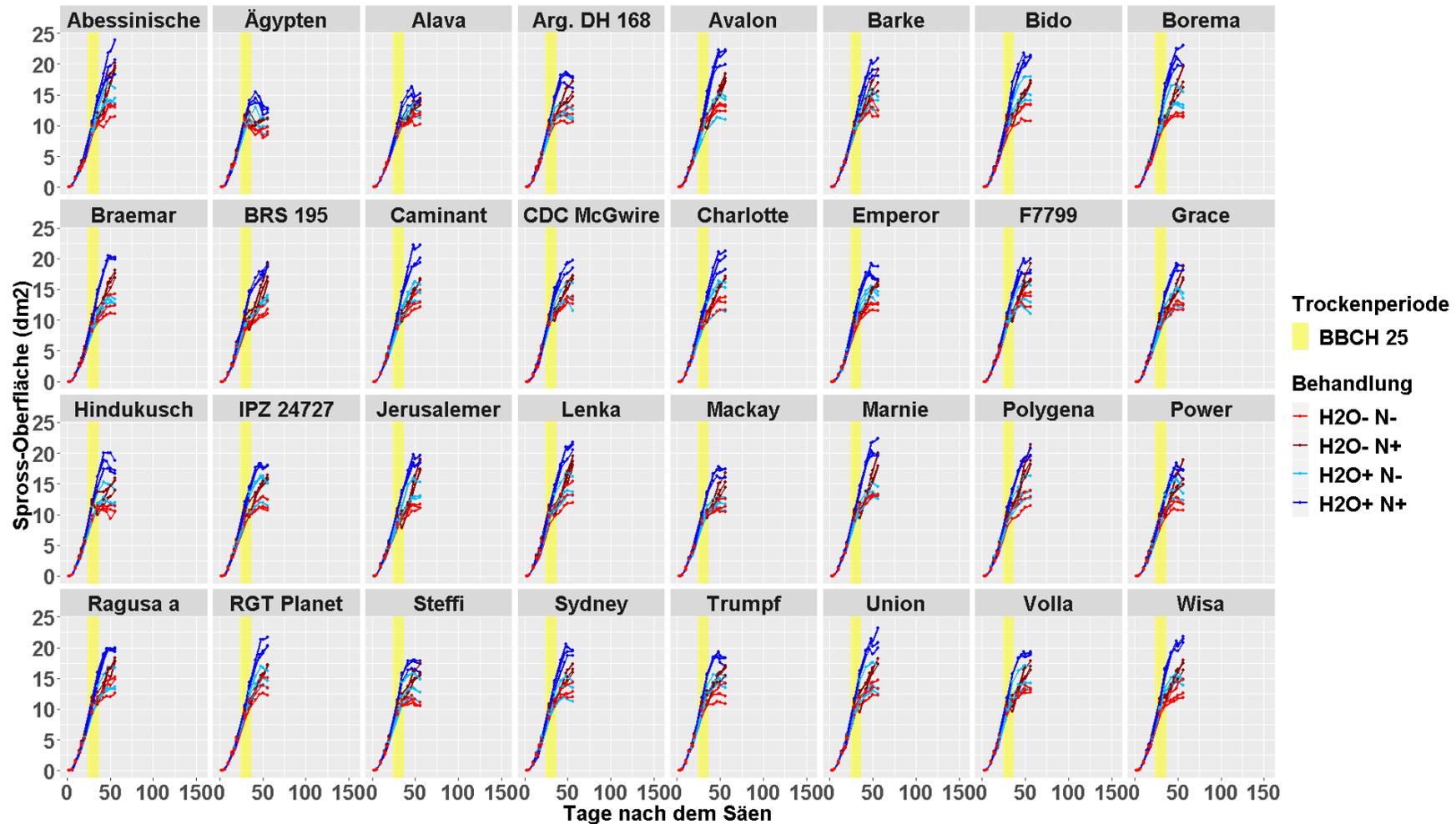


Abbildung 25 Die Wachstumsdynamik der Sprosse im Versuch 125. Für jede der 32 Sorten (Felder) ist der zeitliche Verlauf der Bildfläche der Sprosse für die 3 Wiederholungen in je der 4 Behandlungskategorien (Farben) dargestellt: Punkte zeigen die Rohdaten, Linien verbinden die wiederholte Messungen pro Kleinstbestand. Die 4 Behandlungskategorien stellen sich als Kreuzung zweier Behandlungen zusammen; ‚H₂O-‘: eine trockene Periode während der Bestockung [vom Tag 24 bis Tag 37; um BBCH 25], ‚H₂O+‘: keine trockene Periode, ‚N-‘: eine Reduzierung der Stickstoffdüngungsmenge bis auf 50 % der ‚N+‘ Kategorie, ‚N+‘: die konventionell gedüngte Stickstoffdüngungsmenge.

