



UNIVERSITÄT
HOHENHEIM

Bachelorarbeit

**Einfluss von VPD auf
die Ionenaufnahme und -verteilung
bei Süßkartoffel (*Ipomoea batatas*) unter Salzstress**

Fakultät Agrarwissenschaften

Institut für Tropische Agrarwissenschaften (Hans-Ruthenberg - Institut)

Fachgebiet Wasserstress-Management bei Kulturpflanzen in den

Tropen und Subtropen (490g)

Prof. Dr. Folkard Asch

Linda Marie Mvogo-Binelli

Studiengang Nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie

Prüfer: Prof. Dr. Folkard Asch

Stuttgart-Hohenheim, den 15.10.2019

Zusammenfassung

Die Süßkartoffel *Ipomoea batatas* wird besonders in Bangladesch verzehrt und angebaut, da sie energiereich ist und große Mengen an Vitamin-A enthält. Da fast 90% der Bevölkerung in Bangladesch an Vitamin-A-Mangel leiden, gehört die Süßkartoffel zu einer der wichtigen Nahrungsmitteln. Die Süßkartoffel gehört zu den mäßig salztoleranten Kulturen. Dadurch wird der Anbau von Süßkartoffeln an den Küsten in Bangladesch durch die Salinität der Böden erschwert.

Um den Einfluss von VPD auf die Ionenaufnahme und -verteilung in Süßkartoffeln unter Salzstress zu untersuchen, wurden drei Süßkartoffelsorten (CIP 189151.8, CIP 106082.1 und CIP 420001) in einem hydroponischem System bei unterschiedlichen Sättigungsdampfdrücken und verschiedenen Salzbehandlungen unterzogen. Die Natrium-, Kalium- und Chloridverteilung wurde bei allen Pflanzenteilen sowie Sprossabschnitten der Haupttriebe gemessen.

Es gab Unterschiede zwischen der Verteilung der Ionen. Während die Natriumionen in den jüngeren Pflanzenteilen verlagert wurden, befanden sich die Chloridionen gleichermaßen in der Pflanze verteilt. In Bezug auf die Pflanzenorgane sind die Chloridionen vermehrt in den Blättern und Natriumionen eher in Blättern und Wurzeln verteilt. Die Natriumkonzentration war in der Salzbehandlung bei hohem VPD größer als bei niedrigem VPD. Hingegen die Chloridkonzentration bei niedrigem VPD minimal größer war als bei hohem VPD. Die Verteilung der Kaliumkonzentration in Pflanzenorganen und -teilen verhält sich bei niedrigem und hohem VPD ähnlich. Im Hinblick auf die Beziehung zwischen Transpiration und den jeweiligen Ionengehalten, zeigte sich lediglich ein signifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$) bei hohem VPD zwischen der Transpiration und Natriumgehalt der Salzbehandlung und zwischen Transpiration und Chloridgehalt der Kontrollen ebenfalls bei hohem VPD.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	6
1. Einleitung	7
2. Stand der Forschung.....	8
2.1 Salzstress.....	8
2.2. Süßkartoffeln unter Auswirkung von Salzstress	9
2.3. VPD und Salzstress	10
3. Material und Methoden.....	12
3.1. Pflanzenanzucht	12
3.2. Versuchsaufbau.....	13
3.3. Nährlösung, Bewässerung und Salzapplikation.....	13
3.4 Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit	15
3.5. Messungen.....	16
3.5.1. Nicht-destruktive Messungen	16
3.5.2. Destruktive Messungen.....	16
3.5.3. Natrium-, Kalium- Chloridanalyse.....	16
3.6. Auswertung der Ergebnisse	17
4. Ergebnisse	18
4.1. Morphologie	18
4.1.1. Trockenmasse.....	18
4.1.2. Blattfläche	19
4.1.3. Spezifische Blattfläche	20
4.2. Verteilung des Natriums.....	21
4.3. Verteilung des Kaliums	26
4.4. Verteilung des Chlorids.....	30
4.5. Wasserverbrauch.....	35

4.5.1.Kumulative Transpiration über Messzeitraum	35
4.5.2.Tägliche Transpirationsrate	36
4.5.3.Transpirationsrate und VPD.....	38
4.5.4.Transpiration und Ionen	40
5. Diskussion	41
5.1.Unterschiede in der Morphologie	41
5.2.Ionenverteilung	42
5.3.Transpiration.....	43
5.4.Fehlerdiskussion	45
6. Literaturverzeichnis	46
Eidesstattliche Erklärung.....	48

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
Cl	Chlor
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratzentimeter
g	Gramm
ha	Hektar
m ²	Quadratmeter
mg	Milligramm
ml	Milliliter
mM	Millimolar
Na	Natrium
K	Kalium
kg	Kilogramm
BF	Blattfläche
SPAD	Soil and Plant Analyzer Development
TM	Trockenmasse
VPD	Vapour Pressure Deficit

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klimatische Bedingungen	15
Abbildung 2: Sättigungsdefizit	15
Abbildung 3: Trockenmasse in g pro Behandlung.....	18
Abbildung 4: Relative Verteilung der Trockenmasse i.....	19
Abbildung 5: Blattfläche in cm ² pro Behandlung g.	20
Abbildung 6: Spezifische Blattfläche in m ² kg ⁻¹	21
Abbildung 7: Die relative Verteilung von Natrium des Sprossanschnitts	22
Abbildung 8: Die relative Verteilung von Natrium der Pflanzenorgane	23
Abbildung 9: Darstellung der Natriumkonzentration in mg g ⁻¹ TM	24
Abbildung 10: Darstellung der Natriumkonzentration in mg g ⁻¹ TM der Altersklassen.	25
Abbildung 11: Darstellung der Natriumkonzentration in mg g ⁻¹ TM der Pflanzenorgane	26
Abbildung 12: Die relative Verteilung von Kalium des Sprossanschnitts.....	27
Abbildung 13: Die relative Verteilung von Kalium der Pflanzenorgane.....	28
Abbildung 14: Darstellung der Kaliumkonzentration in mg g ⁻¹ TM.....	28
Abbildung 15: Darstellung der Kaliumkonzentration in mg g ⁻¹ TM der Altersklassen.....	29
Abbildung 16: Darstellung der Kaliumkonzentration in mg g ⁻¹ TM der Pflanzenorgane	30
Abbildung 17: Die relative Verteilung von Chlorid des Sprossabschnitts	31
Abbildung 18: Die relative Verteilung von Chlorid der Pflanzenorgane.	32
Abbildung 19: Darstellung der Chloridkonzentration in mg g ⁻¹ TM	32
Abbildung 20: Darstellung der Chloridkonzentration in mg g ⁻¹ TM der Altersklassen	34
Abbildung 21: Darstellung der Chloridkonzentration in mg g ⁻¹ TM der Pflanzenorgane.....	34
Abbildung 22: Kumulierte Transpiration bei niedrigem VPD.....	35
Abbildung 23: Kumulierte Transpiration bei hohem VPD	36
Abbildung 24: Transpirationsrate bei niedrigem VPD.....	36
Abbildung 25: Transpirationsrate bei hohem VPD	37
Abbildung 26: Korrelation von Transpirationsrate und VPD der Sorte 1.....	38
Abbildung 27: Korrelation von Transpirationsrate und VPD der Sorte 2.....	39
Abbildung 28: Korrelation von Transpirationsrate und VPD der Sorte 3.....	39
Abbildung 29: Korrelation von Ionengehalten in mg und Transpiration in ml.....	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:Klassifizierung der Bewässerung basiert auf der Salinität (FAO, 2019).....	8
Tabelle 2: Zusammensetzung der Stammlösung „Yoshida Culture Solution“ mit EisenEDTA	14
Tabelle 3: Natriumgehalt in mg pro Behandlung	22
Tabelle 4: Kaliumgehalt in mg pro Behandlung	27
Tabelle 5: Chloridgehalt in mg pro Behandlung	31

