

UNIVERSITÄT HOHENHEIM

Fakultät Agrarwissenschaften

Institut für Tropische Agrarwissenschaften

Fachgebiet für Wasserstress-Management bei Kulturpflanzen in den Tropen
und Subtropen (490g)

Einfluss bodenbürtiger Dürre auf die Pigmentzusammensetzung und Lichtadaptation bei Weizenblättern

Bachelorarbeit

Tom Siegel

Studiengang Agrarwissenschaften

Matrikelnummer: 815662

Prüfer: Professor Dr. Folkard Asch

Betreuer: Dr. Alejandro Pieters

Eingereicht am 05.12.2022

Abstract

Weizen ist eines der wichtigsten Grundnahrungsmittel. Schon vor über 8000 Jahren wurde Weizen kultiviert und wird mittlerweile auf der ganzen Welt angebaut sowie fortwährend weitergezüchtet. Auch heute ist die Zucht und Verbesserung der Weizenpflanze fester Bestandteil der Landwirtschaft und Forschung. Ziel ist nicht mehr nur die Ertragssteigerung, sondern auch die Anpassung an Umweltbedingungen, die sich infolge des menschengemachten Klimawandels schnell verändern und die Landwirtschaft und ihre Produktion vor neue Herausforderungen stellen. Um die Auswirkungen von bodenbürtiger Dürre und hoher Lichtintensität auf Pigmentzusammensetzung und photosynthetische Leistung bei Weizenpflanzen genauer zu erforschen, wurde ein Versuch mit unterschiedlicher Bewässerung und Beleuchtung im Gewächshaus mit zwei verschiedenen Sorten Sommerweizen aufgebaut. Ziel war die Untersuchung der Genotypen auf Unterschiede in ihrer Stressreaktion bezüglich der Pigmentzusammensetzung und PSII-Quantenausbeute, um Anreiz für weitere Forschung und Züchtung zu schaffen.

Es zeigte sich, dass bei Trockenstress signifikante Unterschiede bei den SPAD-Werten eines Genotyps vorliegen. Bei der Pigmentanalyse ergaben sich ebenfalls signifikante Unterschiede.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung.....	1
1.1 Photosynthese	1
1.2 Verschiedene Wege eines Photons	2
1.3 Wasser- und Lichtstress.....	3
1.4 Chlorophyll.....	4
1.5 Carotinoide	4
1.6 Xanthophyllzyklus.....	5
2 Material und Methoden.....	7
2.1 Material.....	7
2.2 Pflanzenanzucht.....	8
2.3 Versuchsdesign.....	8
2.4 Behandlung.....	9
2.5 Messungen	9
2.6 Pigmentanalyse mit HPLC	10
2.7 Pigmentanalyse mit Spektralphotometrie.....	11
2.8 Datenaufbereitung und statistische Analyse.....	11
3 Ergebnisse	12
3.1 SPAD-Werte.....	12
3.1.1 SPAD-Werte bei Trockenstress.....	12
3.1.2 SPAD-Werte bei Lichtstress	13
3.2 Quantenausbeute des Photosystems II.....	14
3.2.1 Quantenausbeute bei Trockenstress	14
3.2.2 Quantenausbeute bei Lichtstress	15
3.3 Pigmentanalyse Trockenstress.....	16
3.3.1 Gesamtgehalt Pigmente.....	16
3.3.2 Chlorophylle.....	17
3.3.3 β -Carotin.....	18
3.3.4 Antheraxanthin und Violaxanthin	19
3.3.5 Neoxanthin und Lutein.....	20

3.4	Pigmentanalyse Lichtstress.....	21
3.4.1	Gesamtgehalt Pigmente.....	21
3.4.2	Chlorophylle.....	22
3.4.3	β -Carotin.....	23
3.4.4	Antheraxanthin und Violaxanthin	24
3.4.5	Neoxanthin und Lutein.....	25
3.5	Korrelationen	26
4	Diskussion.....	28
4.1	SPAD-Wert.....	28
4.2	Quantenausbeute des PS II	29
4.3	Pigmente	29
4.3.1	Chlorophylle.....	29
4.3.2	β -Carotin.....	30
4.3.3	Violaxanthin und Antheraxanthin	30
4.3.4	Neoxanthin	31
4.3.5	Lutein	31
5	Fazit und Verbesserungsvorschläge.....	32
6	Literaturverzeichnis	IV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umwandlungszustände des Xanthophyllzyklus.....	6
Abbildung 2: SPAD-Werte bei Trockenstress	12
Abbildung 3: SPAD-Werte bei Lichtstress	13
Abbildung 4: Quantenausbeute des PS II bei Trockenstress.....	14
Abbildung 5: Quantenausbeute des PS II bei Lichtstress.....	15
Abbildung 6: Gesamtgehalt der Pigmente bei Trockenstress	16
Abbildung 7: Chlorophyll a-Konzentration und Chlorophyll b-Konzentration bei Trockenstress.....	17
Abbildung 8: β -Carotin-Konzentration bei Trockenstress	18
Abbildung 9: Antheraxanthin- und Violaxanthinkonzentration bei Trockenstress.....	19
Abbildung 10: Neoxanthin- und Luteinkonzentration bei Trockenstress	20
Abbildung 11: Gesamtgehalt der Pigmente bei Lichtstress	21
Abbildung 12: Chlorophyll a- und Chlorophyll b-Konzentration bei Lichtstress	22
Abbildung 13: β -Carotin-Konzentration bei Lichtstress	23
Abbildung 14: Antheraxanthin- und Violaxanthinkonzentration bei Lichtstress	24
Abbildung 15: Neoxanthin- und Luteinkonzentration bei Lichtstress	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parzellenummer und Linienbeschreibung der für die Auswertung dieser Arbeit verwendeten Linien	7
Tabelle 2: Verwendete Geräte zur Fluoreszenzmessung und Pigmentanalyse	7
Tabelle 3: Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den Kammern mit hoher und niedriger Luftfeuchtigkeit bei Tag und Nacht	9
Tabelle 4: Pearsonsche Produkt-Moment-Korrealation der Behandlungen bei Trockenstress. P-Werte unter 0,05 zeigen eine signifikante Korrelation der Parameter an	26
Tabelle 5: Pearsonsche Produkt-Moment-Korrelation der Behandlungen bei Lichtstress. P-Werte unter 0,05 zeigen eine signifikante Korrelation der Parameter an.....	27

Abkürzungsverzeichnis

DAT	Tage nach Verpflanzung
DPS	De-Exoxidationszustand des Xanthophyllzyklus
HL	Starklicht (high light)
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatograph
NPQ	Non-photochemical quenching
PC	Plastocyanin
PFD	Photonenflussdichte
PQ	Plastochinon
PS I	Photosystem I
PS II	Photosystem II
r	Korrelationskoeffizient
RC	Reaktionszentrum
ROS	Reaktive Sauerstoffspezies
VDE	Violaxanthin De-Epoxidase
ZE	Zeaxanthin-Epoxidase
Zx	Zeaxanthin

1 Einleitung

Die Ernährung aller Lebewesen beruht auf dem Wachstum von Pflanzen, die durch Photosynthese Energie in für Mensch und Tier verfügbare Formen umwandelt. Eine der wichtigsten Kulturpflanzen der menschlichen Ernährung ist Weizen. Dessen Verbreitung begann vor 7000 Jahren im Nahen Osten (heutiger Irak, Syrien, Jordanien, Israel und Palästina), dem Fruchtbaren Halbmond. Durch Bastardisierung und Polyploidisierung entwickelte sich aus Wildformen von Einkorn (*Triticum monococcum*) über Emmer (*Triticum dicoccum*) unser heutiger Weichweizen (*Triticum aestivum* L.). Nach Gerste ist Weizen damit das zweitälteste gezüchtete Getreide. Das Anbaugebiet erstreckt sich über die gesamte Erde und mit einem jährlichen Konsum von 78 kg pro Person ist Weizen, neben Mais und Reis, der wichtigste Lieferant für Kohlenhydrate. (Chand 2009) Im Zuge der grünen Revolution gelang es, die Flächenproduktion um ein Vielfaches produktiver zu gestalten.

Die hohe Ertragsleistung der Kulturpflanze ist allerdings negativ korreliert mit der Resistenz gegenüber biotischen und abiotischen Stressoren. Ziel heutiger Züchtungen ist deswegen nicht mehr nur die alleinige Ertragssteigerung, sondern die Anpassung an Umweltbedingungen bei gleichzeitiger Erhaltung der hohen Ertragsleistung (Ali et al. 2022). Der potenzielle Ertrag kann aufgrund von abiotischem und biotischem Stress nie erreicht werden, weshalb daran gearbeitet werden muss, Kulturpflanzen möglichst gut daran anzupassen. Abiotischer Stress hat im Vergleich einen viel größeren Anteil an den Verlusten (Daryanto et al. 2016). Die Möglichkeit zur Verbesserung ist hier dementsprechend hoch. Die Herausforderung der Züchtung und Forschung ist dabei die Anpassung an die durch Klimawandel immer extremer werdenden Bedingungen.

In dieser Arbeit werden der Einfluss von bodenbürtiger Dürre und Lichtstress auf die photosynthetische Produktivität sowie die Pigmentzusammensetzung in den Fahnenblättern von Weizenpflanzen untersucht. Vor der Versuchsbeschreibung wird in den folgenden Kapiteln auf grundlegende Themen eingegangen. Neben der Photosynthese werden Stressreaktionen und die daran beteiligten Pigmente erläutert.

1.1 Photosynthese

Höhere Pflanzen nutzen die Energie des Sonnenlichts, um aus atmosphärischem CO₂ und Wasser organische Verbindungen herzustellen. In der lichtabhängigen Reaktion werden in

den Chloroplasten zwei Moleküle Wasser durch die Energie des Sonnenlichts in vier Protonen und vier Elektronen sowie ein Molekül Sauerstoff gespalten. Diese Reaktion wird als lichtabhängige Reaktion bezeichnet. Beim Energietransfer zum Photosystem II P680 (PS II) von Chlorophyll *b* über die Antennenpigmentmoleküle Lutein, Zeaxanthin, β -Carotin und Lycopene hin zu Chlorophyll *a* wird ein Teil der Energie genutzt, um Adenosindiphosphat (ADP) zu Adenosintriphosphat (ATP) zu reduzieren. Das angeregte Elektron geht in einen energiereicheren Zustand über und wird über eine Elektronentransportkette auf das Photosystem I P700 (PS I) übertragen. Dabei spielen an der Thylakoidmembran gebundene Moleküle wie Plastoquinon (PQ), Plastocyanin (PC) und der Cytochromkomplex b6/f eine wichtige Rolle. Durch eine erneute Anregung im PS I durch Photonen sind die Elektronen ausreichend angeregt, um über eine weitere Elektronentransportkette über Ferredoxin das B-Vitamin NADP⁺ zu NADPH (Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid-Phosphat) zu reduzieren. ATP und NADPH sind die Energieträger für alle Stoffwechselprozesse, die in der Pflanze stattfinden. Die Notwendigkeit beider Photosysteme ergibt sich aus der Tatsache, dass PS II zur Elektronenweitergabe an NADP⁺ nicht ausreichend reduziert und PS I zur Photolyse der Wassermoleküle nicht ausreichend oxidiert ist (Chand 2009; Evans 2013; Farooq et al. 2009a).

Die lichtunabhängige Reaktion läuft im Calvin – Zyklus ab. Der Calvin – Zyklus ist bei Weizen als C₃-Pflanzen in drei Schritte unterteilbar. Erster Schritt ist die CO₂-Fixierung, auf diese folgt die Reduktion und über die Regeneration der Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase-Oxygenase (RubisCO) schließt sich der Kreis wieder. Das Produkt ist ein Triosephosphat, welches dann im Stoffkreislauf zur Energieverwertung verwendet werden kann.

1.2 Verschiedene Wege eines Photons

Nur 5-10 % der eingestrahnten Energie wird für photosynthetische Prozesse verwendet (Losciale et al. 2010). Für energiegeladene Photonen gibt es nach der Aufnahme über einen Antennenkomplex verschiedene Wege. Über ein weiteres Chlorophyllmolekül und Förster-Resonanzenergietransfer gelangt das Photon zu den Reaktionszentren (RC) der Photosysteme I und II. Sind die RC ausgelastet, wird überschüssige Energie über NPQ (Nicht-Photochemische-Löschung – non photochemical quenching) in Form von Wärme abgegeben. Neben thermischer Energiedissipation werden Photonen auch über Chlorophyll *a*-Fluoreszenz emittiert und die angeregten Chlorophyllmoleküle dadurch in

den Grundzustand versetzt (Maxwell und Johnson 2000). Die gemessene Chlorophyllfluoreszenz lässt Rückschlüsse über die photosynthetische Effizienz der Blätter zu.