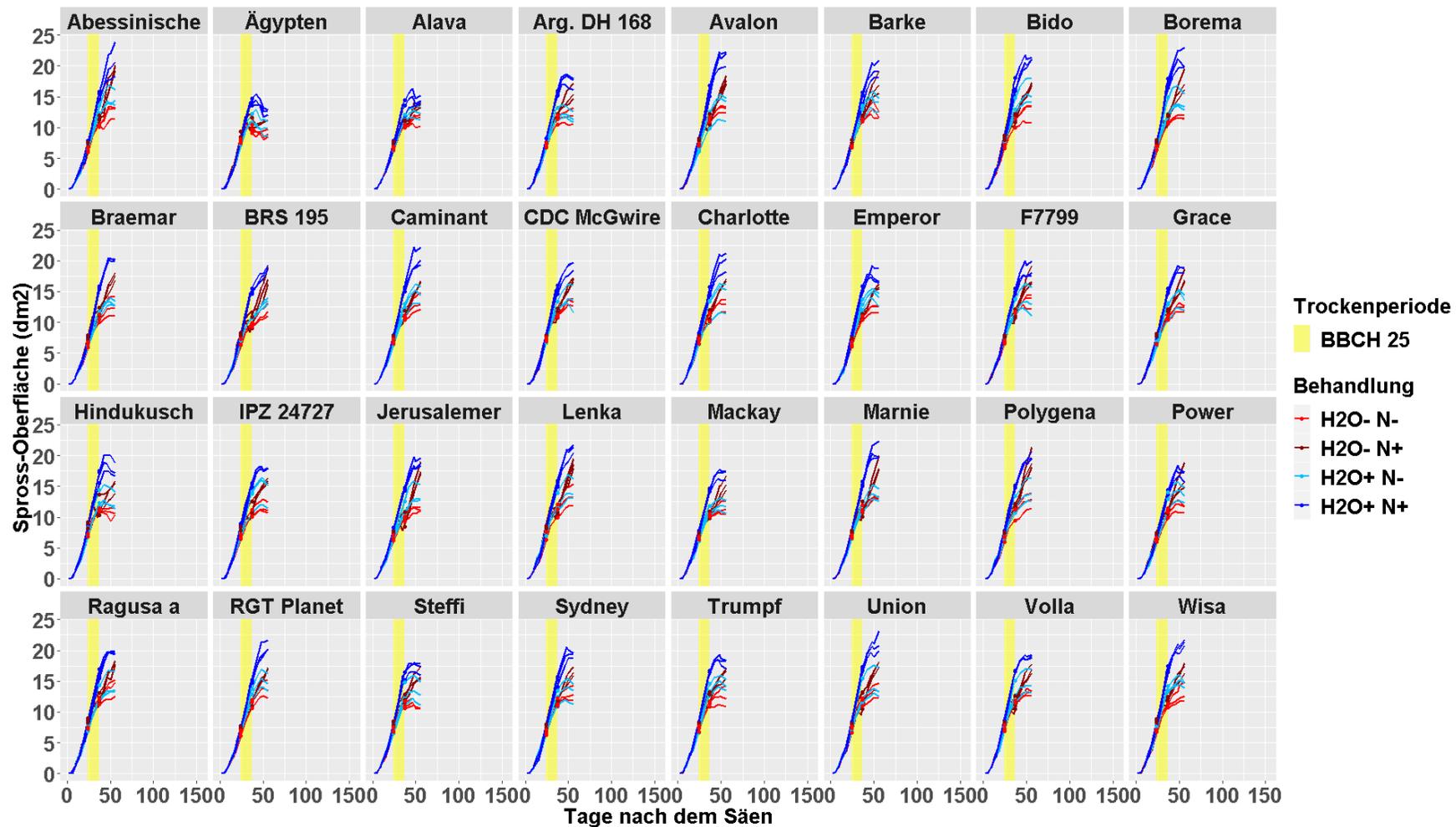


Abbildung 26 Die statistische Beschreibung der Sprosswachstumsdaten aus dem Versuch 125 samt Beispielen für identifizierte Merkmale. Aufbau der Abbildung wie in der Abbildung 25, nur sind die Rohdaten weder dargestellt, noch mit einer Linie verbunden. Stattdessen ist für jeden Kleinstbestand ein lokal polynomiales Regressionsmodell (Linie) als statistische Beschreibung der Wachstumsdynamik gezeigt und ist für jeden Kleinstbestand die Sprossfläche am Anfang und Ende der trockenen Periode (Punkte) angegeben, als Beispiel der Eigenschaften der Wachstumsdynamik.

8.2.1 Die Sprossfläche am Ende der trockenen Periode im Versuch 125

Der Effekt der trockenen Periode auf die Sprossfläche der optimal mit Stickstoff versorgten Kleinstbestände war ähnlich deutlich wie der Effekt auf die Wurzelfläche, sei es weniger ausgeprägt (siehe Abbildung 13): Für alle Genotypen war die Sprossfläche am Ende der trockenen Periode signifikant niedriger als die Sprossfläche der Kleinstbestände die beim Bestocken keiner trockenen Periode unterzogen wurden (siehe Abbildung 27: braune versus dunkelblaue Punkte; Statistik in der zweiten Zeile von oben).

Interessanterweise war der Effekt der trockenen Periode viel weniger ausgeprägt wenn die Stickstoffdüngungsmenge reduziert war (rote versus hellblaue Punkte; Statistik in der dritten Zeile von oben). Die Stickstoffreduktion an sich führte bei optimaler Bewässerung schon zu einer deutlich kleineren Sprossfläche (hellblaue versus dunkelblaue Punkte; Statistik in der vierten Zeile von oben, rechts), wobei die Reduktion der Sprossfläche bei einigen Genotypen (z.B. BRS 195, Emperor, Hindukusch) bedeutsam größer war als bei anderen Genotypen (z.B. Power, Barke, Emperor). Die trockene Periode während der Bestockung führte bei den Stickstoff-unterversorgten