1. Einleitung

Oft wird die Süßkartoffel aufgrund ihres Aussehens mit der Kartoffel verglichen. Die Süßkartoffel mit dem lateinischen Namen *Ipomoea batatas* kommt ursprünglich, wie die Kartoffel, aus Südamerika. Jedoch bestehen die Knollenfrucht bei der *Ipomoea batatas* nicht aus Sprossknollen wie bei der *Solanum tuberosum*, sondern aus verdickten Wurzeln (Peng- Gao & Tai-Hua, 2019). Sie gehört zu der Pflanzenfamilie der Convolvulaceae, Windengewächsen, und gehört zu der Ordnung der nachschattenartigen Gewächsen an. Neben den zahlreichen Trieben, die bis zu drei Metern oder länger wachsen können, bildet die Süßkartoffel auffällige trichterähnliche Blüten mit einem Durchmesser von etwa fünf bis sechs Zentimeter. Der Markt von Süßkartoffeln in Deutschland ist noch klein. Zu den wichtigsten Importeuren mit 70% gehört die USA (HORTIPENDIUM, 2009-2019). Jedes Jahr werden mehr als 100 Millionen Tonnen Süßkartoffeln weltweit produziert, davon mit 95% überwiegend in Entwicklungsländern vor allem in Asien und Afrika. Mit einer Produktion von 70,79 Millionen Tonnen im Jahre 2016 liegt China an erster Stelle (Peng- Gao & Tai-Hua, 2019). Die FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) schätzt, dass von den etwa 230 Millionen Hektar der Bewässerungsfeldbau rund 45 Millionen Hektar (19,5%) von salzhaltigen Böden betroffen sind. Im Trockenfeldanbau mit etwa 1500 Millionen Hektar sind rund 32 Millionen Hektar (2,1%) von salzhaltigen Böden betroffen sind. In Asien, dem Pazifik und in Australien sind die Böden stark beeinträchtigt von der Salinität (FAO, 2019). Besonders in Bangladesch wird die Süßkartoffel verzehrt und angebaut, da sie energiereich ist, einen hohen Beta-Carotin Gehalt besitzt und weniger extensive Bewirtschaftung benötigt als andere Kulturpflanzen. Etwa 89% der Bevölkerung in Bangladesch leidet an einem Vitamin-A-Mangel. Aus diesem Grund ist die Süßkartoffel ein wichtiges Nahrungsmittel, da das Beta-Carotin zu Vitamin-A umgewandelt wird. Rund 50% der Anbaufläche am Küstengebiet in Bangladesch ist von Salinität betroffen. Deshalb ist es besonders wichtig, eine Süßkartoffelsorte auszuwählen, die für den Anbau in solchen salzhaltigen Gebieten resistent ist (Begum, et al., 2015). In dieser Arbeit wird der Einfluss von VPD auf die Ionenaufnahme und -verteilung bei Süßkartoffeln unter Salzstress untersucht.

2. Stand der Forschung

2.1. Salzstress

Pflanzen lassen sich auf Grund ihrer Fähigkeiten, während des Wachstums mit Salzstress umzugehen in Glykophyten und Halophyten unterscheiden (P. Ahmad et al., 2013). Während Halophyten sich durch verschiedenste Mechanismen angepasst haben auf salzigen Böden zu überleben, sind Glykophyten unter Salzwirkung stark eingeschränkt in ihrem Wachstum. Jedoch zeigen einige Glykophyten die Fähigkeiten Na^+ -Ionen aus den Wurzeln auszugrenzen und die K^+ -Konzentration in der Pflanze aufrecht zu erhalten (Chandna et al., 2013). Unter dem Begriff „Stress“ ist nach Larcher (2001) eine Abweichung vom Lebensoptimum definiert, die zunächst reversible Veränderungen und Reaktionen auf allen Funktionsebenen des Organismus bewirkt, dann aber auch bleibende Folgen verursachen kann. Für die Berechnung der Salinität wird vorzugsweise in der Agrarwissenschaft sowie in der Bodenkunde die Elektrolytleitfähigkeit des wässrigen gesättigten Bodenextrakts EC_e in $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ angegeben (Larcher, 2001). Beruhend auf unterschiedlichen Salzkonzentrationen in der Bewässerung werden sie in unterschiedlichen Kategorien wie in Tabelle 1 unterteilt.

Tabelle 1: Klassifizierung der Bewässerung basiert auf der Salinität (FAO, 2019)

Wasserklasse	Elektrische Leitfähigkeit [$\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$]	Salzkonzentration [mg l^{-1}]	Art des Wassers
Nicht salzig	< 0,7	< 500	Trink- und Bewässerungswasser
Leicht salzig	0,7 – 2	500 - 1.500	Bewässerungswasser
Mäßig salzig	2 – 10	1.500 - 7.000	Primäres Drainagewasser und Grundwasser
Stark salzig	10 – 25	7.000 - 15.000	Sekundärem Drainagewasser und Grundwasser
Sehr stark salzig	25 – 45	15.000 - 35.000	Sehr salziges Grundwasser
Salzwasser	> 45	> 45.000	Meereswasser

Schon ab $4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ widerfahren salzempfindliche Pflanzen Ertragseinbußen, daher sollte das Bewässerungswasser einen EC_e Wert von $2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ nicht überschreiten. Die Pflanze wird bei Salzstress durch die osmotische Wasserbindung und die spezifische Ionenwirkungen belastet. Dies führt dazu, dass Wasser in Salzlösungen stark osmotisch gebunden ist und dadurch schlechter für die Pflanzen verfügbar wird (Larcher, 2001). Um den osmotischen Druck auszugleichen, welches durch die Akkumulierung von Na^+ -Ionen und Cl^- -Ionen in den Vakuolen der Zellen entsteht, werden K^+ -Ionen und organische Lösungen im Zytoplasma und in den Organellen angesammelt (Munns, 2002). Besonders hoch sind die Konzentration von Na^+ und Cl^- Ionen im Blattgewebe (Hasanuzzaman et al. 2013). Überschüssige Ionen werden von der Pflanze in die älteren Pflanzenteile verlagert, da sie bald absterben und die jungen Blätter vor der Salinität geschützt sind (Singh et al., 2002). Die Reduzierung des Wasserpotentials, Na^+ -Ionen und Cl^- -Ionen Phytotoxizität und die Störung des Nährstoffhaushaltes der Pflanze führen hauptsächlich laut Mahajan und Tuteja (2005) zur Hemmung der Keimung, Verzögerung des Wachstums, Hemmung der Fotosynthese, Veränderung der Wasseraufnahme, oxidativem Stress und Ertragsminderung. Zusätzlich bewirken hohe Salzkonzentrationen im Boden die Hemmung der Nährstoffaufnahme und Stoffwechsel.

2.2. Süßkartoffeln unter Auswirkung von Salzstress

Die Süßkartoffel zählt nach dem Versuch von Begum (2015) zu den mäßig salztoleranten Kulturen. Eine Salinität von $8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ sollte daher nicht überschritten werden, da eine Überschreitung dieser Grenze zu einem Ertragsverlust von etwa 50% für den Anbau von Süßkartoffel bedeuten würde (Amin et al., 2011). Hinsichtlich des Wachstums am Anfang der Wachstumsphase von Süßkartoffeln besitzen bestimmte Genomtypen wie BARI SP-9 und BARI SP-7 eine erhöhte Toleranz gegen über Salzstress durch NaCl . Es wurde vermehrt Na^+ -Ionen unter Salzstress in der Pflanze akkumuliert, jedoch fand man in den Trieben nur geringere Menge an Na^+ -Ionen. Bezüglich des K^+ -Ionen sank die Menge bei erhöhtem Salzstress und wurde tendenziell in die Triebe transportiert um den K^+ -Gehalt aufrecht zu erhalten. Die Überwindung des osmotischen Stresses durch die Salinität wurde zu Beginn des Wachstums der Stecklinge durch die Aufnahme von Ionen teilweise überwunden.

Später jedoch wurden die Stecklinge aufgrund der Akkumulation der Ionen durch die Erhöhung des Salzgehaltes in ihrem Wachstum negativ beeinflusst (Begum et al., 2015). In einem anderen Experiment von Greig und Smith (1962) wurden unterschiedliche Kationenkonzentrationen und -mischungen auf das Rankenwachstum der Süßkartoffel getestet. Daraus ergab sich, dass Ca^+ -Ionen und Mg^+ -Ionen keinen signifikanten Einfluss auf Wachstum der Rankenbildung von Süßkartoffeln haben. Bei der Behandlung mit K^+ -Ionen und Na^+ -Ionen hingegen sank das Rankenwachstum mit der Erhöhung der osmotischen Konzentration. Bei der Behandlung mit Na^+ -Ionen mit einer osmotischen Konzentration von 1,90 bis 4,50 atm in einer Bodenlösung war es ausreichend für das Absterben der Pflanzenteile. Ein ähnlicher Effekt ist bei der Behandlung mit K^+ -Ionen zu erkennen mit einer osmotischen Konzentration von 1,18 bis 4,64 atm. Der Überschuss an K^+ -Ionen führt zu unterentwickelten und leicht violetten Blättern. Bei der Behandlung der Pflanzen mit einer Kationenmischung gegenüber einer Kontrolle gab es signifikant weniger Wachstum. Daher ist anzunehmen, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Rankenwachstum der Süßkartoffeln und der osmotischen Konzentration der Nährlösung gibt, die sowohl von der Kationenkonzentration als auch von der Kationenmischungen beeinflusst wird (Greig & Smith, 1962).