Sind alle Systeme zur Ableitung überschüssiger Energie ausgelastet, findet in den RC des PS II Photoinhibition und Photooxidation statt. Die stärkste Ausprägung hat die Photoinhibition nach der Überlastung des Xanthophyllzyklus. Die irreparable Schädigung des PS II kann dann nur durch Abbau und Neusynthese des im RC liegenden D1-Protein behoben werden (Melis 1999). Laut der Studie von Krause et al. (1990) kommt es aber nicht zu einer teilweisen Schädigung aller RC, sondern einzelne RC werden komplett inhibiert. So können die umliegenden Photosysteme weiter Photosynthese betreiben und sind genau wie die Antennenpigmente der inaktiven RC vor photooxidativer Schädigung geschützt.

1.3 Wasser- und Lichtstress

Pflanzen sind an ihren Wachstumsort gebunden und biotischen sowie abiotischen Stressfaktoren unweigerlich ausgesetzt. Diese sind für das Pflanzenwachstum limitierend. Die weitaus größeren Ertragsverluste bei der Produktion landwirtschaftlich genutzter Kulturen sind dabei auf abiotischen Stress zurückzuführen. Dazu zählen Wasser- und Lichtstress, Hitze- und Kältestress sowie der pH-Wert, Salzgehalt und die Nährstoffzusammensetzung des Bodens. Mithilfe des durchgeführten Versuchs sollen die Auswirkungen von Wassermangel und Lichtstress auf Photosyntheseleistung und Pigmentzusammensetzung untersucht und besser erklärt werden.

Unter Lichtstress leidet eine Pflanze, wenn Lichtenergie im Bereich der Lichtsättigung nicht mehr photochemisch genutzt werden kann, also CO₂ limitierend wirkt, beziehungsweise die Carboxilierungskapazität von RubisCO oder der Calvin-Zyklus ausgelastet ist. Unter diesen Umständen sind ADP und NADP⁺ vollständig reduziert und können nicht mehr zur Photophosphorylierung oder als Elektronenakzeptor dienen. Lichtstress kommt aber nicht per se von zu hoher Lichteinstrahlung, sondern tritt auf, wenn ein Überschuss an absorbierter Lichtenergie vorhanden ist, die nicht photosynthetisch verarbeitet werden kann. Ein hohes Verhältnis von Photonenflussdichte (PFD) zu Photosyntheseleistung gilt als Indikator für Lichtstress. Die Ursache liegt entweder tatsächlich bei hoher Einstrahlung und somit erhöhter PFD oder bei konstanter PFD und verringerter Photosyntheseleistung. (Demmig-Adams und Adams 1992)

Wasserstress tritt auf, wenn die Pflanze mehr Wasser durch Transpiration verliert, als die Wurzeln aus dem Boden aufnehmen können. Man spricht dann von bodenbürtiger Dürre. Effekte bodenbürtiger Dürre sind insbesondere die Schließung der Stomata, induziert durch Abscisinsäure (ABA), die Herabregulierung des Elektronentransportes und dem Abfall des Turgordrucks (Farooq et al. 2009b). Der verringerte Turgordruck in den Zellen kann zu Membranschäden führen und verschlechtert unter anderem die Enzymaktivität von RuBisCO, dies beeinträchtigt die CO₂-Fixierung. Der verminderte Elektronentransport behindert zusätzlich die ATP-Synthese, sodass durch die genannten Faktoren die Produktivität der Pflanze stark beeinträchtigt ist und die Wassernutzungseffizienz sinkt. Nicht zu vergessen ist die vermehrte Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS). (Farooq et al. 2009b)

1.4 Chlorophyll

In Pflanzen kommen unterschiedliche Arten von Chlorophyllen vor, die alle zu den akzessorischen Photosynthesepigmenten gehören. Die häufigsten Arten sind Chlorophyll *a* und Chlorophyll *b*. Das Absorptionsspektrum erstreckt sich bei Chlorophyll *a* von 400-480 nm und bei Chlorophyll *b* 550-700 nm. Der nicht abgedeckte Strahlungsbereich dazwischen wird als Grünücke bezeichnet, da das Licht in diesem Bereich nur sehr schwach absorbiert wird und dadurch chlorophyllhaltige Pflanzenteile für das Auge grün erscheinen (Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften 2014). Die Konzentrationen beider Chlorophylle wurden während des Versuchs gemessen und ausgewertet, um Rückschlüsse auf die photosynthetische Effizienz zu ziehen.

1.5 Carotinoide

Carotinoide sind ebenso wie die Chlorophylle akzessorische Photosynthesepigmente, deren Absorptionsspektrum im Strahlungsbereich zwischen 400 nm und 500 nm liegt. Dies entspricht im sichtbaren Licht dem Blau- bis Blaugrünbereich. (Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften 2014) Die Grünücke, die sich aus dem Absorptionsspektrum der Chlorophylle ergibt, wird dadurch eingeengt und die Strahlungsenergie für die Photosynthese besser ausgenutzt. Carotinoide sind in zwei Untergruppen zu unterteilen. Carotine, zu denen β -Carotin und Lycopin gehören, und Xanthophylle als oxidierte Form der Carotine mit den Vertretern Lutein, Neoxanthin sowie den ineinander umwandelbaren Violaxanthin, Antheraxanthin und Zeaxanthin.

Eine weitere wichtige Aufgabe der Carotinoide ist neben der Photosynthese der Schutz der Lichtsammelkomplexe vor oxidativem Stress durch Ableitung überschüssiger Energie, die während der lichtabhängigen Reaktion entsteht. Ein erhöhter Gehalt an Carotinoiden ist für die Stresstoleranz also wichtig und von Vorteil. (M. Havaux 1998) Wenn Energie absorbiert wird, der Energiebedarf der Photosynthese aber schon gedeckt ist, kann Chlorophyll im Singulett-Zustand ($^1\text{Chl}^*$) weiter in den Triplett-Zustand ($^3\text{Chl}^*$) übergehen. $^3\text{Chl}^*$ kann seine Energie dann auf Sauerstoff übertragen, wodurch reaktiver Singulett-Sauerstoff ($^1\text{O}_2^*$) und andere reaktive Sauerstoffspezies (ROS) entstehen, die Schäden an Proteinen, Lipiden und Pigmenten verursachen. Carotinoide können die Energie von $^3\text{Chl}^*$ und $^1\text{O}_2^*$ übernehmen und diese in Form von Wärme abgeben, wodurch alle Moleküle wieder in den Grundzustand versetzt werden.

Carotinoide, insbesondere Zeaxanthin (Zx), haben auch die Fähigkeit, mittels NPQ $^1\text{Chl}^*$ durch direkte Energiedissipation in den Grundzustand zu versetzen. Dadurch entstehen reaktive Sauerstoffspezies erst gar nicht und der Photosyntheseapparat ist besser geschützt. Jedoch steht die Löschung von $^1\text{Chl}^*$ in direkter Konkurrenz zur Photochemie und muss von der Pflanze streng reguliert werden. Der Xanthophyllzyklus beschreibt diesen Vorgang und wird im nächsten Kapitel näher ausgeführt.

1.6 Xanthophyllzyklus

Der Xanthophyllzyklus beschreibt die reversible De-Epoxidation von Violaxanthin über Antheraxanthin zu Zeaxanthin in den Chloroplasten. Katalysiert wird die De-Epoxidation der beiden Epoxidgruppen des Violaxanthin durch die Violaxanthin De-Epoxidase (VDE). VDE liegt bei höheren pH-Werten frei im Lumen der Chloroplasten vor und wird durch Protonierung bei niedrigem pH-Wert aktiviert. Dieser entsteht, wenn die Pflanze vollständig mit ATP versorgt ist und durch weitere Lichtenergie Protonen in das Lumen transloziert werden. VDE hat ein pH-Optimum von 5,2 und liegt dann membrangebunden vor.

Die Epoxidation ist durch Zeaxanthinepoxidase (ZE) katalysiert und läuft auf der Stromaseite der Chloroplasten bei einem pH-Optimum von 7,5 ab. Während die De-Epoxidation in wenigen Minuten abläuft, benötigt die Reaktion der Epoxidation 5-10 mal so viel Zeit (Demmig-Adams et al. 1996).

Zx kann $^1\text{Chl}^*$ deaktivieren und den Photosyntheseapparat durch Wärmedissipation vor Überlastung schützen. VDE ist durch den luminalen pH-Wert direkt reguliert und sorgt für einen optimalen Gehalt an Zx, sodass die Deaktivierung von $^1\text{Chl}^*$ nur bei Starklicht erfolgt.

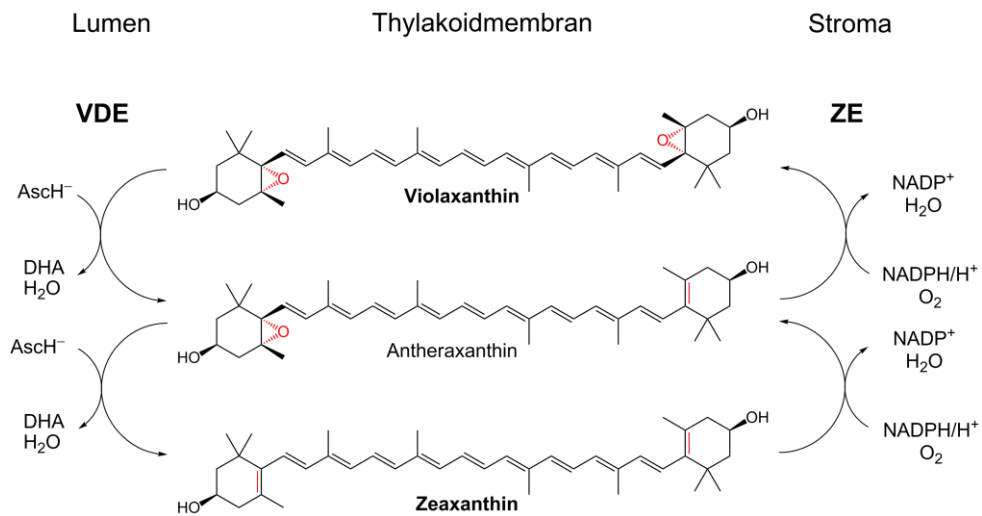


Abbildung 1: Umwandlungszustände des Xanthophyllzyklus

2 Material und Methoden

2.1 Material

Das verwendete Saatgut stammt aus den Zuchtversuchen des International Maize and Wheat Improvement Center (CYMMIT). In Zusammenarbeit mit CYMMIT wurden die zu untersuchenden Linien ausgewählt. Die verwendeten Linien für die Untersuchungen werden in dieser Arbeit mit ihrer jeweiligen Parzellennummer abgekürzt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Parzellennummer und Linienbeschreibung der für die Auswertung dieser Arbeit verwendeten Linien

Parzellennummer	Linienbeschreibung
9410 rot	CROC_1/AE.SQUARROSA (333)//2*KUTZ
9412 blau	SOKOLL/WBLL1/5/D67.2/PARANA 66.270//AE.SQUARROSA (320)/3/CUNNINGHAM/4/VORB

Zur Messung der Quantenausbeute und der Pigmentzusammensetzung wurden verschiedene Geräte verwendet. Diese sind in Tabelle 2 mit Typbezeichnung, Hersteller und Landessitz aufgelistet.

Tabelle 2: Verwendete Geräte zur Fluoreszenzmessung und Pigmentanalyse

Gerät	Typ	Hersteller	Sitz
Feinwaage	QUINTIX224-1S	Sartorius	Deutschland
Gas-Austausch-System	GFS-3000	WALZ	Deutschland
Hochleistungsflüssigkeitschromatograph		BISCHOFF Analystechnik und - geräte	Deutschland
Homogenisierer	FastPrep 24	MP Biomedicals	Deutschland
SPAD-Meter	502 plus	Konica minolta	Japan
Spektralphotometer	Infinite M200 Pro	Tecan	Österreich
Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessgerät	Tinytag TV-4505	Gemini Data Loggers	England
Zentrifuge	Biofuge fresco	Heraeus Instruments	Deutschland

2.2 Pflanzenanzucht

Die zwei ausgewählten Linien Sommerweizen wurden im Gewächshaus vorgezogen. Mit den Angaben zur Keimfähigkeit wurde die Anzahl an nötigen Samen berechnet, sodass 80 Samen jeder Linie zur Verfügung stehen. Die Weizenkaryopsen wurden auf mit Wasser getränktem Papier in Anzuchtschalen aus Plastik gelegt und mit einem Deckel verschlossen, der noch einen geringen Luftaustausch zulässt.

Nach der Keimung und dem anschließenden Austritt der Keimwurzel wurden pro Linie je drei Sämlinge in 1,5-Liter-Töpfe mit einem Mischungsverhältnis von 1:1 aus gesiebter Erde und Kompost umgepflanzt. Um ein zu schnelles Austrocknen zu verhindern, wurden alle Töpfe mit einer circa zwei Zentimeter dicken Schicht Kies bedeckt.