Kleinstbeständen für alle Genotypen zu einer weiteren Reduktion der Sprossfläche (rote versus hellblaue Punkte; Statistik in der dritten Zeile von oben). Diese Reduktion war bedeutend geringer als die Reduktion der Sprossfläche bei Kleinstbeständen die optimal mit Stickstoff-versorgt waren und nur für 10 der Genotypen statistisch signifikant.

8.2.2 Sprossbiomasse zur Ernte im Versuch 125

Am Ende des Versuches wurden die Sprosse geerntet und die Sprossbiomasse bestimmt, sodass die Effekte der Behandlungen auch für dieses Merkmal untersucht werden konnten (siehe Abbildung 27). Für Kleinstbestände die optimal mit Stickstoff versorgt waren, führte die Reduzierung der Wasserversorgung pauschal zu einer geringeren Biomasseproduktion (rote versus hellblaue Punkte; Statistik in der dritten Zeile von oben); quantitativ unterschied dieser Effekt sich jedoch schon zwischen den Genotypen. Wenn die Kleinstbestände Stickstoff-unterversorgt waren, unterschied der Effekt der reduzierten Wasserversorgung sich stark zwischen den Genotypen (rote versus hellblaue Punkte; Statistik in der dritten Zeile von oben). Die Mehrzahl der Genotypen produzierte auch bei einer Stickstoff-Unterversorgung deutlich weniger Biomasse, wenn die Wasserversorgung reduziert wurde. Einige Sorten dagegen waren bei der Stickstoff-Unterversorgung nur wenig oder gar nicht von der reduzierten Wasserversorgung befallen. Die Stickstoff-Reduzierung an sich führte pauschal und unabhängig von der Wasserversorgung zu einer deutlich geringeren Biomasse-Produktion (hellblaue versus dunkelblaue Punkte; Statistik in der vierten Zeile von oben, rechts). Das Ausmaß dieser Verringerung jedoch war Genotyp-spezifisch. Ähnlicherweise war der Effekt der Reduktion in der Stickstoff- und Wasserversorgung quantitativ unterschiedlich zwischen den untersuchten Genotypen.