2.3. VPD und Salzstress

Das VPD „Vapour Pressure Deficit“ oder auch Sättigungsdefizit ΔE genannt, wird durch die Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck E und dem Dampfdruck e berechnet (AG, 1997-2019). Dabei gibt das Sättigungsdefizit an, wieviel Wasserdampf die Luft bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann bis sie gesättigt ist. Die relative Luftfeuchtigkeit der Atmosphäre sowie die Temperatur der Umgebung und des Blattes spielt für das VPD eine wichtige Rolle. Viele Faktoren wie zum Beispiel der Unterschied in der Wasserdampfkonzentration zwischen den intrazellulären Räumen der Blätter, die Atmosphäre in der Umgebung der Spaltöffnung und der Diffusionswiderstand sind entscheidend für die Transpirationsrate. So steigt die Transpirationsrate mit einer abnehmenden Luftfeuchtigkeit und erhöhten Temperaturen an (Larcher, 2001). Eine höhere Luftfeuchtigkeit führt generell zum

Rückgang der Wasserbewegung in der Pflanze und damit zur Senkung der Salzakкумуляtion in den Trieben (Backenhausen et al. 2015). Daher findet unter Salzstress eine Reduktion der Transpiration statt. Der steigende Salzgehalt verursachte im Wurzelbereich führte zu einer verminderte Wasserfluss in den Wurzeln (Salim, 1989). Die Kombination von Salzstress und hohem VPD führte bei Reis laut Jagadish et al. (2012) zu vertrockneten Blättern verbunden mit einer hohen Salzakкумуляtion. Die Ergebnisse von Tack et al. (2014) unterstützen die Hypothese, dass eine erhöhte Transpiration aufgrund eines höheren VPD einer Verminderung des Ertrags in Reis bei einer erhöhten EC verursacht wird. Dabei wird durch ein hohes VPD vermehrt Bodenwasser von der Pflanze aufgenommen und Salze verstärkt akkumuliert, bei einer erhöhten EC-Rate (Tack et al. 2014). Dadurch lässt sich vermuten, dass es eine Interaktion zwischen der Transpiration und Na^+ -Ionen Aufnahme und Verlagerung in der Sprossachse gibt (An et al. 2001). Die Untersuchungen der Salztoleranz von Sojabohnen bei erhöhter Luftfeuchtigkeit von An et al. (2001) ergaben, dass bei ähnlicher Na^+ -Ionen Konzentration in den Blättern nur bei salzempfindlichen Sojasorte eine verbesserte stomatäre Leitfähigkeit und Wurzelaktivität zeigten. Ähnliche Resultate ergaben der Versuch mit Tomaten. Das Wachstum der salzempfindliche Tomatensorte stieg unter Salzstress bei einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit (An et al. 2005). In dieser Arbeit unterlagen die Versuchspflanzen zwei VPD-Stufen. Der größte Unterschied sollte zwischen den Kontrollpflanzen bei niedrigem VPD und den Salzbehandlungen bei hohem VPD vorliegen. Es soll untersucht werden, ob unterschiedliche VPD-Stufen, Einwirkungen auf die Ionenaufnahme und -verteilung in den Versuchspflanzen haben.

3. Material und Methoden

Der vorliegende Versuch wurde am Institut für Tropische Agrarwissenschaften (Hans-Ruthenberg-Institut), Fachgebiet Wasserstress-Management bei Kulturpflanzen in den Tropen und Subtropen (490g) der Universität Hohenheim in Stuttgart und im zugehörigen Gewächshaus durchgeführt.

Es wurde der Einfluss von VDP auf die Ionenaufnahme und -verteilung von Süßkartoffeln *Ipomoea batatas* unter Salzstress getestet. Der Versuchsaufbau bestand dabei aus zwei Sättigungsdampfdrücken, drei Sorten, zwei Salzstufen und drei Wiederholungen. Zunächst ergaben sich eine Pflanzenzahl mit insgesamt 48 Pflanzen, da der Versuch mit vier Wiederholungen begann. Diese wurden bei der Auswertung wieder auf drei Wiederholungen reduziert. Die Transpiration der Süßkartoffeln wurde während des Salzstress gemessen. Für die Messungen wurden nur die Haupttriebe der Süßkartoffeln verwendet.

3.1. Pflanzenanzucht

Für die Anzucht der Pflanzen wurden drei Sorten verwendet: Die Sorte CIP 189151.8 (Sorte 1), CIP 106082.1 (Sorte 2) und CIP 420001 (Sorte 3), welche von der International Potato Center (CIP), Peru stammte. Von jeder Sorte wurden jeweils 16 Triebteile abgeschnitten, die bereits Blätter gebildet hatten. Zum Schneiden der Teile und Entfernen der Blätter wurde eine Rasierklinge (Astra, Großbritannien) verwendet, welche zuvor in eine NaOCl-Lösung eingetaucht worden ist. Dies wurde gemacht zur Desinfektion, um mögliche Übertragungen von Viren, Pilze oder Bakterien vorzubeugen. Zusätzlich wurden die Stecklinge, bevor sie in ein hydroponisches System eingesetzt wurden, in Pflanzenschutzmittel (5ml/l) (Spruzi, NeuDorfft, Deutschland) eingetaucht und anschließend in destilliertem Wasser gespült. Die 24 Stecklinge, acht Stecklingen pro Sorte mit vier Kontrolle und vier Salzbehandlung, wurden in die Kammer mit hoher Luftfeuchtigkeit gestellt und die andere Hälfte in die Kammer mit niedriger Luftfeuchtigkeit.

3.2. Versuchsaufbau

Der Versuch mit den Süßkartoffeln fand in den Klimakammern statt. Die Klimakammern bestehen aus zwei abgetrennten Räumen, welche aus einem Holzrahmen mit Plexiglaswänden bestehen und zusätzlich mit Plastikplanen für den Zugang ausgestattet sind. Mit Hilfe eines Luftentfeuchters (Concorb DC-10, Seibu Giken DST, Schweden) wurde die Luftfeuchtigkeit in den Kammern konstant gehalten. Die Stecklinge wurden in einem hydroponischen System aufgezogen, welches aus einem Kunststoffgefäß mit einem Fassungsvermögen von 1 Liter (Maße 11x11x14 cm) (Gies, Deutschland) und einem Deckel mit zwei Löchern bestand. In der Mitte befand sich ein größeres Loch, in dem die Stecklinge mit Hilfe eines Schaumstoffzylinders (3cm lang, 3,6 cm Durchmesser) (Ceaprenstopfen, 36mm, Greiner Bioone, Deutschland) befestigt wurden. In dem kleineren Loch ist ein Schlauch (4mm Durchmesser, 1mm Wandstärke, Aquaristikschauch, OBI, Deutschland) für die Luftzufuhr. Die Schläuche wurden mit einem Fünffach-Verteiler (Cole-Parmer, fisher scientific, Deutschland) verbunden. Die Luft wurde im 15 Minuten Takt mit Hilfe einer Luftpumpe (Membran-Vakuumpumpe N 022AN.18, KNF LAB, Deutschland) befördert. In jedes Kunststoffgefäße wurde unterhalb der oberen Kante eine 1 cm Markierung zum Auffüllen der Nährlösung gezeichnet. Täglich von 8 bis 20 Uhr wurden die Süßkartoffeln mit einer Assimilationsbelichtung (DH Licht GmbH, SON-K 400) und einer Natriumdampflampe (Philips SON-T Agro 400W), die sich etwa 1,20 m über dem Bestand befand, beleuchtet.

3.3. Nährlösung, Bewässerung und Salzapplikation

In den ersten zwei Wochen des Versuchs befanden sich die Stecklinge in einer angepassten 50%-Yoshida-Lösung (Yoshida, 1976). Nach der zweiten Woche wurde die Yoshida Lösung auf 100% erhöht. Nach etwa zweieinhalb Wochen wurde mit der Salzapplikation angefangen. Während die Kontrollpflanzen weiter mit der 100%-Yoshida-Lösung bewässert wurden, wurde für die andere Hälfte eine 100mM Lösung mit Natriumchlorid $58,44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ (Roth, Deutschland) hergestellt und diese Salzlösung appliziert. Die Yoshida- und die Salzlösungen wurden nach einer Woche aufgefrischt und die Salzbehandlung umfasste zwölf Tage. Um den Wasserhaushalt

der Süßkartoffeln aufrecht zu erhalten, wurde deionisiertes Wasser bis zur Markierung wieder aufgefüllt. Für die Erkennung der Blätter an der Sprossachse, die unter dem Salzstress gewachsen sind, wurde vor der Salzapplikation an den jungen noch nicht entfalteten Blättern mittels einer Baumwollschnur (Durchmesser 1,5mm, 100m, LUX, Deutschland) eine Markierung angebracht. Ein Tag vor der Ernte wurden die Gesamtlänge der Sprossachse und SPAD gemessen. Die Ernte fand nach viereinhalb Wochen statt und dabei wurde die Blattfläche gemessen. Für die Herstellung der Yoshida Lösung in einem hydroponischen System wurden eine abgeänderte Form der Yoshida Lösung verwendet, wo FeCl_3 durch EisenEDTA ersetzt wurde (Tabelle 2).