Die sich daraus ergebenden 24 Töpfe wurden bis zum Beginn der Behandlung regelmäßig und ausreichend gewässert und außerhalb der Behandlungskammern gelagert, um eine gleiche Entwicklung zu garantieren. Alle Töpfe erhielten am 36. DAT (Tag nach der Verpflanzung) eine Düngung mit 50 ml Yoshida-Lösung. Da während des Versuchs Komplikationen bei der Pflanzenanzucht auftraten, konnten für die Datenerhebung lediglich vier Töpfe pro Behandlung herangezogen werden.

2.3 Versuchsdesign

Die Töpfe wurden in einer Kammer aufgestellt und mehrmals randomisiert, um eine vollständig randomisierte Versuchsanlage aufzubauen. In der Kammer wurde mittels einer Nebelanlage eine erhöhte Luftfeuchtigkeit erzeugt. Durch eine Plastikfolie um die Kammer blieb die Luftfeuchte konstant. In der Kammer gab es bewässerte und trockengestresste Pflanzen. Trockengestresste Pflanzen erhielten keine Bewässerung mehr ab dem Zeitpunkt, zu dem sie in die Kammern gestellt wurden. Alle Töpfe wurden tagsüber von 6 Uhr bis 20 Uhr mit einer Natriumdampflampe mit $500 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ beleuchtet.

Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden ab Tag 12 DAT über die gesamte Versuchsdauer automatisch alle zehn Minuten mit einem Tinytag Plus 2 TGP-4500 gemessen. In Tabelle 2 sind die Mittelwerte sowie die Standardabweichung dieser Messwerte aufgelistet. Werte zwischen dem 30. Tag nach Verpflanzung und dem Beginn der Beprobung an Tag 40 DAT sind nicht mit einberechnet, da die Temperatur in der Kammer zu hoch war. Die Pflanzen befanden sich in diesem Zeitraum außerhalb der Kammer.

Tabelle 3: Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den Kammern mit hoher und niedriger Luftfeuchtigkeit bei Tag und Nacht

Temperatur		Luftfeuchtigkeit	
Tag	Nacht	Tag	Nacht
39,1 °C ± 5,8 °C	26,3 °C ± 2,9 °C	44,7 rH ± 15,6 rH	87,5 rH ± 16,5 rH

Aus Tabelle 2 ist außerdem zu entnehmen, dass die Wachstumsbedingungen in den Kammern mit einer Temperatur von ungefähr 40 °C aufgrund der Bedingungen im Gewächshaus suboptimal waren.

2.4 Behandlung

An DAT 40 begann die Behandlung und alle Töpfe wurden wieder zurück in die Kammer gestellt. An DAT 44 und DAT 47 erhielten die bewässerten Pflanzen 200 ml beziehungsweise 100 ml destilliertes Wasser. Da die unter Trockenstress gesetzten Pflanzen schon sichtbare Stressreaktionen zeigten, erhielten diese an DAT 47 ebenfalls 50 ml Wasser. Um den Einfluss von Lichtstress zu untersuchen, wurden die Linien 9410 und 9412 von Tag 47 bis 51 DAT mit einer Starklichtlampe mit $700-1000 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ bestrahlt. Beide waren bewässert und erhielten an Tag 49 DAT weitere 100 ml Wasser.

2.5 Messungen

Um zu überprüfen, ob die Behandlungen oder die genotypische Variation die photosynthetischen Quantenerträge beeinflussen, wurden Messungen der Chlorophyllfluoreszenz zu Beginn der Behandlung sowie 7 und 10 Tage nach Beginn der Behandlungen vorgenommen. Chlorophyll-Fluoreszenzmessungen wurden mit dem GFS-3000 von WALZ bei einer Lichtintensität von $1200 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ Lichtintensität an den Fahnenblättern jeder Pflanze gemessen.

Zusätzlich zur Messung der photosynthetischen Quantenausbeute in lichtexponierten Blättern ($\Delta F/F_m'$) wurde die maximale Quantenausbeute des PS II in dunkeladaptierten Blättern (F_v/F_m) an Tag 10 nach Beginn der Behandlung in Pflanzen gemessen, die einer HL-Behandlung ausgesetzt waren. Dafür wurden die Pflanzen vor der Probenahme

30 Minuten lang der Dunkelheit ausgesetzt, um sicherzustellen, dass alle PS II-Reaktionszentren geöffnet waren und alle Elektronen aus dem Elektronentransportsystem abgezogen wurden.

Darüber hinaus wurden bei jeder Chlorophyllfluoreszenzmessung für jedes getestete Blatt drei Messungen zur Bestimmung des Chlorophyllgehaltes mit dem Chlorophyllmessgerät SPAD-502 von Minolta durchgeführt und ein Mittelwert errechnet. Nach der zerstörungsfreien Messung wurden die jeweiligen Blätter abgeschnitten, in flüssigem Stickstoff eingefroren und bis zur weiteren Analyse bei 80 °C gelagert.

2.6 Pigmentanalyse mit HPLC

Die Pigmentanalyse wurde mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) durchgeführt. Die Blätter wurden gewogen und anschließend in Mikroröhrchen mit einem Volumen von 2 ml (Sarstedt, Deutschland) gegeben, die mit 500 µl gefiltertem Aceton und Keramikkügelchen gefüllt waren. Zur Trennung des Extraktes vom Rückstand wurden die Mikroröhrchen im FastPrep24 (MP Bio, Deutschland) homogenisiert und in der Biofuge fresco (Heraeus Instruments) bei 13.000 Umdrehungen pro Minute und 3 °C für 5 Minuten zentrifugiert. Das Extrakt wurde anschließend mit 0,45 µm Rotilabo Mini-Tip Spritzenvorsatzfiltern (Carl Roth GmbH + Co. KG, Deutschland) gefiltert. Dieses Verfahren wurde so oft wiederholt, bis in dem Rückstand keine Blattpigmente mehr sichtbar waren. Um in jeder Probe den gleichen Verdünnungsgrad zu garantieren, wurde das Extrakt über Nacht zur Verdunstung des Acetons unter einen Abzug gestellt und die Blattpigmente am folgenden Tag in 200 µl Aceton resuspendiert und bis zur Analyse mit der HPLC bei -18°C gelagert. Die HPLC-Analyse erfolgte mit der HPLC (BISCHOFF Analyse und Gerätetechnik GmbH, Deutschland). 20 µl der jeweiligen Probe wurden dafür in die Säule injiziert und über 20 Minuten bei 14 MPa analysiert. Zur Bestimmung der absoluten Menge der Pigmente in der jeweiligen Probe wurden Kalibrierungskurven für jedes Pigment verwendet. Hierfür wurden Standards des jeweiligen Pigments mit einer bekannten Konzentration in der HPLC analysiert und anschließend zur Berechnung der Regression der Kalibrierkurven verwendet. Für die statistische Auswertung sind die alle Werte in µmol/g angegeben.

2.7 Pigmentanalyse mit Spektralphotometrie

Im Anschluss an die HPLC-Analyse wurden die Proben spektralphotometrisch mittels Infinite M200 Pro (Tecan, Schweiz) auf ihren Gehalt an Chlorophyll *a*, Chlorophyll *b* und Gesamtgehalt an Carotinoide untersucht. Aus jeder Probe wurden 10 µl entnommen und in die Quarzcuvette des Infinite M200 Pro gegeben und mit 90 µl gefiltertem Aceton verdünnt und analysiert. Eine Referenzanalyse mit 100 µl Aceton wurde vor der Analyse zur Kalibrierung durchgeführt.

Die Auswahl der Wellenlängen von 470 nm für die Carotinoide, 645 nm für Chlorophyll *b* und 662 nm für Chlorophyll *a* beruht auf den Angaben von(Lichtenthaler und Wellburn 1983), ebenso wie die Formel zur Umrechnung der ausgegebenen Werte in µg/ml. Für die statistische Auswertung sind alle Werte in µmol/g angegeben.

2.8 Datenaufbereitung und statistische Analyse

Alle erhobenen Daten wurden mit Microsoft Excel (Version 2209) sortiert und aufbereitet. Die statistische Auswertung erfolgte mit R Version 4.2.1 sowie RStudio 2022.07.1. Tests auf Signifikanz wurden mit der Two-Way-Anova bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ durchgeführt. Als Post-hoc-Test kam der Tukey-HSD zum Einsatz. Die Voraussetzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität wurden durch visuelle Analyse der diagnostischen Residuen- und Quantil-Quantil-Plots überprüft (Kozak und Piepho 2018). Gezeigte Graphiken wurden in RStudio erstellt, Tabellen mit Microsoft Word (Version 2210).

3 Ergebnisse

3.1 SPAD-Werte

3.1.1 SPAD-Werte bei Trockenstress

Die SPAD-Werte des Genotypen 9410 unterschieden sich nicht zwischen Trockenstress und keinem Trockenstress, während der Wert für Genotyp 9412 bei Trockenstress signifikant niedriger liegt. Die SPAD-Werte innerhalb der Behandlungen zwischen den Genotypen waren nicht signifikant verschieden, wenn auch ein Trend erkennbar ist, dass Genotyp 9412 bei Trockenstress geringere SPAD-Werte aufweist als Genotyp 9410.

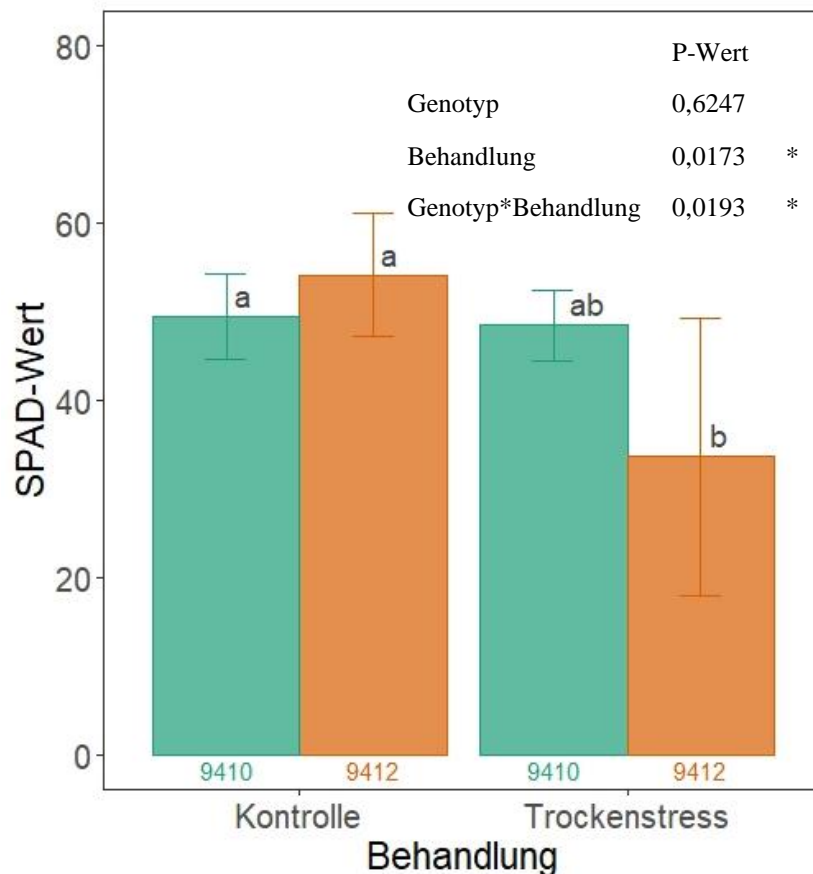


Abbildung 2: SPAD-Werte bei Trockenstress

Abgebildet sind die Mittelwerte der SPAD-Messungen der Behandlung mit Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. Aus dem Diagramm sind ebenfalls die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie deren Interaktion zu entnehmen. (n=4, two-way anova)

3.1.2 SPAD-Werte bei Lichtstress

Die SPAD-Werte zeigten bei Lichtstress keine signifikanten Unterschiede zwischen den Genotypen und zwischen den Behandlungen. Auch für die Interaktion zwischen Genotyp und Behandlung konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden.