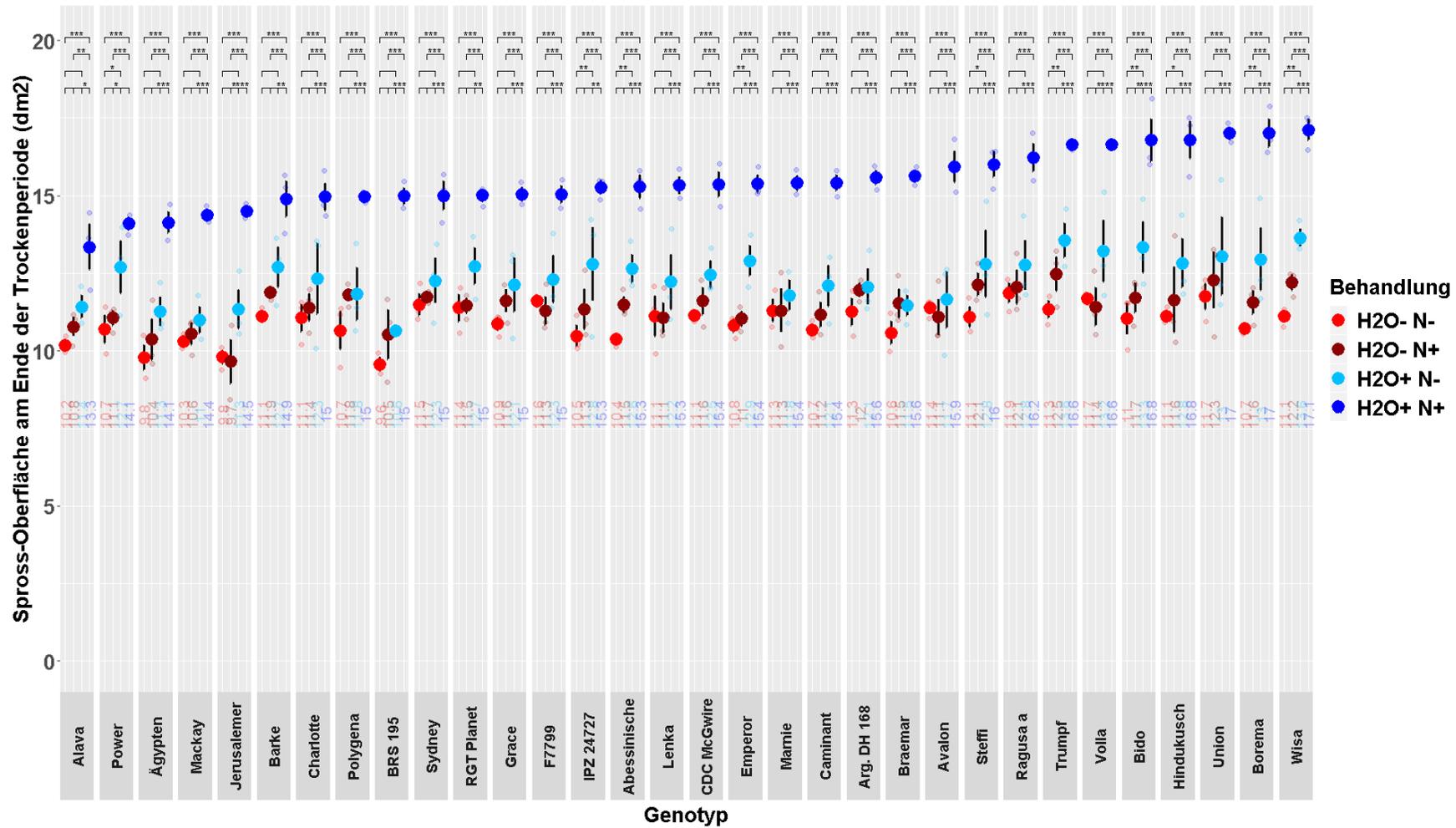


Abbildung 27 Die Sprossfläche am Ende der Bestockung im Versuch 125. Der Aufbau der Abbildung ist wie beschrieben bei Abbildung 21.