Tabelle 2: Zusammensetzung der Stammlösung „Yoshida Culture Solution“ mit EisenEDTA

Stammlösung	Chemisches Element	Reagenz	Stammlösung [g L ⁻¹]	Stammlösung / Nährlösung [mL L ⁻¹]	Löslichkeit [g L ⁻¹]
A	N	NH_4NO_3	114.29	1	2089
B	P	NaH_2PO_4 * $2\text{H}_2\text{O}$	50.37	1	850
C	K	K_2SO_4	89.14	1	111
D	Ca	CaCl_2 * $2\text{H}_2\text{O}$	146.73	1	986
E	Mg	MgSO_4 * $7\text{H}_2\text{O}$	405.64	1	710
F	Fe	FeNa - EDTA	15.080	1	N.N.
G	Mn	MnCl_2 * $4\text{H}_2\text{O}$	1.875	1	700
	Zn	ZnSO_4 * $5\text{H}_2\text{O}$	0.0440		965
	Cu	CuSO_4 * $4\text{H}_2\text{O}$	0.0393		203
	Mo	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ * $4\text{H}_2\text{O}$	0.0920		430
	B	H_3BO_3	11.675		50

Dabei wurden die einzelnen Stammlösungen jeweils nach den Werten laut Tabelle 1 abgewogen (Precisa, Kern, Deutschland) und in einen 1-Liter Messkolben gegeben. Aufgefüllt wurden die Messkolben mit deionisiertem Wasser. Mit Hilfe eines Magnetrührers (Monotherm IKA, VELP Scintifica, Italien) und Magnetrührstäbchen wurde das Salz im Wasser gelöst. Nach der Zusammenstellung der Nährlösung aus den Stammlösungen und deionisiertem Wasser erfolgte die pH-Wert-Messung (WTW, Deutschland), die bei einem pH-Wert von etwa 5,8 lag. Im Falle eines zu hohen pH-Wertes wurde dieser mittels HCl angepasst.

3.4. Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Während des Salzstress lag in der Kammer bei niedrigem VPD die relative Luftfeuchtigkeit durchschnittlich bei etwa 81,7% mit einer durchschnittlichen Temperatur von etwa 30,0° C. In der Kammer des hohem VPD lag die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit bei etwa 47,7% und die Temperatur bei etwa 29,0° C (Abb. 1).

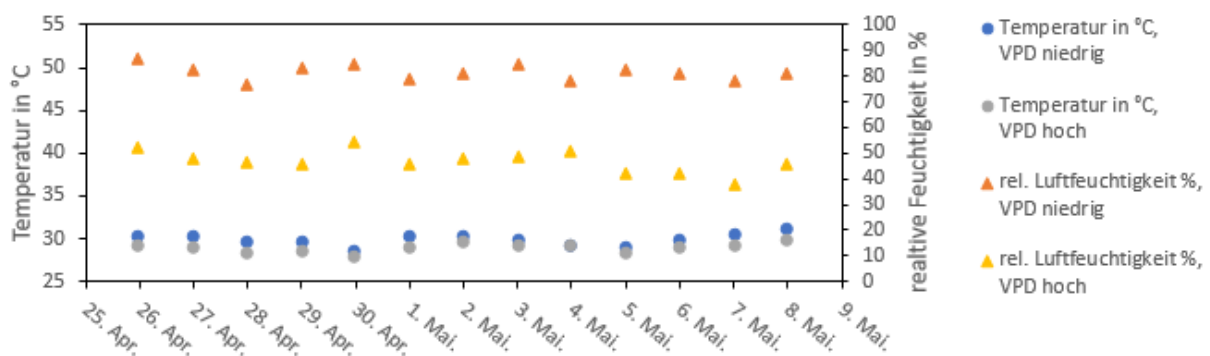


Abbildung 1: Klimatische Bedingungen während der Salzapplikation in den Klimakammern. Mit Temperatur bei niedrigem bzw. hohem VPD sowie die relative Luftfeuchtigkeit bei niedrigem bzw. hohem VPD.

Aus der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur ließ sich das VPD während der Salzapplikation errechnen (Abb. 2).

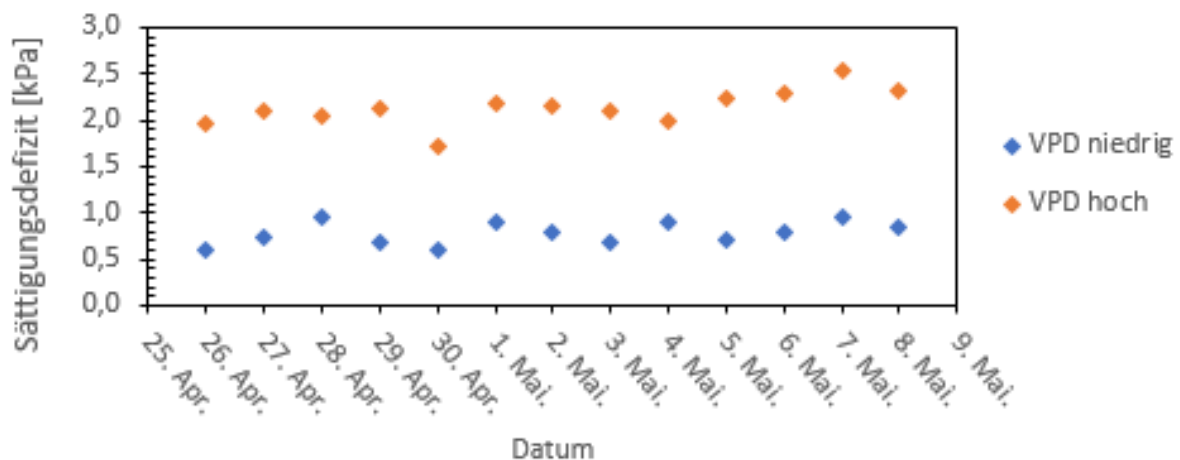


Abbildung 2: Sättigungsdefizit während der Salzapplikation in den Kammern bei niedrigem und hohem VPD.

3.5. Messungen

Im Verlaufe des Versuchs fanden den kontinuierlichen Messungen zum Wasserverlust über Wägung statt. Ein Tag vor der Ernte wurden der Chlorophyllgehalt und die Gesamtlänge der Sprossachse gemessen. Nach der Ernte die Ermittlung der Blattfläche. Die Sprossachse wurde in vier Altersklassen unterteilt: alte, mittelalte, junge sowie sehr junge Sprossabschnitte.

3.5.1. Nicht-destruktive Messungen

Während der Salzapplikation wurde der Wasserverlust mittels einer Waage (Kern, KB 2400-2N, Deutschland) zweieinhalb Wochen lang bis zur Ernte gemessen. Ein Tag vor der Ernte wurde die Gesamtlänge der Sprossachse bestimmt und der Chlorophyllgehalt der Blätter ermittelt (SPAD-502Plus, Konica Minolta, Japan).

3.5.2. Destruktive Messungen

Am Erntezeitpunkt erfolgte die Zerlegung der Pflanzen in folgende Abschnitte: Wurzel, Blätter, Petiole und Stängel jeweils der Sprossachse. Die Blattfläche der unterschiedlich alten Blätter wurde mit einem Blattflächemessgerät (LI-Cor Inc., LI-3000C, USA) erfasst. Alle Pflanzenteile wurden für etwa 24h bei einer Temperatur von 60°C in einem Trockenschrank (ULM 500, Memmert, Deutschland) und anschließend für etwa 15 Minuten vor der Ermittlung der Trockenmasse in einem Exsikkator (Duran, Deutschland) getrocknet. Zu Bestimmung des Trockengewichts wurde eine Feinwaage (XB 220 A, Precisa, Schweiz) verwendet.