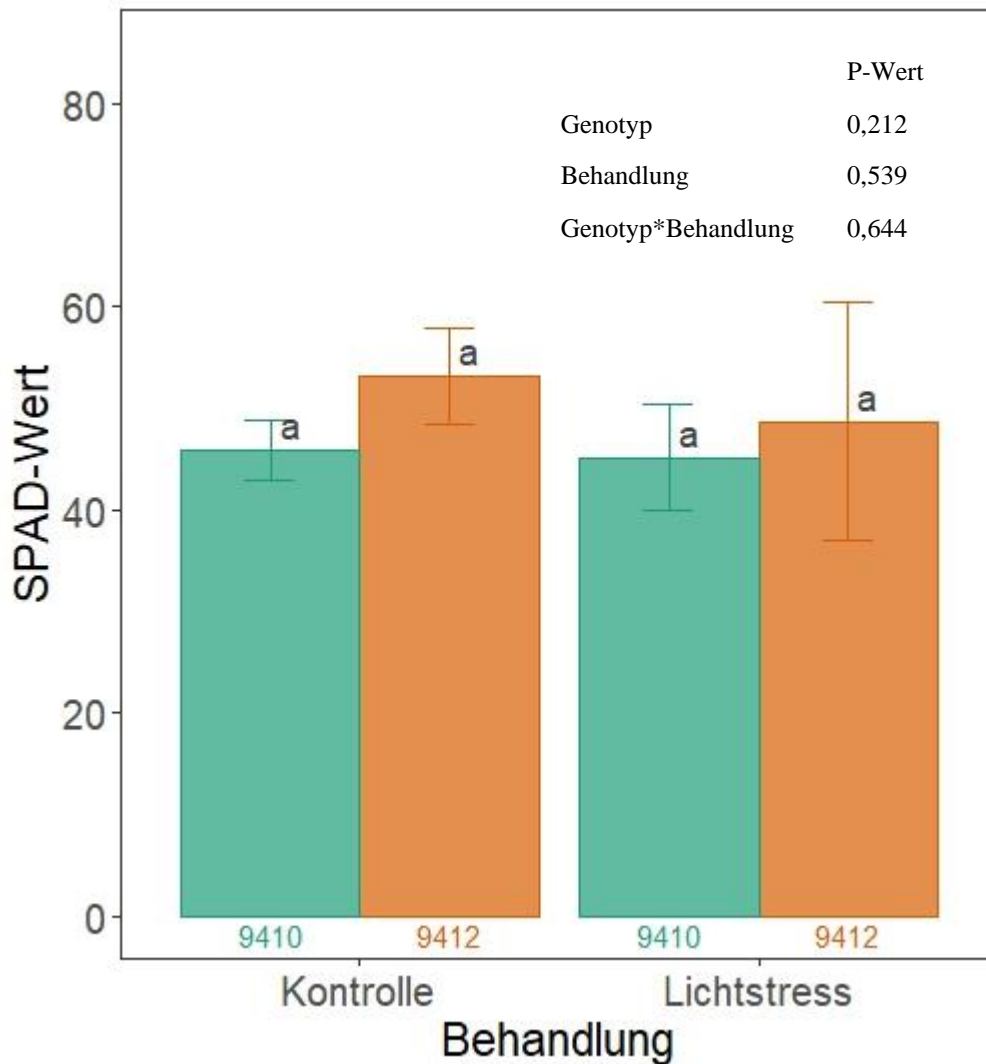


Abbildung 3: SPAD-Werte bei Lichtstress

Abgebildet sind die Mittelwerte der SPAD-Messungen der Behandlung mit Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. Aus dem Diagramm sind ebenfalls die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie deren Interaktion zu entnehmen. (n=4, two-way anova)

3.2 Quantenausbeute des Photosystems II

3.2.1 Quantenausbeute bei Trockenstress

Die Quantenausbeute des Photosystems II zeigte bei der statistischen Auswertung keine signifikanten Unterschiede, sowohl beim Vergleich der Genotypen, der Behandlungen und der Interaktion zwischen diesen. Der Genotyp 9412 wies bei Trockenstress mit 0,240 den niedrigsten Wert auf, konnte statistisch aber nicht von den restlichen Werten unterschieden werden.

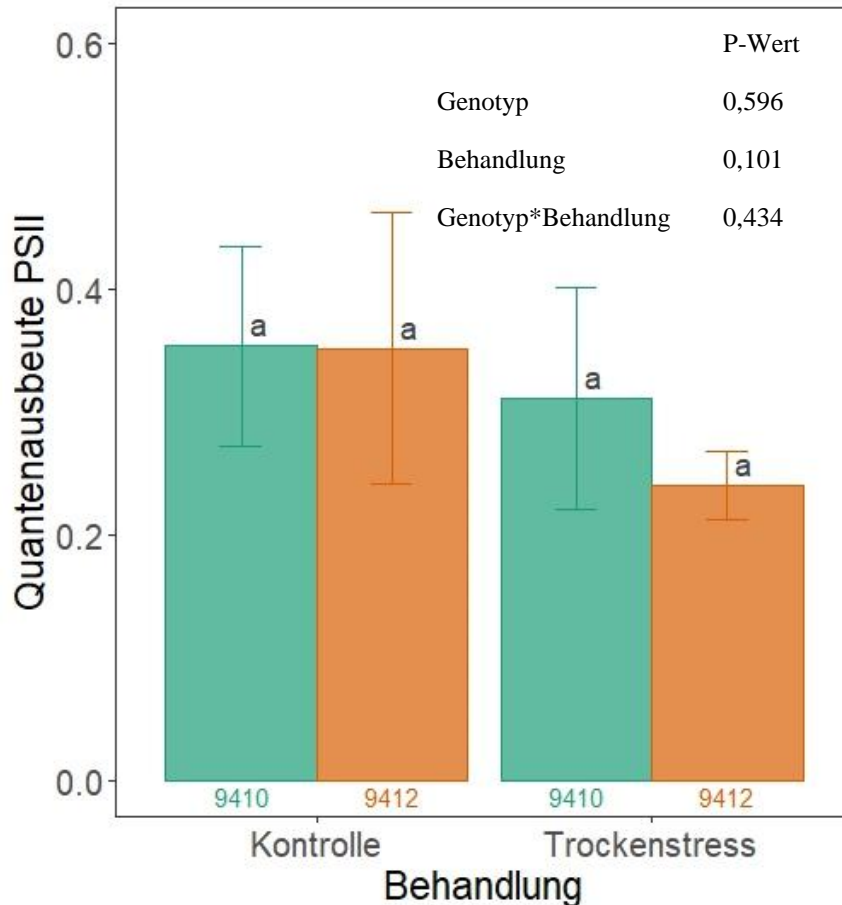


Abbildung 4: Quantenausbeute des PS II bei Trockenstress

Abgebildet sind die Mittelwerte der Quantenausbeute des Photosystems II der Behandlung mit Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. Aus dem Diagramm sind ebenfalls die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie deren Interaktion zu entnehmen. (n=4, two-way anova)

3.2.2 Quantenausbeute bei Lichtstress

Die Quantenausbeute des Photosystems II zeigte bei der statistischen Auswertung keine signifikanten Ergebnisse sowohl beim Vergleich der Genotypen, der Behandlungen und der Interaktion zwischen diesen.

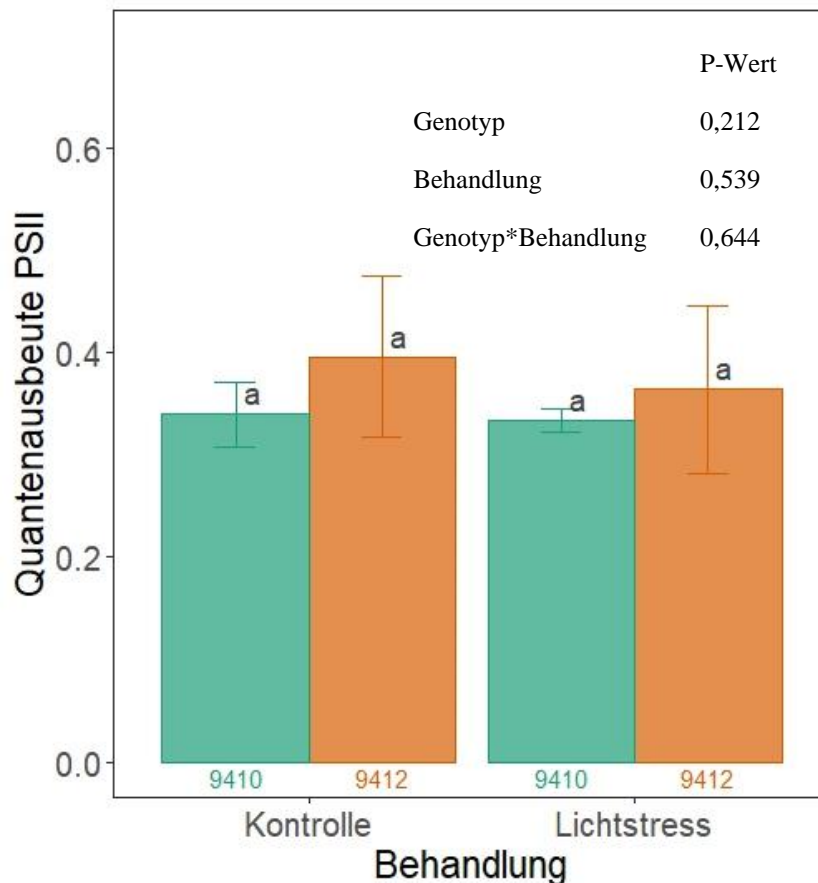


Abbildung 5: Quantenausbeute des PS II bei Lichtstress

Abgebildet sind die Mittelwerte der Quantenausbeute des Photosystems II der Behandlung mit Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. Aus dem Diagramm sind ebenfalls die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie deren Interaktion zu entnehmen. (n=4, two-way anova)

3.3 Pigmentanalyse Trockenstress

3.3.1 Gesamtgehalt Pigmente

Aus Abbildung 6 geht hervor, dass die Gesamtkonzentration der untersuchten Pigmente sich bei Genotyp 9412 zwischen Trockenstress und keinem Trockenstress signifikant unterscheiden. Bei Genotyp 9410 sind Unterschiede zwischen den Behandlungen nicht nachweisbar. Eine Interaktion zwischen Genotyp und Behandlung trat nicht auf.

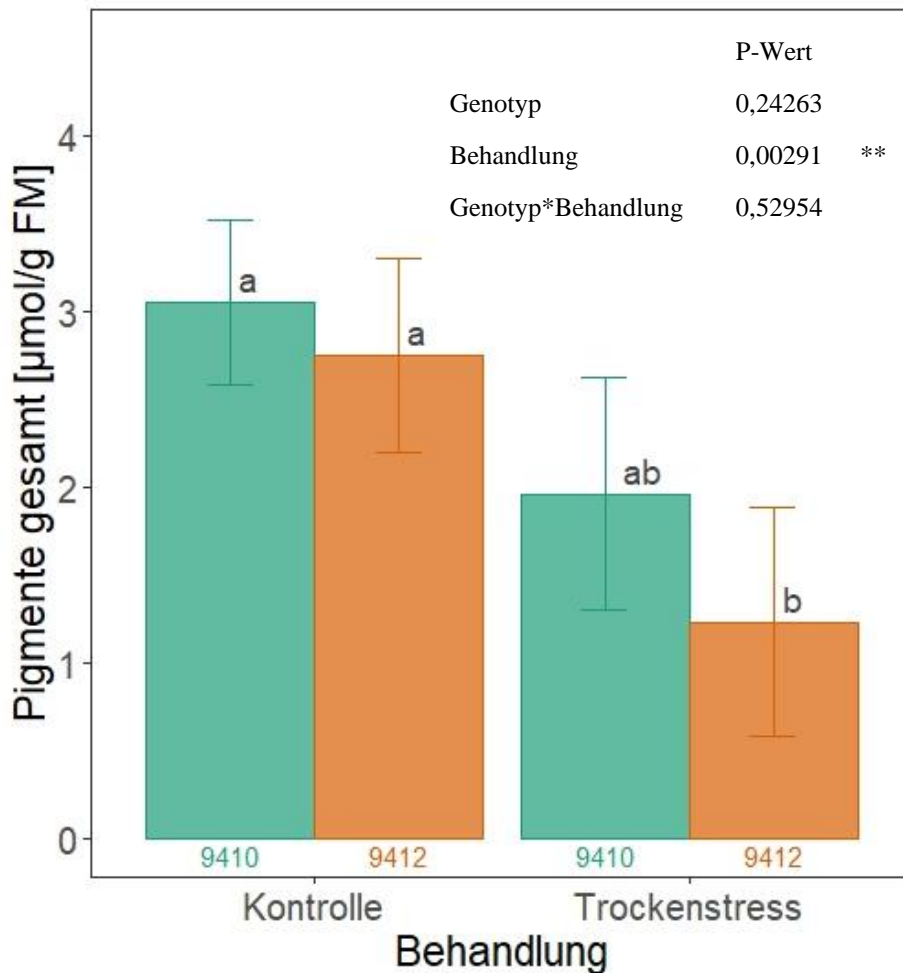


Abbildung 6: Gesamtgehalt der Pigmente bei Trockenstress

Abgebildet sind die Konzentrationen der Pigmente bei Behandlung mit Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion der beiden sind ebenfalls abgebildet. Aus dem Diagramm sind ebenfalls die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie deren Interaktion zu entnehmen. (n=4, two-way anova)

3.3.2 Chlorophylle

Die Konzentration von Chlorophyll *a* unterscheidet sich bei Genotyp 9412 zwischen Trockenstress und keinem Trockenstress signifikant. Bei Genotyp 9410 sind Unterschiede zwischen den Behandlungen nicht nachweisbar. Bei Chlorophyll *b* sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen, obwohl der P-Wert für die Behandlung signifikant ist. Jedoch nicht beim gleichen Genotyp, weshalb hierzu keine Aussage zu treffen ist.