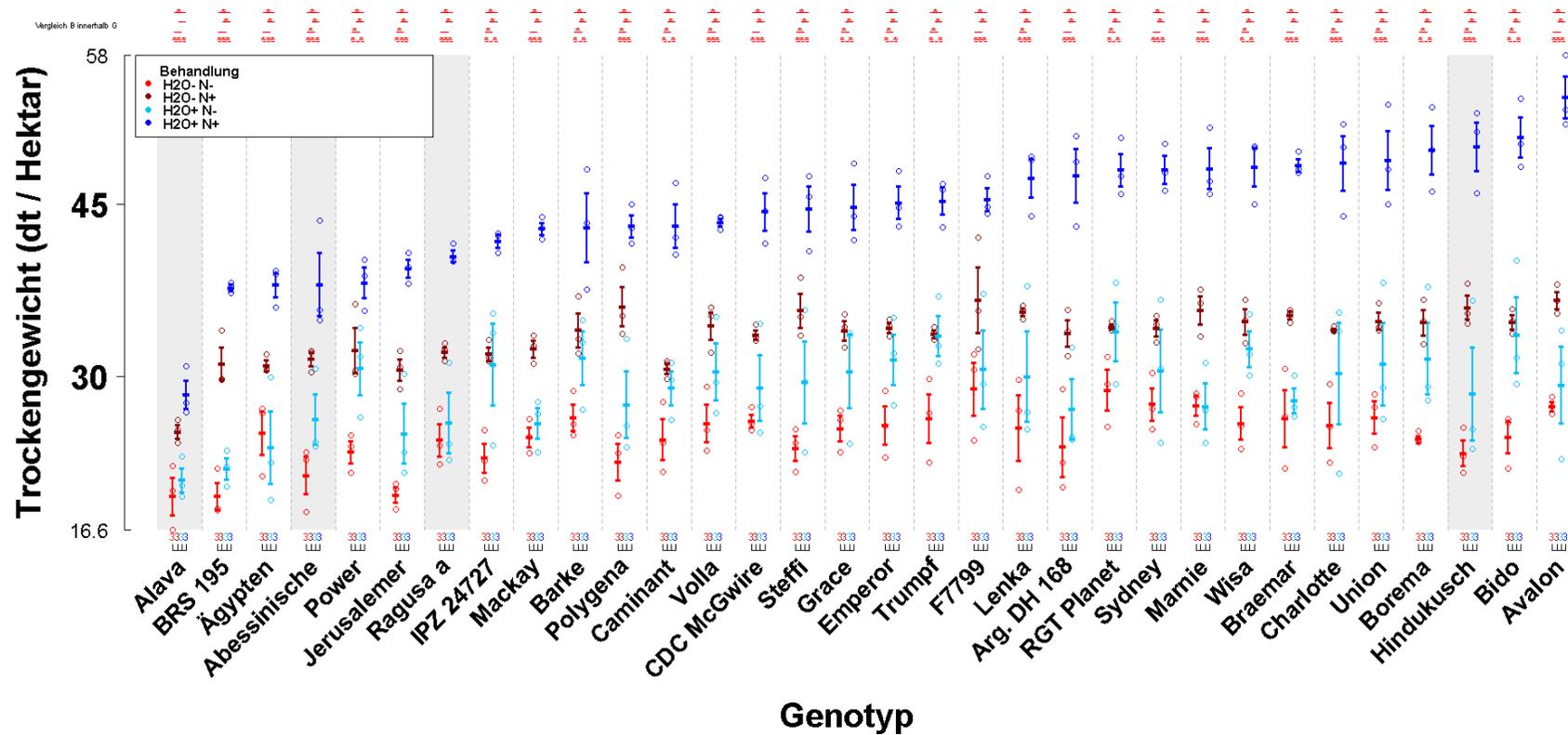


Abbildung 28 Trockengewicht der Sprosse im Versuch 125. Erntedaten des im Mai 2017 angebaute Gewächshausversuches zur Untersuchung der Stickstoff- und Wasser-Effizienz von 32 Sommergersten-Genotypen. Die Darstellung zeigt für die verschiedenen Genotypen die oberirdische Trockenmasse bei der Ernte, wobei Farben die 12 Wiederholungen pro Genotyp (offene Symbole) jeweils eine der 4 Behandlungen darstellen und die geschlossene Symbole mit den Fehlerbalken pro Genotyp und Behandlung die Durchschnittswerte mit deren Standardfehler angeben. Die statistische Signifikanz der Behandlungsunterschiede innerhalb der Genotypen ist oberhalb der Grafik (rot) angegeben: Ein * gibt an, dass der Unterschied in den Durchschnittswerten zweier Behandlungen innerhalb eines Genotypen statistisch signifikant ist.

8.3 Korrelation Spross- versus Wurzelwachstum im Versuch 125

Wegen des starken Effektes der trockenen Periode auf die Kleinstbestände die optimal mit Stickstoff versorgt waren, waren die Sprossfläche und die Wurzelfläche am Ende dieser Periode positiv korreliert ($r_{\text{Pearson}}: 0.80$): Kleinstbestände mit einer kleineren (größeren) Wurzelfläche hatten in der Regel eine kleinere (größere) Sprossfläche. Variation die den Genotypen zugeschrieben werden konnte wirkte dieser positiven Korrelation leicht entgegen; wurde für diese Variation korrigiert, war die positive Korrelation zwischen den Sprossfläche und den Wurzelfläche noch ein wenig stärker ($r_{\text{Pearson}}: 0.90$; siehe Abbildung 