3.5.3. Natrium-, Kalium- Chloridanalyse

Für die Ermittlung der Natrium- und Kaliumgehalte in den Pflanzenteilen wurde ein Flammphotometer (Jenway, PFP 7, Großbritannien) genutzt. Hierfür wurden die Pflanzenteile zunächst zerkleinert und in Szintillationsgefäße (Roth, Deutschland) mit

Mahlkugeln (3 Stück 5 mm Durchmesser und 6 Stück 6 mm Durchmesser, VWR Mahl­kugeln) gefüllt. Die Proben wurden für etwa 15 Minuten gemahlen. Anschließend wurde ca. 0,1 g der gemahlenen Proben in Zentrifugenröhrchen (15 ml, IsoLab, Deutschland) eingewogen, mit deionisierten Wasser bis auf 10ml aufgefüllt und für den Hitzeaufschluss der Pflanzenzellen eine Stunde lang bei einer Temperatur von 120 °C autoklaviert (SanoClav MMCS, Wolf, Deutschland) . Nach dem Abkühlen wurde die Suspension mit Hilfe einer Zentrifuge (Z 400, Hermle, Deutschland) bei 4000 Umdrehung pro Minute für 5 Minuten zentrifugiert. Der Überstand wurde mit einem Filterpapier (Größe 125mm, Partikelretention 5-13µm, VWR, Deutschland) in einen 100ml-Messkolben gefiltert und auf 100ml bis zur Markierung mit deionisierten Wasser aufgefüllt. Das Filtrat wurde in ein Szintillationsgefäß umgefüllt und die Ermittlung des Natrium- und Kaliumgehalt der Proben wurde im Anschluss mittels des Flammphotometers mit Standardlösungen bestimmt. Für die Bestimmung des Chloridgehaltes der Proben wurden die Lösungen unter der Verwendung eines Autoanalysers (Autoanalyser II, Technicon, Amerika) und Standardlösungen ermittelt und die Ergebnisse durch ein Schreiben (SE 140, ABB, Schweiz) aufgezeichnet. Die Menge an Chlorid in der Lösung stellt die Höhe des Ausschlags am Schreiber dar. Die Höhe wurde abgemessen und dieser Wert wurde für weitere Auswertungen der Chlorid-Konzentration berechnet.

3.6. Auswertung der Ergebnisse

Für die Auswertung der Ergebnisse wurden alle dokumentierten Daten in dem Programm Excel (Microsoft® Excel® für Office 365 MSO Version) erfasst. Mithilfe von Regressionskurven aus den Messpunkten der Standardlösungen wurde die Daten des Flammphotometers und Autoanalysers berechnet. Des Weiteren wurden mit Excel die Mittelwerte (MITTELWERT) und auch die Standardfehler (STABW.S/ WURZEL 2) errechnet. Die Einfaktorielle Varianzanalyse mit dem Signifikanzniveau $\alpha=5\%$ und alle Grafiken wurden ebenfalls mit Excel erstellt. Der Versuch wurde randomisiert.

4. Ergebnisse

4.1. Morphologie

4.1.1. Trockenmasse

Die Pflanzen der Salzbehandlung hatten eine geringere Trockenmasse als die Pflanzen der Kontrolle (Abb. 3). Mit einem Trockengewicht von 7,14 g hat die Sorte 1 bei niedrigem VPD die höchste Masse erreicht. Die Sorte 3 bildete im Verlauf des Versuches weniger Pflanzenmasse, sowohl bei niedrigem und hohem VPD als auch in den jeweiligen Salzbehandlungen. Das Trockengewicht der Sorte 3 lag zwischen 2,83 g und 3,52 g. Bei niedrigem VPD gab es keinen signifikanten Unterschied ($p > 0,5$) zwischen Kontrolle und Salzbehandlung. Signifikanzen ($p < 0,5$) bei hohem VPD zwischen den Salzbehandlungen gab es lediglich bei der Sorte 2. Bei den Kontrollpflanzen gab es in Betrachtung der Sorten einen signifikanten Unterschied ($p < 0,5$) zwischen der Sorte 1 und Sorte 3, welche durch eine einfaktorielle Varianzanalyse statistisch abgesichert wurde. In der Kammer des höheren VPD gab es keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,5$) zwischen den Sorten.

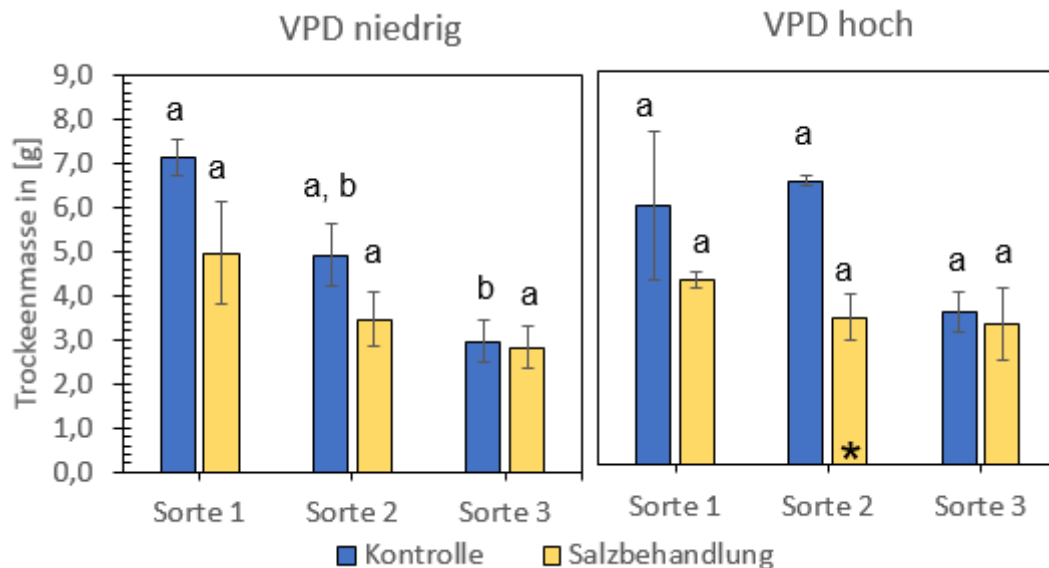


Abbildung 3: Trockenmasse in g pro Behandlung gemittelt über die Wiederholungen ($n=3$) mit entsprechenden Standardfehlern. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b und Salzbehandlung zur entsprechenden Kontrolle mit einem * gekennzeichnet.

In der Abbildung 4 ist die relative Trockenmasseverteilung der Behandlungen dargestellt. Der Anteil ist, hinsichtlich des Trockengewichts in Bezug auf die

Pflanzenorgane, in den Blätter und Stängeln deutlich höher als der Anteil an Wurzeln und Petiolen. Die Anteile waren bei den Blättern zwischen 27-53%, bei den Stängeln zwischen 25-45%, bei den Petiolen zwischen 5-11% und bei den Wurzeln zwischen 12-21%. Bei der Sorte 2 bei hohem VPD gab es bei den Blättern, Petiolen und den Stängeln einen signifikanten Unterschied ($p < 0,5$) zwischen der Kontrolle und der Salzbehandlung. In den Kontrollpflanzen der Sorte 1 und Sorte 3 gab es eine Signifikanz ($p < 0,5$) bei den Blättern, Stängeln und den Wurzeln (Abb. 4).

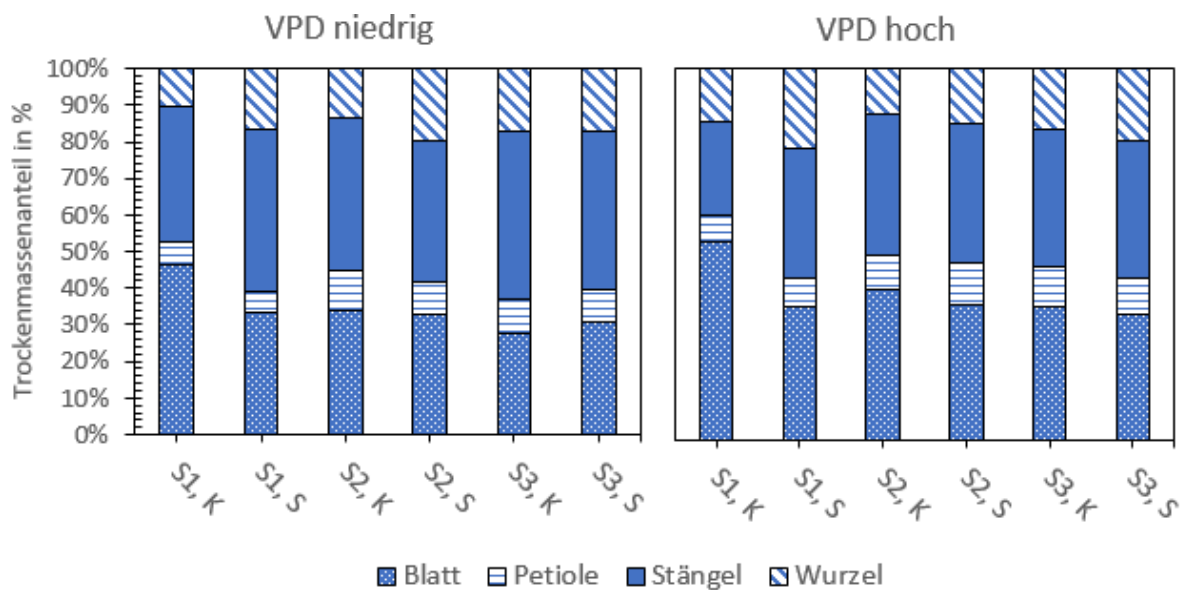


Abbildung 4: Relative Verteilung der Trockenmasse in der Pflanze über die Wiederholungen ($n=3$) in %. Dargestellt ist die Trockenmasse einzelner Pflanzenorgane in Relation zur gesamten Trockenmasse in der Pflanze. S1, S2 und S3 sind die entsprechenden Sorten; K steht für Kontrolle und S für die Salzbehandlung.