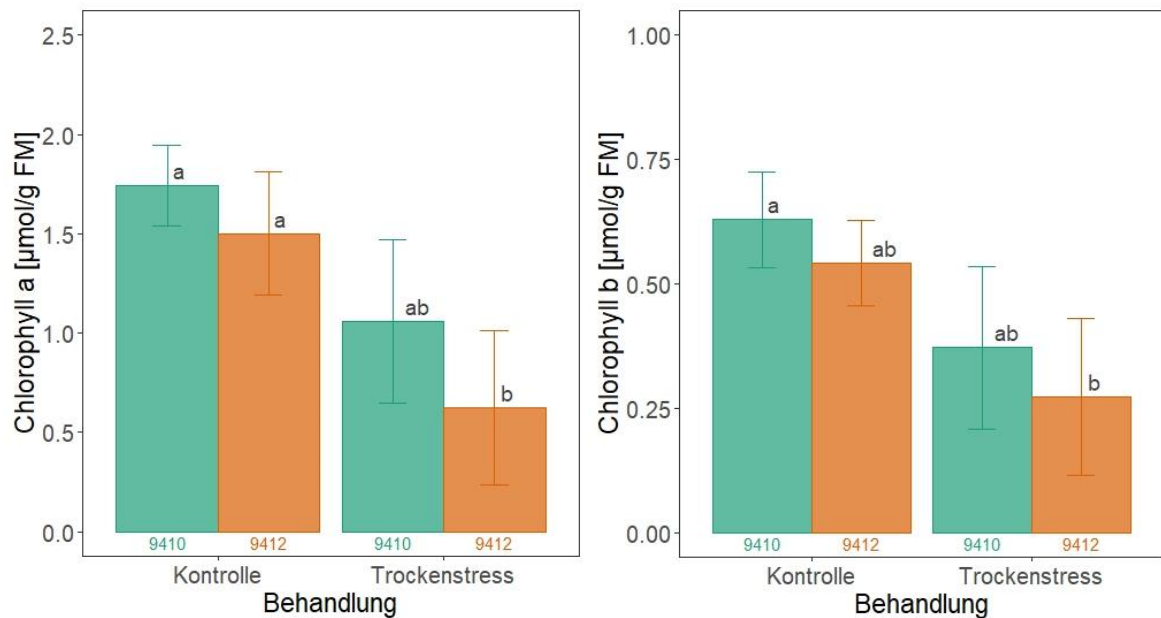


Abbildung 7: Chlorophyll a-Konzentration und Chlorophyll b-Konzentration bei Trockenstress

Abgebildet ist die Konzentrationen von Chlorophyll *a* (links) und Chlorophyll *b* (rechts) bei Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. (n=4, two-way anova) Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion sind wie folgt:

Chlorophyll a	P-Wert	
Genotyp	0.24263	
Behandlung	0.00291	**
Genotyp*Behandlung	0.52954	

Chlorophyll b	P-Wert	
Genotyp	0.31965	
Behandlung	0.00453	**
Genotyp*Behandlung	0.93310	

3.3.3 β -Carotin

Aus der Analyse von β -Carotin ergaben sich keine Unterschiede in der Pigmentkonzentration. Die Werte für die bewässerte Behandlung liegen zwar bei beiden Genotypen höher, jedoch sind sie nicht signifikant verschieden.

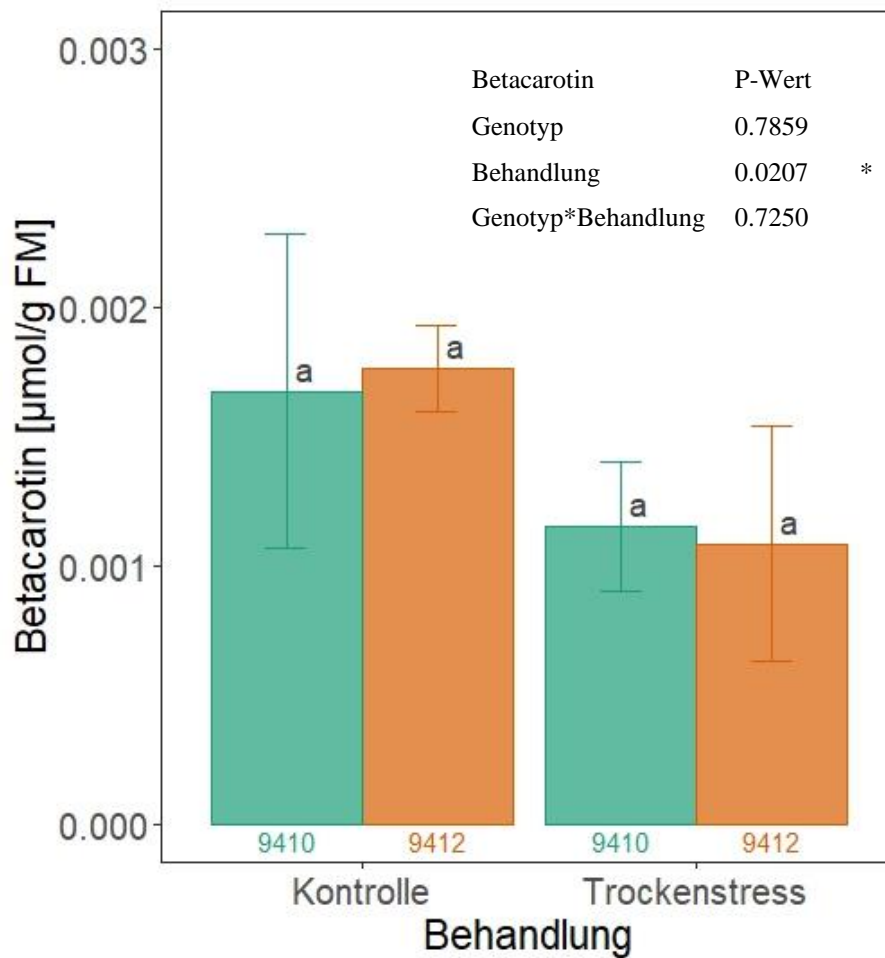


Abbildung 8: β -Carotin-Konzentration bei Trockenstress

Abgebildet ist die Konzentrationen von β -Carotin bei Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. ($n=4$, twoway anova) Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion sind ebenfalls abgebildet.

3.3.4 Antheraxanthin und Violaxanthin

Bei Antheraxanthin und Violaxanthin konnten für die Genotypen und für die Behandlung keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Die Violaxanthinkonzentration für 9412 bei Trockenstress beträgt nur ein Drittel verglichen mit der Kontrolle, der Standardfehler ist jedoch sehr hoch.

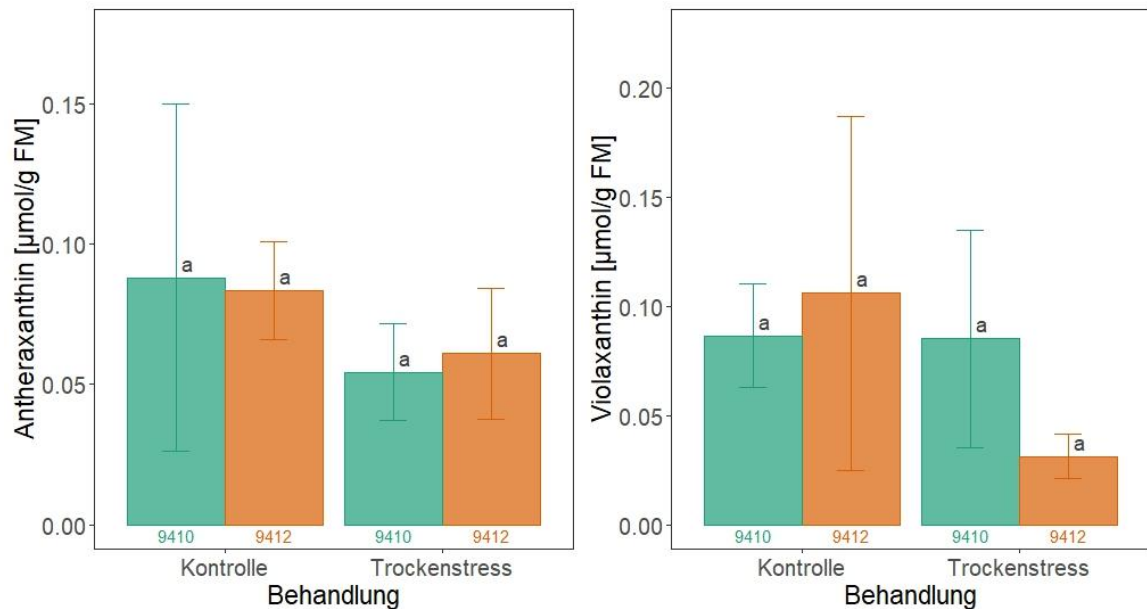


Abbildung 9: Antheraxanthin- und Violaxanthinkonzentration bei Trockenstress

Abgebildet sind die Konzentrationen von Antheraxanthin (links) und Violaxanthin (rechts) bei Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. (n=4, twoway anova) Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion sind wie folgt:

Antheraxanthin	P-Wert
Genotyp	0.892
Behandlung	0.174
Genotyp*Behandlung	0.773

Violaxanthin	P-Wert
Genotyp	0.700
Behandlung	0.209
Genotyp*Behandlung	0.252

3.3.5 Neoxanthin und Lutein

Die Konzentration für Neoxanthin bei Trockenstress liegen niedriger als bei der bewässerten Behandlung, jedoch konnten für die Genotypen und für die Behandlung keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Die Messungen des Luteingehaltes ergaben höhere Werte für die Kontrolle, die statistische Analyse ergab einen signifikant höheren Wert für Genotyp 9412. Die restlichen Werte sind nicht signifikant.

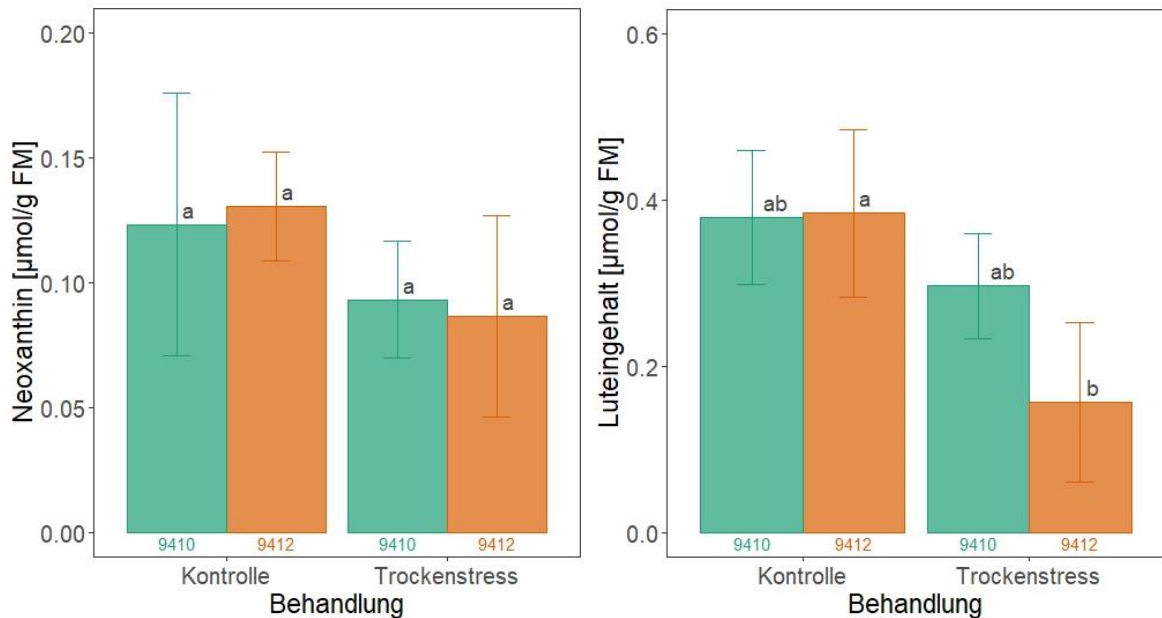


Abbildung 10: Neoxanthin- und Luteinkonzentration bei Trockenstress

Abgebildet sind die Konzentrationen von Neoxanthin (links) und Lutein (rechts) bei Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. (n=4, twoway anova) Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion sind wie folgt:

Neoxanthin	P-Wert
Genotyp	0.863
Behandlung	0.089
Genotyp*Behandlung	0.730

Lutein	P-Wert
Genotyp	0.32251
Behandlung	0.00996 **
Genotyp*Behandlung	0.17322

3.4 Pigmentanalyse Lichtstress

3.4.1 Gesamtgehalt Pigmente

Aus Abbildung 7 geht hervor, dass die Gesamtkonzentration der untersuchten Pigmente sich bei Genotyp 9410 und 9412 zwischen Lichtstress und keinem Lichtstress nicht signifikant unterscheiden. Ebenso sind Unterschiede zwischen den Behandlungen nicht nachweisbar.