29). Diese positive Korrelation war hauptsächlich Folge der Behandlungsvariation: innerhalb der Behandlungskategorien waren die Spross- und Wurzelfläche nur mäßig oder kaum korreliert. Wenn sowohl die genotypische Variation als auch der Behandlungseffekt und deren Wechselwirkung herausgenommen wurde, waren die Sprossfläche und die Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode nur noch schwach positiv korreliert ($r_{\text{Pearson}}: 0.23$).

Da die Korrelation zwischen der Sprossfläche und der Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode hauptsächlich Folge der trockenen Periode war und da der Effekt dieser Behandlung weniger ausgeprägt war wenn die Stickstoffdüngungsmenge der Kleinstbestände reduziert war, war auch die Korrelation zwischen der Sprossfläche und der Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode schwächer wenn die Stickstoffdüngungsmenge der Kleinstbestände reduziert war ($r_{\text{Pearson}}: 0.20$). Auch für diese Kleinstbestände wirkte die Variation die den Genotypen zugeschrieben werden konnte der positiven Korrelation leicht entgegen; wurde für diese Variation korrigiert, war die positive Korrelation zwischen den Sprossfläche und den Wurzelfläche ein wenig stärker ($r_{\text{Pearson}}: 0.40$; siehe Abbildung 30). Wenn sowohl die genotypische Variation als auch der Behandlungseffekt und deren Wechselwirkung herausgenommen wurde, waren die Sprossfläche und die Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode negativ korreliert ($r_{\text{Pearson}}: -0.47$).