4.1.2. Blattfläche

Es gab keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) zwischen den Kontrollen und den Salzbehandlungen bei allen Pflanzen hinsichtlich der Blattfläche (Abb. 5). Der Unterschied wurde durch eine einfaktorielle Varianzanalyse statistisch abgesichert. Im Durchschnitt lagen die Werte in den Kontrollen bei 626 cm² und bei der Salzbehandlung bei 478 cm². Bei niedrigem VPD waren alle Sorten der Kontrollpflanzen signifikant unterschiedlich ($p < 0,05$) voneinander. Die Sorte 2 und Sorte 3 der salzbehandelten Pflanzen zeigten signifikante Unterschied ($p < 0,05$) bei niedrigem VPD. Der höchste Wert bei niedrigem VPD wurde bei der Kontrolle der Sorte 1 mit 842 cm² gemessen. In der Kammer mit hohem VPD gab es in der Kontrolle

eine Signifikanz ($p < 0,05$) zwischen der Sorte 2 und Sorte 3. Bei der Salzbehandlungen wiesen die Sorte 1 und Sorte 3 signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) auf. Mit einer Blattfläche von 735 cm^2 hat die Sorte 1 in der Kontrolle den höchsten Wert erreicht, jedoch ist der Standardfehler der größte mit 34. In der Kontrolle und in der Salzbehandlung der beiden VPD-Stufen war die Blattfläche der Sorte 3 mit mehr als 100 cm^2 geringer als die der übrigen Sorten.

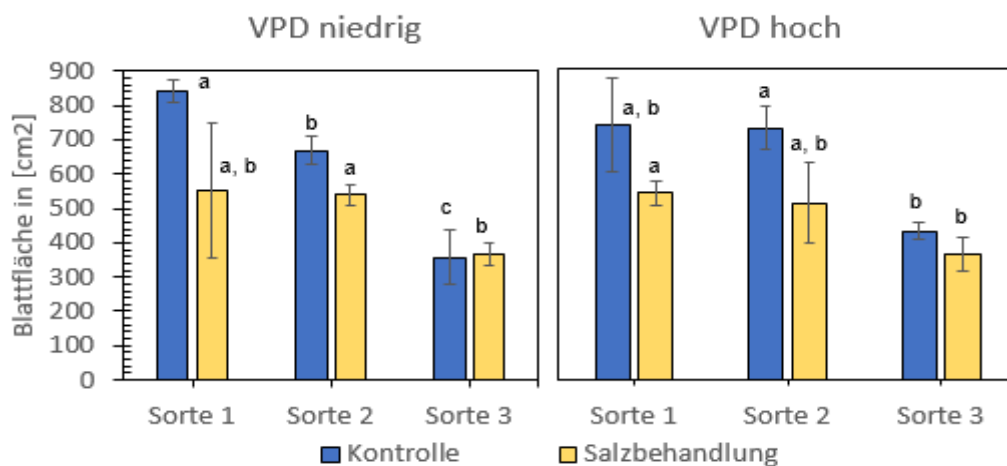


Abbildung 5: Blattfläche in cm^2 pro Behandlung gemittelt über die Wiederholungen ($n=3$) mit entsprechenden Standardfehlern. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b und c gekennzeichnet.

4.1.3. Spezifische Blattfläche

Die spezifische Blattfläche wird berechnet aus dem Quotienten der Blattfläche in m^2 und des Trockengewichts in kg der Blätter. Aus diesem Parameter lässt sich die Dicke der Blätter schließen. Zwischen den salzbehandelten Pflanzen und den Kontrollpflanzen gab es in beiden VPD-Stufen keine signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$). Dies wurde durch statistisch durch eine einfaktorielle Varianzanalyse abgesichert. Die höchste spezifische Blattfläche hatten die Pflanzen der Sorte 2 in der Salzbehandlung bei niedrigem VPD mit $19,7 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ und die niedrigste spezifische Blattfläche die Kontrolle der Sorte 3 bei hohem VPD mit $9,5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (Abb. 6).

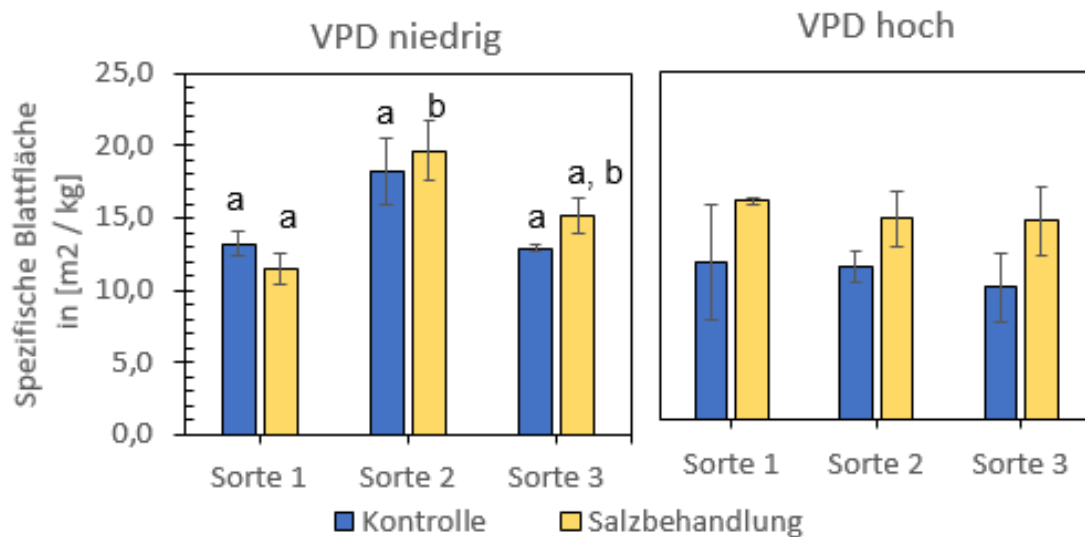


Abbildung 6: Spezifische Blattfläche in $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$ pro Behandlung gemittelt über die Wiederholungen ($n=3$) mit entsprechenden Standardfehlern. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a und b gekennzeichnet

4.2. Verteilung des Natriums

Der Natriumgehalt in mg pro Behandlung ist in der Tabelle 3 dargestellt. Auch hier sind die Werte der Pflanzen, die mit Salz behandelt worden sind, höher als bei den Kontrollpflanzen. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten konnten durch eine einfaktorielle Varianzanalyse in der Salzbehandlung zwischen den Sorten 1 und 2 mit der Sorte 3 festgestellt werden. Die höchsten Natriumgehalte in der Salzbehandlung war bei der Sorte 1 bei hohem VPD mit 162,18 mg und der niedrigste Wert bei hohem VPD der Kontrolle mit 8,70 mg. Die Werte bei hohem VPD waren bei den Kontrollen im Durchschnitt 1,34 mg und bei der Salzbehandlung etwa 39,02 mg höher als bei niedrigem VPD. Generell lagen die Werte bei beiden VPD-Stufen der salzbehandelten Pflanzen zwischen 80,33 mg und 162,18 mg. In den Kontrollen beider VPD-Stufen lagen die Natriumgehalte zwischen 2,10 mg und 10,56 mg. Signifikante Unterschiede zwischen den Salzkontrollen waren bei niedrigem VPD bei der Sorte 2 und bei hohem VPD in allen Sorten vorhanden.