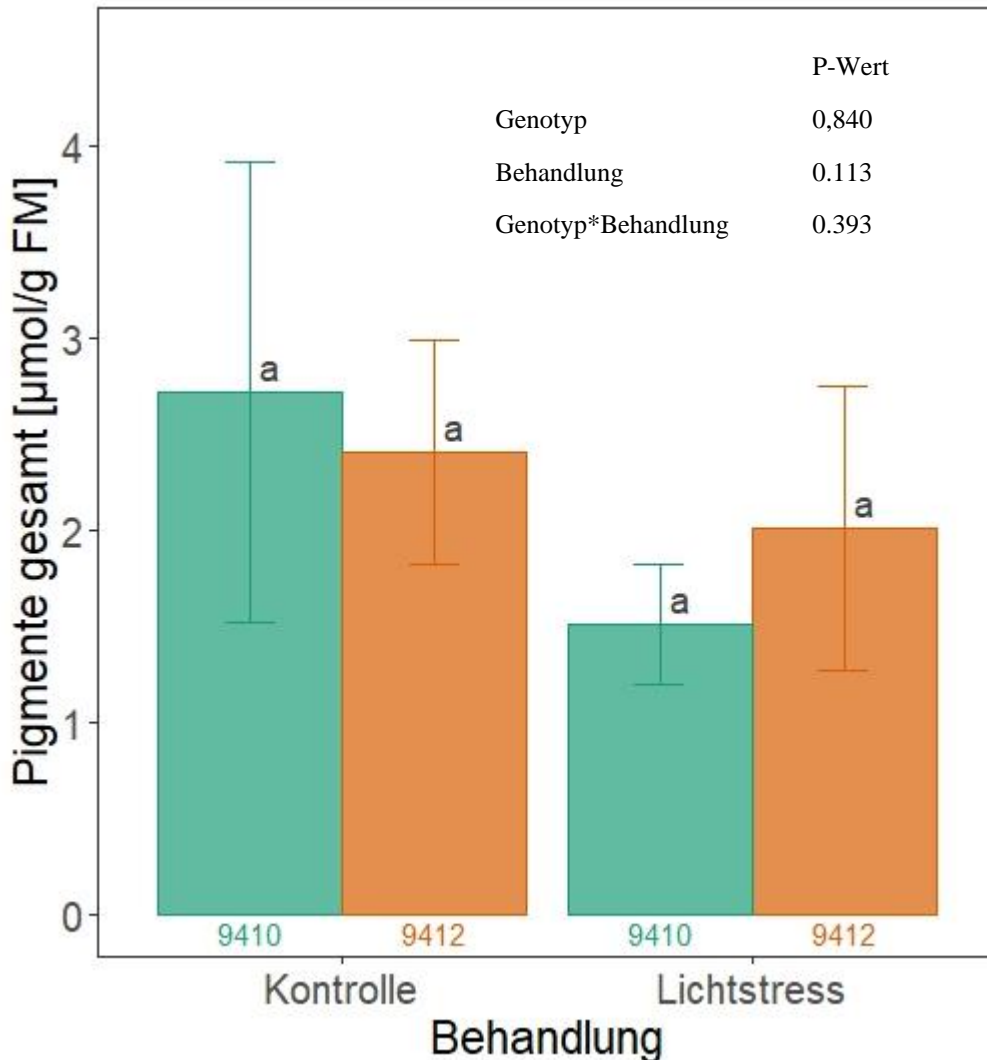


Abbildung 11: Gesamtgehalt der Pigmente bei Lichtstress

Abgebildet sind die Konzentrationen der Pigmente bei Behandlung mit Lichtstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion der beiden sind ebenfalls abgebildet. (n=4, twoway anova)

3.4.2 Chlorophylle

Die Konzentrationen von Chlorophyll *a* und Chlorophyll *b* sind bei Genotyp 9410 und Genotyp 9412 bei Lichtstress niedriger als bei der Behandlung ohne Lichtstress. Die statistische Auswertung zeigt aber keine signifikanten Unterschiede. Während bei der Kontrolle die Werte des Genotyp 9410 höher sind, ist es bei Lichtstress umgekehrt, 9412 weist bei Chlorophyll *a* und Chlorophyll *b* die höheren Werte auf.

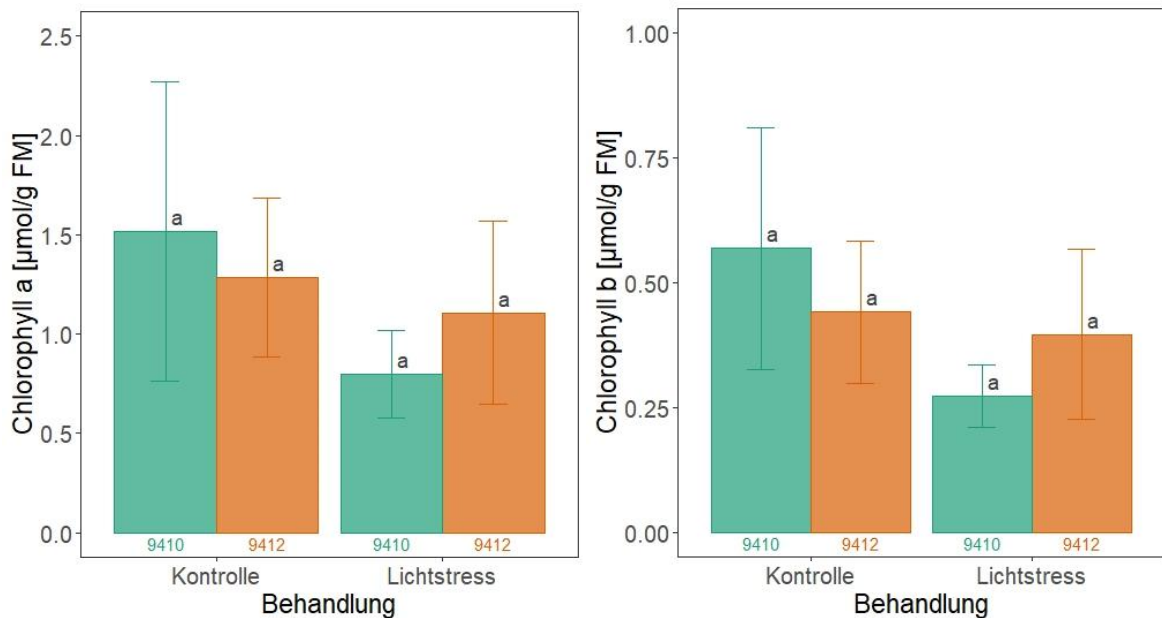


Abbildung 12: Chlorophyll a- und Chlorophyll b-Konzentration bei Lichtstress

Abgebildet ist die Konzentrationen von Chlorophyll *a* (links) und Chlorophyll *b* (rechts) bei Lichtstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. ($n=4$, two-way anova) Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion sind wie folgt:

Chlorophyll a	P-Wert
Genotyp	0.893
Behandlung	0.157
Genotyp*Behandlung	0.376

Chlorophyll b	P-Wert
Genotyp	0.984
Behandlung	0.115
Genotyp*Behandlung	0.230

3.4.3 β -Carotin

Aus der Analyse von β -Carotin ergaben sich höhere Werte für Genotyp 9412. Außerdem sind die Werte für die Kontrolle bei beiden Genotypen höher. Jedoch wurde statistisch nirgendwo ein signifikanter Unterschied nachgewiesen.

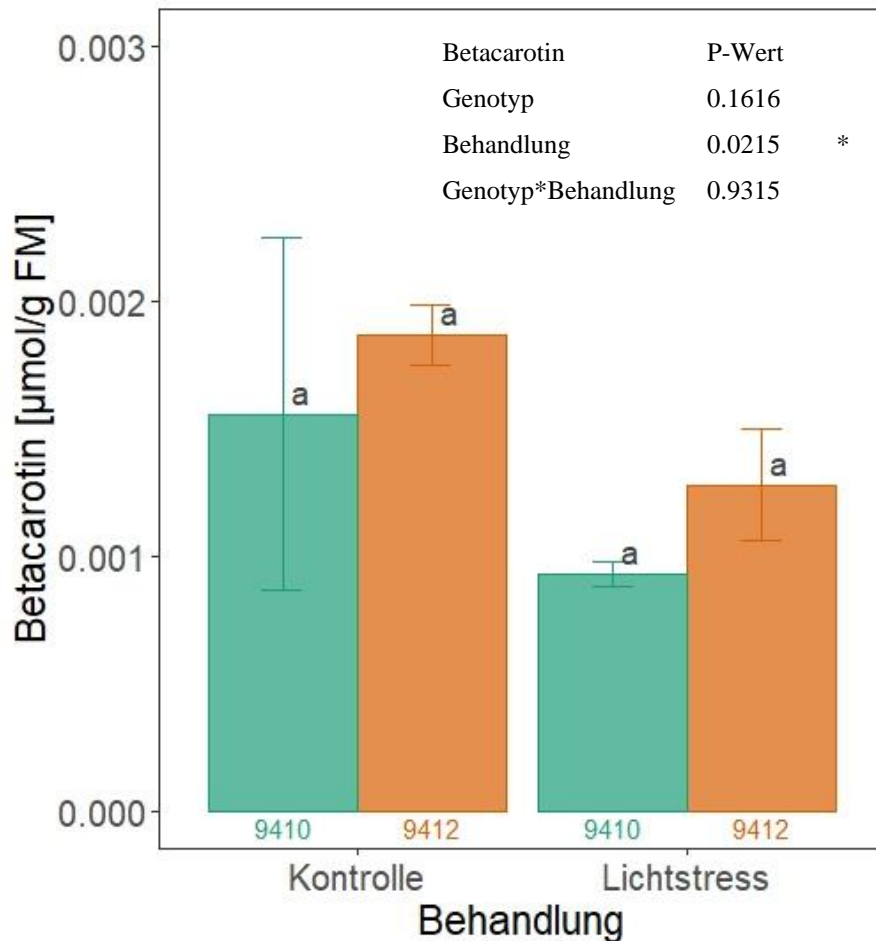


Abbildung 13: β -Carotin-Konzentration bei Lichtstress

Abgebildet sind die Konzentrationen von Betacarotin bei Lichtstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion sind ebenfalls abgebildet. (n=4, twoway anova)

3.4.4 Antheraxanthin und Violaxanthin

Bei Antheraxanthin und Violaxanthin konnten für die Genotypen und für die Behandlung unter Lichtstress keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

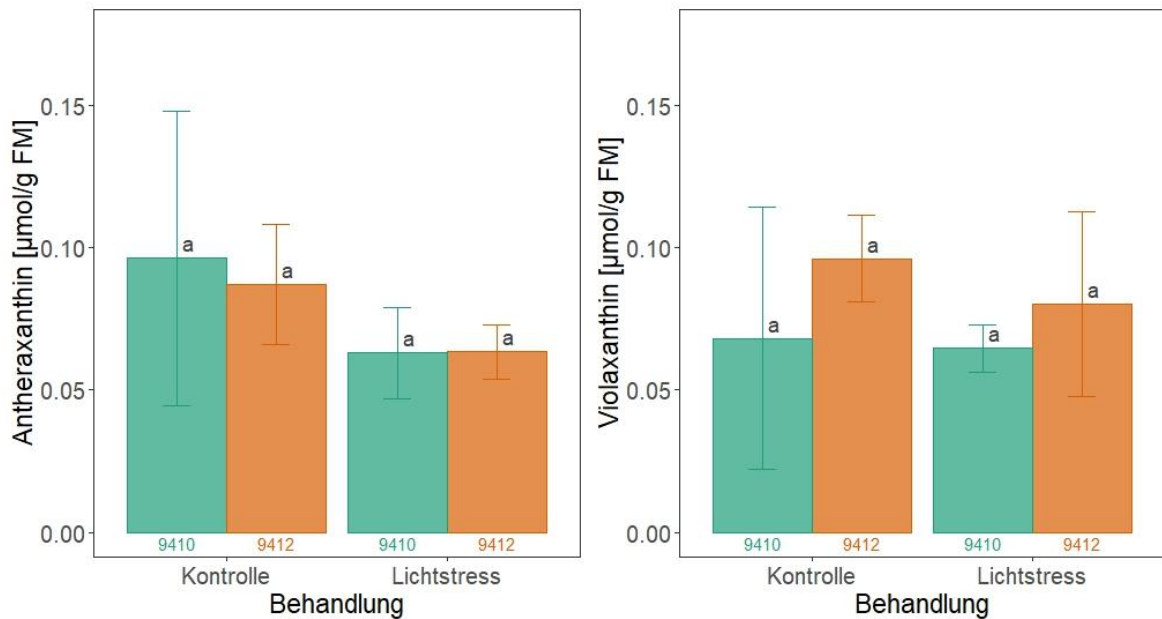


Abbildung 14: Antheraxanthin- und Violaxanthinkonzentration bei Lichtstress

Abgebildet sind die Konzentrationen von Antheraxanthin (links) und Violaxanthin (rechts) bei Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. (n=4, twoway anova) Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion sind wie folgt:

Antheraxanthin	P-Wert
Genotyp	0.802
Behandlung	0.132
Genotyp*Behandlung	0.783

Violaxanthin	P-Wert
Genotyp	0.238
Behandlung	0.580
Genotyp*Behandlung	0.724

3.4.5 Neoxanthin und Lutein

Die Konzentrationen für Neoxanthin und Lutein bei Lichtstress liegen niedriger als bei der Kontrolle, jedoch konnten für die Genotypen und für die Behandlung keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

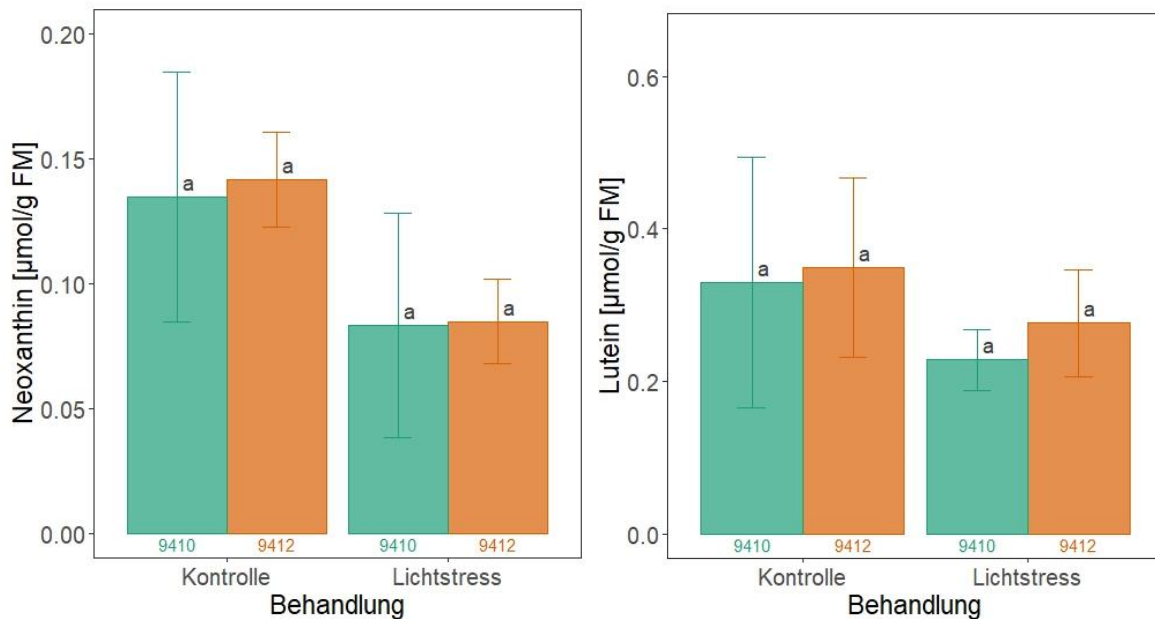


Abbildung 15: Neoxanthin- und Luteinkonzentration bei Lichtstress

Abgebildet sind die Konzentrationen von Neoxanthin und Lutein bei Trockenstress sowie die dazugehörigen Fehlerbalken. Genotypen und Behandlungen, denen unterschiedliche Buchstaben zugeordnet sind, sind signifikant voneinander verschieden bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte nicht signifikant voneinander unterscheiden. ($n=4$, twoway anova) Die P-Werte für die Genotypen, die Behandlung sowie die Interaktion sind wie folgt:

Neoxanthin	P-Wert
Genotyp	0.863
Behandlung	0.089
Genotyp*Behandlung	0.730

Lutein	P-Wert
Genotyp	0.604
Behandlung	0.203
Genotyp*Behandlung	0.824

3.5 Korrelationen

Um Pigmentkonzentration, SPAD-Werte und Quantenausbeute des PS II auf Interaktionen zu prüfen, wurden Pearson'sche Produkt-Moment-Korrelationen gerechnet. Die p-Werte und der Korrelationskoeffizient sind in den folgenden Tabellen aufgelistet. Korrelationswerte von Trockenstress (Tabelle 3) und Lichtstress (Tabelle 4) wurden getrennt aufgelistet.

Für Trockenstress konnte bei der PS II-Quantenausbeute keine Beziehung zum SPAD-Wert und der Chlorophyll- sowie Carotinoidkonzentration festgestellt werden. Jedoch ist der Chlorophyllgehalt positiv mit dem SPAD-Wert sowie allen Pigmenten bis auf Violaxanthin und Antheraxanthin korreliert.

Tabelle 4: Pearsonsche Produkt-Moment-Korrelation der Behandlungen bei Trockenstress. P-Werte unter 0,05 zeigen eine signifikante Korrelation der Parameter an

Korrelationsparameter 1	Korrelationsparameter 2	p-Wert	Korrelationskoeffizient r
PS II-Quantenausbeute	SPAD	0,5714	0,1732
PS II-Quantenausbeute	Chlorophyll-Konzentration	0,416	0,2469
PS II-Quantenausbeute	Carotinoid-Konzentration	0,7159	-0,1119
Chlorophyll-Konzentration	SPAD	0,0008954	0,8052
Chlorophyll-Konzentration	Carotinoid-Konzentration	0,0003688	0,8361
Chlorophyll-Konzentration	β-Carotin-Konzentration	0,000451	0,8296
Chlorophyll-Konzentration	Lutein-Konzentration	6,277 e ⁻⁵	0,8832
Chlorophyll-Konzentration	Neoxanthin-Konzentration	0,004516	0,7311
Chlorophyll-Konzentration	Violaxanthin-Konzentration	0,1158	0,4576
Chlorophyll-Konzentration	Antheraxanthin-Konzentration	0,1034	0,4719

Bei Lichtstress konnte für die PSII-Quantenausbeute ebenfalls keine Beziehung zum SPAD-Wert und der Chlorophyll- sowie Gesamtcarotinoidkonzentration festgestellt werden. Eine Beziehung zwischen Chlorophyllgehalt und SPAD-Wert war nicht nachzuweisen. Wie bei Trockenstress sind aber alle Pigmente bis auf Violaxanthin und Antheraxanthin positiv mit der Chlorophyllkonzentration korreliert.

Tabelle 5: Pearsonsche Produkt-Moment-Korrelation der Behandlungen bei Lichtstress. P-Werte unter 0,05 zeigen eine signifikante Korrelation der Parameter an

Korrelationsparameter 1	Korrelationsparameter 2	p-Wert	Korrelationskoeffizient r
PS II-Quantenausbeute	SPAD	0,072	0,5366
PS II-Quantenausbeute	Chlorophyll-Konzentration	0,901	0,0400
PS II-Quantenausbeute	Carotinoid-Konzentration	0,541	0,1933
Chlorophyll-Konzentration	SPAD	0,105	0,4911
Chlorophyll-Konzentration	Carotinoid-Konzentration	0,0034	0,7687
Chlorophyll-Konzentration	β -Carotin-Konzentration	0,0057	0,7422
Chlorophyll-Konzentration	Lutein-Konzentration	0,012	0,6937
Chlorophyll-Konzentration	Neoxanthin-Konzentration	0,029	0,6245
Chlorophyll-Konzentration	Violaxanthin-Konzentration	0,408	0,2632
Chlorophyll-Konzentration	Antheraxanthin-Konzentration	0,069	0,5415

4 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus Kapitel 3 erklärt und in den wissenschaftlichen Kontext eingebunden. Die Ergebnisse der SPAD-Werte und Quantenausbeute des PS II werden dabei zuerst behandelt, bevor die Werte der Pigmentanalyse in Zusammenhang gestellt werden. Trockenstress und Lichtstress werden nicht mehr in separaten Kapiteln behandelt, die Ergebnisse sind in den übergeordneten Kapiteln zusammengefasst.

4.1 SPAD-Wert

Die Ergebnisse der SPAD-Messung bei Trockenstress ergaben einen signifikant niedrigeren Wert bei Trockenstress als bei der Kontrolle für den Genotyp 9412. Die Werte des Genotyp 9410 unterschieden sich zwischen den Behandlungen nicht signifikant. Da der SPAD-Wert den Chlorophyllgehalt einer Pflanze misst, kann man davon ausgehen, dass bei höheren Werten und dem daraus folgenden höheren Chlorophyllgehalt die photosynthetische Aktivität gesteigert ist. Die positive Korrelation zwischen SPAD-Wert und dem analysierten Chlorophyllgehalt mittels Spektrophotometrie war signifikant, was den Zusammenhang bestätigt. Aus dem vorliegenden Ergebnis könnte man schlussfolgern, dass Genotyp 9410 besser an Trockenstress angepasst ist, da dessen Wert bei Trockenstress fast unverändert blieb und nicht abgesunken ist. Schafft es eine Pflanze, ihren Chlorophyllgehalt lange aufrecht zu erhalten, so ist dies eine gute Eigenschaft, um unter Stressbedingungen noch effektiv Photosynthese zu betreiben und leistungsfähig zu bleiben. Diese Stay-Green-Eigenschaft ist auch für die Züchtung ein wichtiges Merkmal (Jocković et al. 2022).

Bei den SPAD-Werten für Lichtstress waren tendenziell die gleichen Ergebnisse zu sehen, allerdings ohne Signifikanz. Der SPAD-Wert des Genotyp 9410 liegt zwar insgesamt niedriger, bleibt unter Stressbedingungen aber konstant, was auf eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen Stressbedingungen schließen lässt. Da die Standardfehler bei allen Messungen sehr hoch liegen, wäre eine Wiederholung des Versuches mit größerer Stichprobenanzahl sinnvoll, um die Standardfehler zu minimieren und mehr signifikante Ergebnisse zu erhalten. Bei einer höheren Stichprobengröße wäre wahrscheinlich auch die Korrelation zwischen Chlorophyllgehalt und SPAD-Wert signifikant.

4.2 Quantenausbeute des PS II

Die Quantenausbeute des PS II unterschied sich nicht zwischen den Genotypen und den Behandlungen, ebenfalls ließ sich bei der Two-Way-ANOVA keine Interaktion feststellen. Dies gilt sowohl für Trockenstress als auch für Lichtstress. Leichte Tendenzen sind dennoch zu erkennen. So lag der Mittelwert für Genotyp 9412 bei Trockenstress circa 30 % niedriger als bei der bewässerten Variante. Lu und Zhang (1999) konnten bei Wasserstress und Lichtstress eine verringerte Quantenausbeute im PS II feststellen. Dass bei diesem Versuch keine Signifikanz nachgewiesen werden konnte, liegt möglicherweise an der geringen Stichprobenanzahl. Der tendenzielle Rückgang der Quantenausbeute würde sich dann auch durch die Wechselwirkung zwischen Photochemie, Fluoreszenz und Wärmedissipation erklären lassen, da diese in direkter Konkurrenz zueinander stehen und die Pflanze sich unter Stressbedingungen vermehrt auf die Abwehr der Stressoren konzentriert (Dusan Lazar 2016; Strasser et al. 2004). Die Korrelationen zwischen PS II-Quantenausbeute und SPAD-Wert sowie der PS II-Quantenausbeute und Chlorophyllgehalt sind nicht signifikant, obwohl ein Rückgang des Chlorophyllgehaltes mit einer verringerten Photosyntheseleistung und der damit verbundenen PS II-Quantenausbeute einhergehen sollte. Li et al. (2006) konnte in Untersuchungen diesen Rückgang der Fluoreszenzmesswerte und des Chlorophyllgehaltes unter Stress nachweisen. Eine mögliche Erklärung für die nicht signifikante Korrelation zwischen Quantenausbeute und Chlorophyllgehalt ist abermals die geringe Stichprobengröße.

4.3 Pigmente

4.3.1 Chlorophylle

Die Ergebnisse der Chlorophyllanalyse zeigten nur einen signifikant niedrigeren Chlorophyll *a*-Gehalt für Genotyp 9412 bei Trockenstress. Bei Chlorophyll *b* konnte dies nicht nachgewiesen werden, die Konzentration liegt aber auch hier niedriger. Unter Lichtstress gab es keine Unterschiede in der Chlorophyllkonzentration. Ursache für die niedrigeren Werte ist der Abbau des Chlorophylls durch Photooxidation unter Stressbedingungen (Powles 1984), denn unter Anwesenheit von ROS und $^3\text{Chl}^*$ degradiert Chlorophyll schneller, sodass die Konzentration geringer ist (Behera und Choudhury 2001). Für die Pflanzen ist ein höherer Chlorophyllgehalt von Vorteil, da mehr Photosynthese betrieben werden kann. Deshalb schneidet Genotyp 9410 besser ab, da dieser die Chlorophyllkonzentration unter Stressbedingungen besser aufrechterhalten kann.