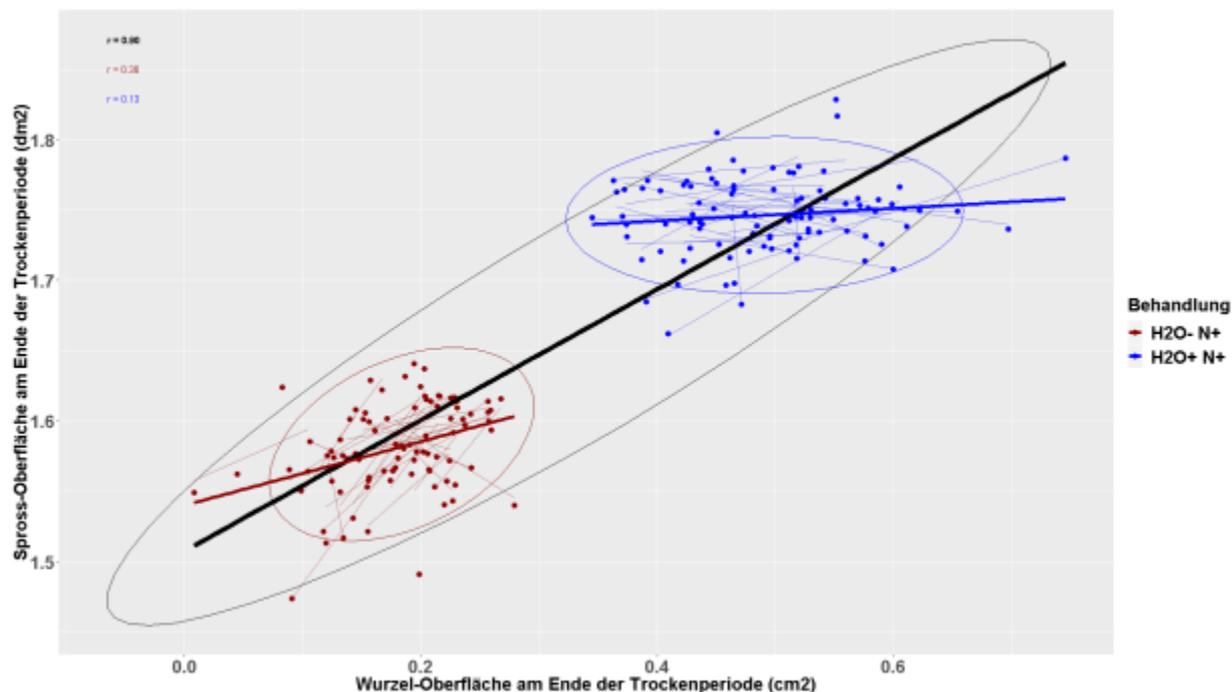


Abbildung 29 Die Korrelation zwischen der Sprossfläche und der Wurzelfläche am Ende der Bestockung bei einer optimalen Versorgung mit Stickstoff im Versuch 125. Punkte verbinden pro Genotyp (nicht dargestellt) und Behandlung (Farbe) die Höhe der maximalen Wurzelfläche mit dem Zeitpunkt der maximalen Wurzelfläche. Linien stellen die lineare Regression (gerade Linien) und die Korrelation (Ellipsen) dieser beiden Merkmale dar, sowohl innerhalb der Behandlungen (farbig), sowie über die Behandlungen hinweg (schwarz). Variation die den Genotypen zugeschrieben werden konnte, wurde herausgerechnet.