Tabelle 3: Natriumgehalt in mg pro Behandlung gemittelt über die Wiederholungen (n=3) mit entsprechenden Standardfehlern. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet und signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen der Salzbehandlung mit der Kontrolle mit * gekennzeichnet.

Na-Gehalt	Kontrolle				Salzbehandlung		
	mg	Mittelwert	Standardfehler $\pm$		Mittelwert	Standardfehler $\pm$	
Bei niedrigem VPD	Sorte 1	12,03	3,41	a	80,33	40,70	a
	Sorte 2	15,36	3,98	a	125,86	11,77*	a
	Sorte 3	8,70	2,10	a	59,75	34,69	a
Bei Hohem VPD	Sorte 1	12,85	2,26	a	162,18	11,85*	a
	Sorte 2	17,57	10,56	a	134,98	20,75*	a
	Sorte 3	9,70	1,67	a	85,83	3,25*	b

Sieht man sich die Verteilung von Natrium innerhalb der Pflanze hinsichtlich des Alters an, ist deutlich zu erkennen, dass der Anteil an Natrium in den alten Pflanzenteilen am höchsten und in den sehr jungen Pflanzenteilen am niedrigsten war (Abb. 7). Der größte Anteil an Pflanzenmasse war in den älteren Pflanzenabschnitten vorzufinden. Die Verteilung zwischen den VPD-Stufen waren sich ähnlich. Durchschnittlich betrug der Anteil an sehr jungen Pflanzenabschnitten etwa 7,90%, jungen Pflanzenabschnitten 20,33% und mittelalten Pflanzenabschnitten etwa 19,92%. Der Anteil des älteren Abschnitt machte etwa 22,83% und die der Wurzeln etwa 29,03 %.

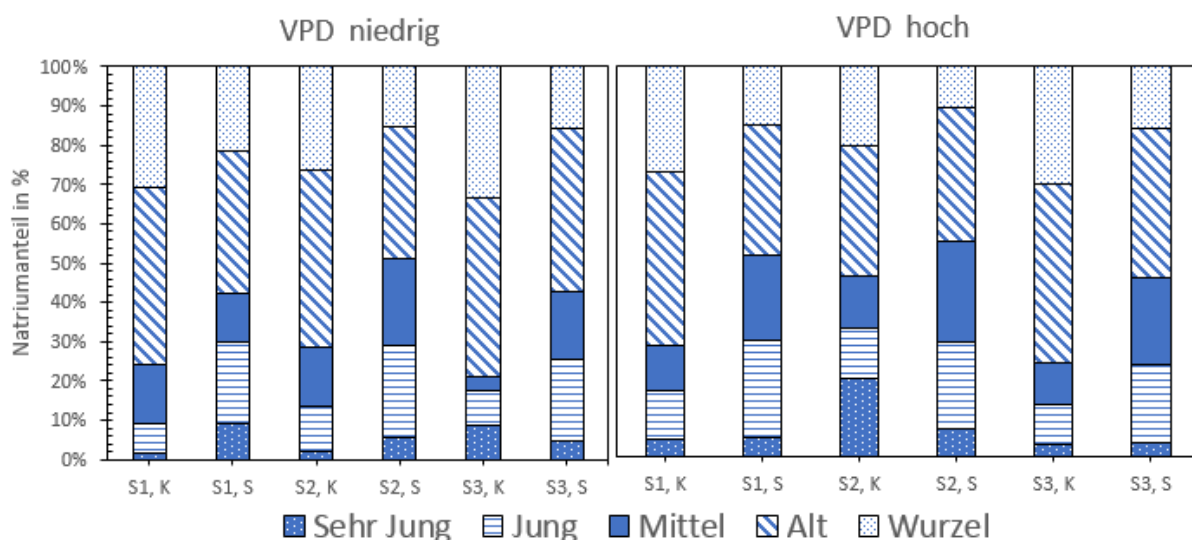


Abbildung 7: Die relative Verteilung von Natrium in der Pflanze über die Wiederholungen (n=3) in %. Abgebildet ist der gesamte Natriumgehalt der jeweiligen Sprossabschnitts in Relation zum gesamten Natriumgehalts in der Pflanze. S1, S2 und S3 sind die entsprechenden Sorten 1,2 und 3; K steht für Kontrolle und S für die Salzbehandlung.

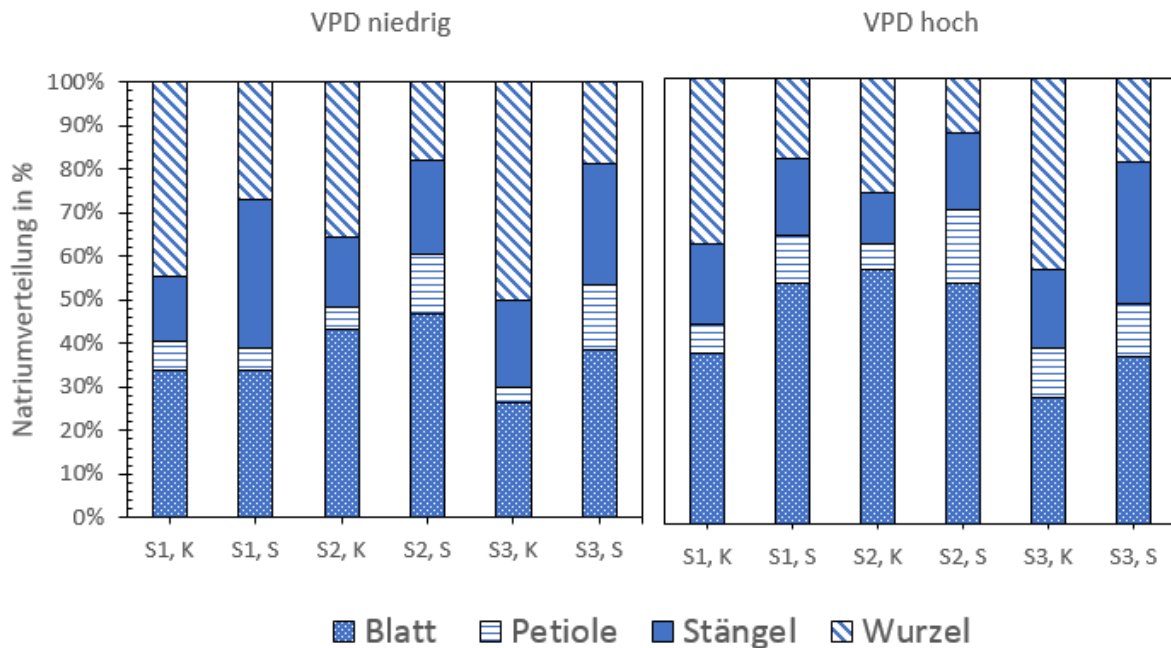


Abbildung 8: Die relative Verteilung von Natrium in der Pflanze über die Wiederholungen ($n=3$) in %. Abgebildet ist der gesamte Natriumgehalt einzelner Pflanzenorgane in Relation zum gesamten Natriumgehalts in der Pflanze. S1, S2 und S3 sind die entsprechenden Sorten 1, 2 und 3; K steht für Kontrolle und S für die Salzbehandlung.

Der Natriumgehalt in den Pflanzenorganen war bei niedrigem VPD gleichermaßen verteilt wie bei hohem VPD. Der Anteil an Natriummasse in den Blättern war mit durchschnittlich 41,03 % am höchsten (Abb. 8). Gefolgt von den Wurzeln mit 31,73 % und den Stängeln mit 21,55 %. Sehr wenig Natriummasse war in den Petiolen mit 9,70 % vorhanden.

Die gesamte Natriumkonzentration pro Behandlung ist in der Abbildung 9 dargestellt. Es gab nur signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) in der Salzbehandlung bei hohem VPD zwischen der Sorte 1 und 3. Die höchste Natriumkonzentration war in der Salzbehandlung der Sorte 1 bei hohem VPD mit $45,50 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ und die geringste war in der Kontrolle der Sorte 1 bei niedrigem VPD mit $2,04 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ zu finden. In beiden Salzbehandlungen war bei niedrigem VPD die Konzentration geringer als bei hohem VPD. Bei der Kontrolle waren es durchschnittlich $0,21 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ und bei den Pflanzen, die mit Salz behandelt worden sind, etwa $11,18 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$. In den mit Salz behandelten Pflanzen lagen die Konzentrationen zwischen $31,32 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ und $45,50 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$. Die niedrigste Konzentration an Natrium war in der Kontrolle der Sorte 1 bei niedrigem VPD mit $2,04 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$. Dort lagen die Werte zwischen $2,04 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ und $3,60 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$.