4.3.2 β -Carotin

Sowohl bei Trockenstress als auch bei Lichtstress lagen die β -Carotin-Konzentrationen der Kontrolle höher als unter Stressbedingungen, wenn auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen und den Genotypen nachgewiesen werden konnten.

Die Korrelation zwischen Chlorophyllgehalt und β -Carotin war stark signifikant mit einem Korrelationskoeffizient von $r=0,83$ bei Trockenstress beziehungsweise $r=0,74$ bei Lichtstress. Eine Erklärung kann die Schutz- und Erhaltungsfunktion von β -Carotin für den photochemischen Prozesses liefern, da β -Carotin vor allem die Deaktivierung von $^1O_2^*$ übernimmt. Je mehr Chlorophyll vorhanden ist, desto mehr β -Carotin wird als Antioxidans benötigt, um die entstehenden Sauerstoffradikale zu eliminieren. (Farooq et al. 2009b; M. Havaux 1998; Telfer 2002)

4.3.3 Violaxanthin und Antheraxanthin

Violaxanthin und Antheraxanthin wiesen unter Licht- und Trockenstress ähnliche Ergebnisse auf. Signifikanzen konnten aber für keine Behandlung nachgewiesen werden. Die Antheraxanthingehalte nahmen bei beiden Genotypen ab. Die Konzentration für Violaxanthin bei Genotyp 9410 blieb fast unverändert, während unter Trockenstress bei Genotyp 9412 der Wert rapide abfiel. Anzumerken sind die großen Standardfehler, die vermutlich auf die geringe Stichprobengröße rückzuführen sind und eine mögliche Ursache für die nicht aussagekräftigen Ergebnisse sind. Die Korrelation zwischen Chlorophyllgehalt und Violaxanthin sowie die Korrelation zwischen Chlorophyll und Antheraxanthin sind sowohl bei Trockenstress als auch bei Lichtstress nicht signifikant. Auch dies könnte auf die Stichprobengröße zurückzuführen sein.

4.3.4 Neoxanthin

Die Auswertung der Pigmentanalyse ergab für Neoxanthin keine signifikanten Unterschiede. Verglichen mit den Kontrollvarianten lagen die Werte der Stressbehandlung um 40 % niedriger. Da die Standardfehler relativ groß sind, könnten mit einer höheren Stichprobenanzahl möglicherweise Signifikanzen nachgewiesen werden. Die Rolle von Neoxanthin in der Pflanze ist vielseitig. Zum einen ist die strukturelle und lichtsammelnde Funktion im LHC eine der wichtigen Aufgaben des Neoxanthin. Weiter dient es als Schutzpigment vor ROS, wobei es zwar nicht direkt an der Löschung von $^3\text{Chl}^*$ beteiligt ist, aber durch die Bindung am LHC-Protein den Kontakt von Sauerstoff mit $^3\text{Chl}^*$ und somit der Bildung von $^1\text{O}_2^*$ verhindert. (Ballottari et al. 2013; Demmig-Adams und Adams 1992)

Die Auswertung der Korrelation zwischen Chlorophyll und Neoxanthin wies für Trockenstress und Lichtstress Signifikanzen auf. Eine erhöhte Konzentration an Chlorophyll begünstigt die Entstehung von Sauerstoffradikalen und könnte die Neoxanthinkonzentration erhöhen um der Bildung von ROS entgegenzuwirken (Demmig-Adams und Adams 1992).

4.3.5 Lutein

Lutein ist für die Stabilität der Antennenpigmente mitverantwortlich und nach den Chlorophyllen das häufigste Pigment im LHC. Es ist an der Lichtsammlung beteiligt und deaktiviert als Schutzpigment vor allem $^3\text{Chl}^*$. (Jahns und Holzwarth 2012). Ein signifikanter Abfall der Luteinkonzentration bei Trockenstress wurde für Genotyp 9412 nachgewiesen. Die Aufrechterhaltung einer höheren Menge an Lutein weist auf einen verbesserten Schutz vor oxidativer Schädigung hin, woraus man auf einen möglichen Vorteil von Genotyp 9410 schließen kann, da dessen Luteinkonzentration keinen signifikanten Unterschied unter Trockenstress aufwies (Demmig-Adams et al. 1996). Für Lichtstress lässt sich dieses Ergebnis allerdings nicht bestätigen. Signifikant hingegen ist die Korrelation zwischen der Chlorophyll- und Luteinkonzentration. Für Trockenstress mit einem Korrelationskoeffizienten von $r=0,88$ stärker als bei Lichtstress mit $r=0,69$. Eine Erklärungsmöglichkeit wäre, dass bei höherem Chlorophyllgehalt mehr Möglichkeiten zur Entstehung von $^3\text{Chl}^*$ bestehen und somit mehr Lutein für die Deaktivierung produziert wird (Demmig-Adams et al. 1999).

5 Fazit und Verbesserungsvorschläge

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen bodenbürtiger Dürre sowie hoher Lichtintensität auf die Photosyntheseleistung und die Pigmentzusammensetzung der Fahnenblätter der Weizengenotypen 9410 und 9412 zu ermitteln. Signifikante Unterschiede wurden in dieser Arbeit dargestellt und wissenschaftlich ausgewertet. Bei Trockenstress hob sich besonders der Genotyp 9410 bei den SPAD-Werten und in der Pigmentanalyse hervor und sollte für die Züchtungen weiter untersucht werden. Um die Ergebnisse zu bestätigen, sollte bei einer Wiederholung des Versuches eine größere Stichprobenanzahl gewählt werden, um statistisch aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten. Beim Versuchsdesign sind neben größeren Töpfen gegen zu schnelles austrocknen vor allem die Temperaturbedingungen im Gewächshaus besser zu kontrollieren, sodass die Ergebnisse nicht durch Temperatureinflüsse verfälscht und die zu untersuchenden Behandlungen klar voneinander getrennt und ausgewertet werden können.

6 Literaturverzeichnis

- Ali, Shahzad; Xu, Yue-yue; Ma, Xiang-cheng; Jia, Qian-min; Jia, Zhi-kuan (2022): Improvement in winter wheat productivity through regulating PSII photochemistry, photosynthesis and chlorophyll fluorescence under deficit irrigation conditions. In: *Journal of Integrative Agriculture* 21 (3), S. 654–665. DOI: 10.1016/S2095-3119(20)63409-8.
- Behera, Rajendra K.; Choudhury, Nakul K. (2001): Photosynthetic Characteristics of Chloroplasts of Primary Wheat Leaves Grown under Different Irradiance. In: *Photosynthetica* 39 (1), S. 11–15. DOI: 10.1023/A:1012475331318.
- Daryanto, Stefani; Wang, Lixin; Jacinthe, Pierre-André (2016): Global Synthesis of Drought Effects on Maize and Wheat Production. In: *PLOS ONE* 11 (5), e0156362. DOI: 10.1371/journal.pone.0156362.
- Demmig-Adams, B.; Adams, W. W. (1992): Photoprotection and Other Responses of Plants to High Light Stress. In: *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol.* 43 (1), S. 599–626. DOI: 10.1146/annurev.pp.43.060192.003123.
- Demmig-Adams, B.; Gilmore, A. M.; Adams, W. W. (1996): Carotenoids 3: in vivo function of carotenoids in higher plants. In: *FASEB journal : official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology* 10 (4), S. 403–412. DOI: 10.1096/fasebj.10.4.8647339.
- Demmig-Adams, Barbara; Adams, William W.; Ebbert, Volker; Logan, Barry A. (1999): Ecophysiology of the Xanthophyll Cycle. In: *The Photochemistry of Carotenoids*: Springer, Dordrecht, S. 245–269. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-48209-6_14.
- Dusan Lazar (2016): A word or two about chlorophyll fluorescence and its relation to photosynthesis research. A text for Ph.D. students.
- Evans, John R. (2013): Improving photosynthesis. In: *Plant Physiol* 162 (4), S. 1780–1793. DOI: 10.1104/pp.113.219006.
- Farooq, M.; Wahid, A.; Kobayashi, N.; Fujita, D.; Basra, S. M. A. (2009a): Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In: *Agron. Sustain. Dev.* 29 (1), S. 185–212. DOI: 10.1051/agro:2008021.
- Farooq, M.; Wahid, A.; Kobayashi, N.; Fujita, D.; Basra, S. M. A. (2009b): Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In: *Agron. Sustain. Dev.* 29 (1), S. 185–212. DOI: 10.1051/agro:2008021.
- Heinrich Krause, G.; Somersalo, Susanne; Zumbusch, Elisabeth; Weyers, Birgit; Laasch, Henrik (1990): On the Mechanism of Photoinhibition in Chloroplasts. Relationship Between Changes in Fluorescence and Activity of Photosystem II. In: *J. PLANT PHYSIOL.* 136 (4), S. 472–479. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)80038-6.
- Jahns, Peter; Holzwarth, Alfred R. (2012): The role of the xanthophyll cycle and of lutein in photoprotection of photosystem II. In: *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* 1817 (1), S. 182–193. DOI: 10.1016/j.bbabi.2011.04.012.
- Jocković, Bojan; Miroslavljević, Milan; Momčilović, Vojislava; Dražić, Tanja; Mikić, Sanja; Aćin, Vladimir et al. (2022): The contribution of stay green traits to the breeding progress

- of the pannonian wheat. In: *Field Crops Research* 287, S. 108649. DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108649.
- Kozak, M.; Piepho, H.-P. (2018): What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. In: *J Agro Crop Sci* 204 (1), S. 86–98. DOI: 10.1111/jac.12220.
- LI, Rong-hua; GUO, Pei-guo; Michael, Baum; Stefania, Grando; Salvatore, Ceccarelli (2006): Evaluation of Chlorophyll Content and Fluorescence Parameters as Indicators of Drought Tolerance in Barley. In: *Agricultural Sciences in China* 5 (10), S. 751–757. DOI: 10.1016/S1671-2927(06)60120-X.
- Lichtenthaler, Hartmut; Wellburn, Alan (1983): Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. In: *Biochemical Society Transactions* 11 (5), S. 591–592. DOI: 10.1042/bst0110591.
- Losciale, Pasquale; Chow, Wah Soon; Corelli Grappadelli, Luca (2010): Modulating the light environment with the peach 'asymmetric orchard': effects on gas exchange performances, photoprotection, and photoinhibition. In: *Journal of experimental botany* 61 (4), S. 1177–1192. DOI: 10.1093/jxb/erp387.
- Lu, C.; Zhang, J. (1999): Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants. In: *J Exp Bot* 50 (336), S. 1199–1206. DOI: 10.1093/jxb/50.336.1199.
- M. Havaux (1998): Carotenoids as membrane stabilizers in chloroplasts. In: *Trends in Plant Science* 3 (4), S. 147–151. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/285500030_Carotenoids_as_membrane_stabilizers_in_chloroplasts.
- Maxwell, Kate; Johnson, Giles N. (2000): Chlorophyll fluorescence—a practical guide. In: *J Exp Bot* 51 (345), S. 659–668. DOI: 10.1093/jexbot/51.345.659.
- Melis, Anastasios (1999): Photosystem-II damage and repair cycle in chloroplasts: what modulates the rate of photodamage in vivo? In: *Trends in Plant Science* 4 (4), S. 130–135. DOI: 10.1016/s1360-1385(99)01387-4.
- Powles, S. B. (1984): Photoinhibition of Photosynthesis Induced by Visible Light. In: *Annu. Rev. Plant. Physiol.* 35 (1), S. 15–44. DOI: 10.1146/annurev.pp.35.060184.000311.
- Ramesh Chand, Ramesh Chand (2009): Challenges to ensuring food security through wheat. In: *CABI Reviews* 2009, S. 1–13. DOI: 10.1079/PAVSNNR20094065.
- Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften (2014). Unter Mitarbeit von Joachim W. Kadereit, Christian Körner, Benedikt Kost und Uwe Sonnwald. 37., vollst. überarb. u. akt. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Strasser, Reto J.; Tsimilli-Michael, Merope; Srivastava, Alaka (2004): Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient. In: *Chlorophyll a Fluorescence*: Springer, Dordrecht, S. 321–362. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-3218-9_12.

Danksagung

Ich möchte mich hiermit bei Professor Dr. Folkard Asch für die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken, ebenso bei Julia Asch für die Hilfestellungen bei der Laborarbeit. Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Alejandro Pieters für die tatkräftige Unterstützung und Hilfestellung bei allen praktischen und theoretischen Fragen.

Ebenso bedanke ich mich bei Andree Guhl und Christian Büser, mit denen ich diesen Versuch durchführen durfte. Weiter möchte ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie für die Unterstützung bedanken.