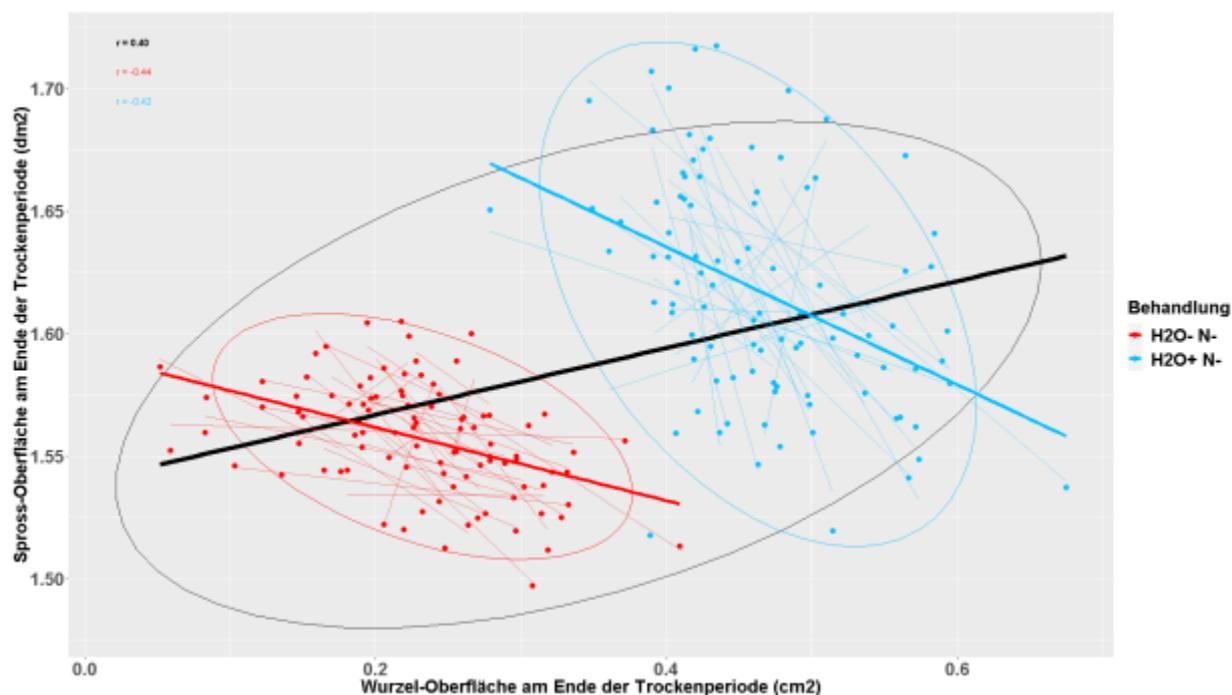


Abbildung 30 Die Korrelation zwischen der Sprossfläche und der Wurzelfläche am Ende der Bestockung bei einer reduzierten Versorgung mit Stickstoff im Versuch 125. Variation die den Genotypen zugeschrieben werden konnten, wurde herausgerechnet. Aufbau der Abbildung wie in der Abbildung 29.

8.4 Zusammenfassung Trockenstress im Versuch 125

Das Wurzelwachstum der Kleinstbestände im Versuch 125 folgte einer fast symmetrischen Optimum-Kurve: innerhalb der Versuchszeit wurde ein Maximum erreicht, wonach die Wurzelfläche fast vollständig reduziert wurde. Die Sprossfläche dagegen wuchs stetig und flachte nur am Ende der Versuchszeit leicht ab.

Die trockene Periode während der Bestockung führte bei allen untersuchten Genotypen im Versuch 125 zu einer stärkeren Reduktion der Wurzel- und der Sprossfläche als in den Kontrollbehandlungen wahrgenommen wurde, wobei die Reduktion der Wurzelfläche im Vergleich zu der maximalen Wurzelfläche stärker war als die Reduktion der Sprossfläche im Vergleich zu der maximalen Sprossfläche. Am Ende der trockenen Periode war die Wurzelfläche positiv mit der Sprossfläche korreliert. Diese Korrelation war ausschließlich Folge der Behandlung. Unterschiede zwischen den Genotypen wirkten dieser Korrelation ein wenig entgegen.

Eine Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge an sich (das heißt, bei einer optimalen Bewässerung) hatte keinen eindeutigen Effekt auf die Wurzelfläche. Auch der Effekt der trockenen Periode war weitgehend unabhängig von der Stickstoffdüngungsmenge. Anders als auf der Wurzelfläche führte die Reduktion der Stickstoffdüngungsmenge an sich zu einer Reduktion der Sprossfläche. Die trockene Periode während der Bestockung führte bei den Stickstoff-unterversorgten Kleinstbeständen für alle Genotypen zu einer weiteren Reduktion der Sprossfläche. Diese Reduktion war jedoch bedeutend geringer als die Reduktion der Sprossfläche bei Kleinstbeständen, die optimal mit Stickstoff-versorgt waren. Die Korrelation zwischen der Sprossfläche und der Wurzelfläche am Ende der trockenen Periode war bei den Stickstoff-unterversorgten Kleinstbeständen zwar auch positiv, jedoch bedeutend schwächer als diese Korrelation bei den Kleinstbeständen die optimal mit Stickstoff versorgt waren. Auch bei den Stickstoff-unterversorgten Kleinstbeständen war die positive Korrelation ausschließlich Folge der Behandlung. Unterschiede zwischen den Genotypen wirkten dieser Korrelation ein wenig entgegen.