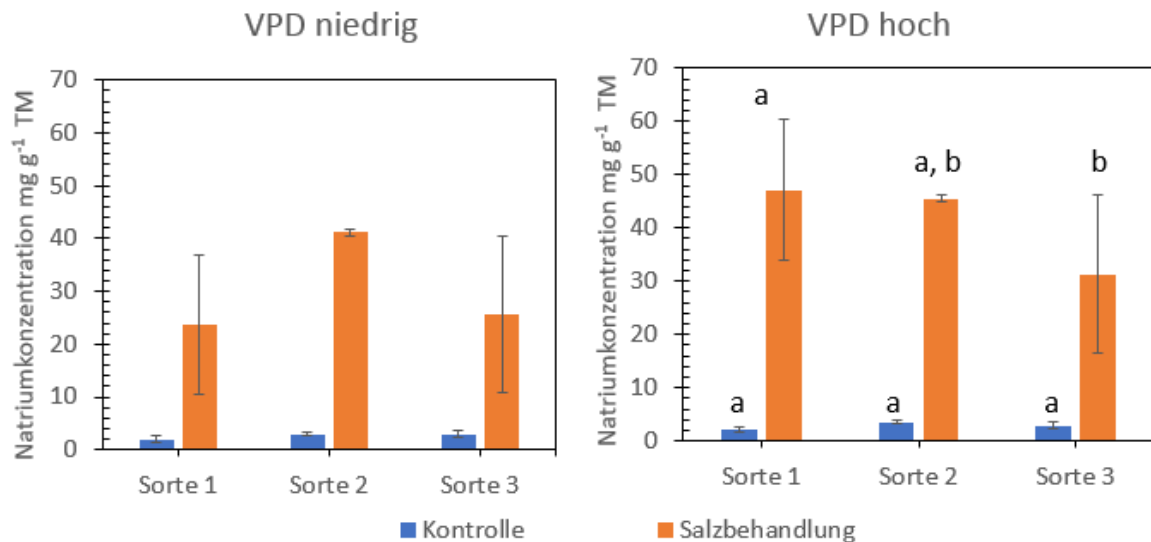


Abbildung 9: Darstellung der Natriumkonzentration in mg g^{-1} TM über die Wiederholungen ($n=3$) pro Behandlung in zwei VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

Nur bei hohem VPD der Salzbehandlungen gab es signifikante Unterschiede zwischen den Sorten ($p < 0,05$). Zwischen den Sorten 1 und 3 gab es in den sehr jungen, jungen Pflanzenteilen und auch in den Wurzeln Signifikanzen ($p < 0,05$). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Natriumkonzentration der Kontrollen geringer ist als in den Salzbehandlungen. Jedoch sind die Standardfehler der Salzbehandlungen, vor allem bei niedrigem VPD, sehr hoch im Vergleich zu den anderen Behandlungen.

Die Natriumkonzentration der Pflanzenalters ist in der Abbildung 11 zu sehen. Es In der Kontrolle bei niedrigem VPD war die Natriumkonzentration in den Wurzeln am höchsten mit einer durchschnittlichen Konzentration von $8,00 \text{ mg g}^{-1}$ TM und der niedrigste Wert war im jungen Abschnitt mit $1,08 \text{ mg g}^{-1}$ TM vor zu finden. In der gleichen Kammer bei den Salzbehandlungen hatten die Wurzeln ebenfalls die höchste Konzentration an Natrium mit einem Durchschnittswert von $6,15 \text{ mg g}^{-1}$ TM und in den jungen Pflanzenteilen die niedrigste Konzentration mit $1,61 \text{ mg g}^{-1}$ TM. Aufgrund der zwei abweichenden Werte im sehr jungen Abschnitt kann man annehmen, dass die geringste Konzentration dort vorzufinden gewesen wäre. Bei den sehr jungen Pflanzenteilen war bei der Sorte 3 bei niedrigem VPD eine deutlich höhere Natriumkonzentration und größere Standardfehler als bei den anderen Sorten. Die Konzentration von Natrium in den sehr jungen Pflanzenorganen der Sorte 2 in der Salzbehandlung bei niedrigem VPD sehr hoch im Vergleich zu den anderen Sorten.

Generell verhält sich die Natriumkonzentration in den Kontrollen beider VPD-Stufen ähnlich. Hohe Konzentrationen waren in den Wurzeln und niedrige in den sehr jungen Pflanzenabschnitten vorzufinden.

Die Natriumkonzentration der Altersklassen ist in der Abbildung 10 zu sehen. Es gab lediglich signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) in der Salzbehandlung bei hohem VPD zwischen der Sorte 1 und 3 in den Blättern sowie in den Wurzeln. In den Kontrollen war die Konzentration von Natrium in den Wurzeln in beiden Kammern am höchsten. In den Stängeln waren in beiden Kammern die Konzentration an Natrium am geringsten mit $1,41 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ bei niedrigem VPD und $1,47 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ bei hohem VPD. Bei den Salzbehandlungen bei niedrigem VPD zeigte die Sorte 2, wie auch bei den Altersstufen, die höchsten Konzentrationen. Hierbei zu beachten wären die hohen Standardfehler der Sorten 1 und 3. Die Konzentration war in der Salzbehandlung bei hohem VPD mit $9,90 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ größer als bei niedrigem VPD. Vor allem in den Petiolen waren die Natriumkonzentrationen am höchsten mit einem Mittelwert von $44,95 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ bei niedrigem VPD und $57,47 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ bei hohem VPD. Die niedrigsten Konzentrationen waren in den Stängeln sowohl bei niedrigem VPD mit $16,85 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ als auch bei hohem VPD mit $27,16 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$.

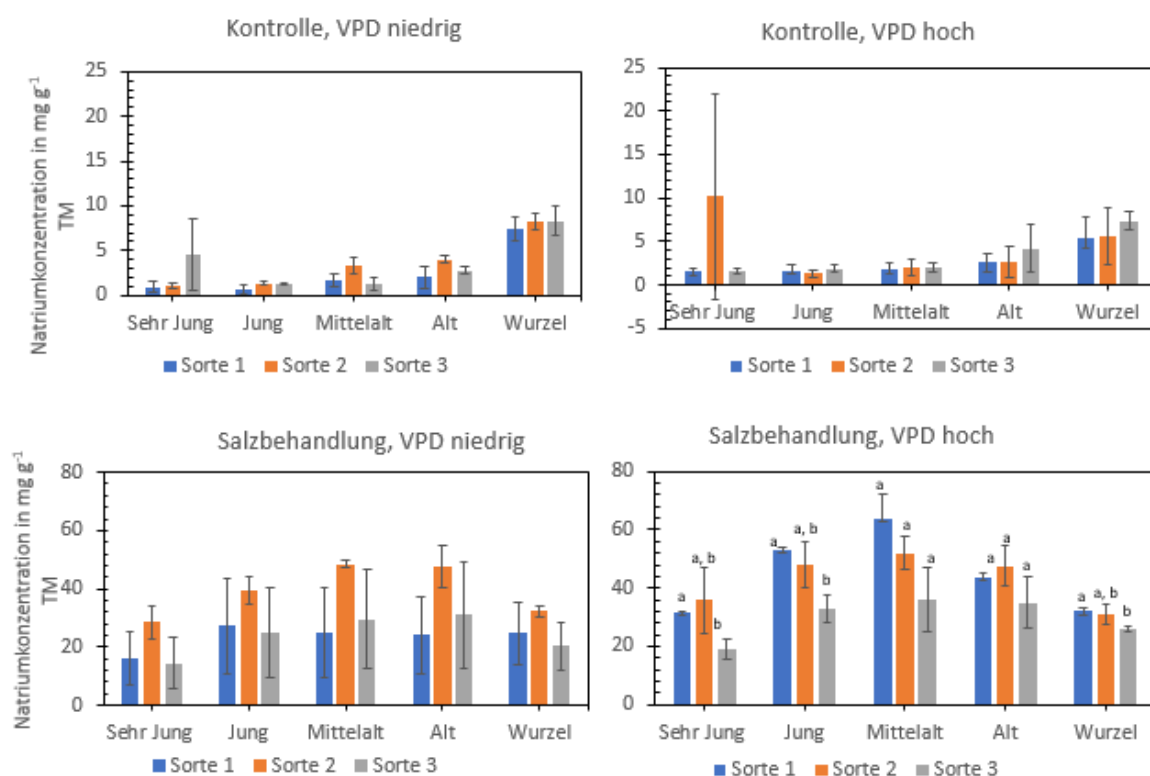


Abbildung 10: Darstellung der Natriumkonzentration in $\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$ über die Wiederholungen ($n=3$) der Altersklassen in unterschiedlichen VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

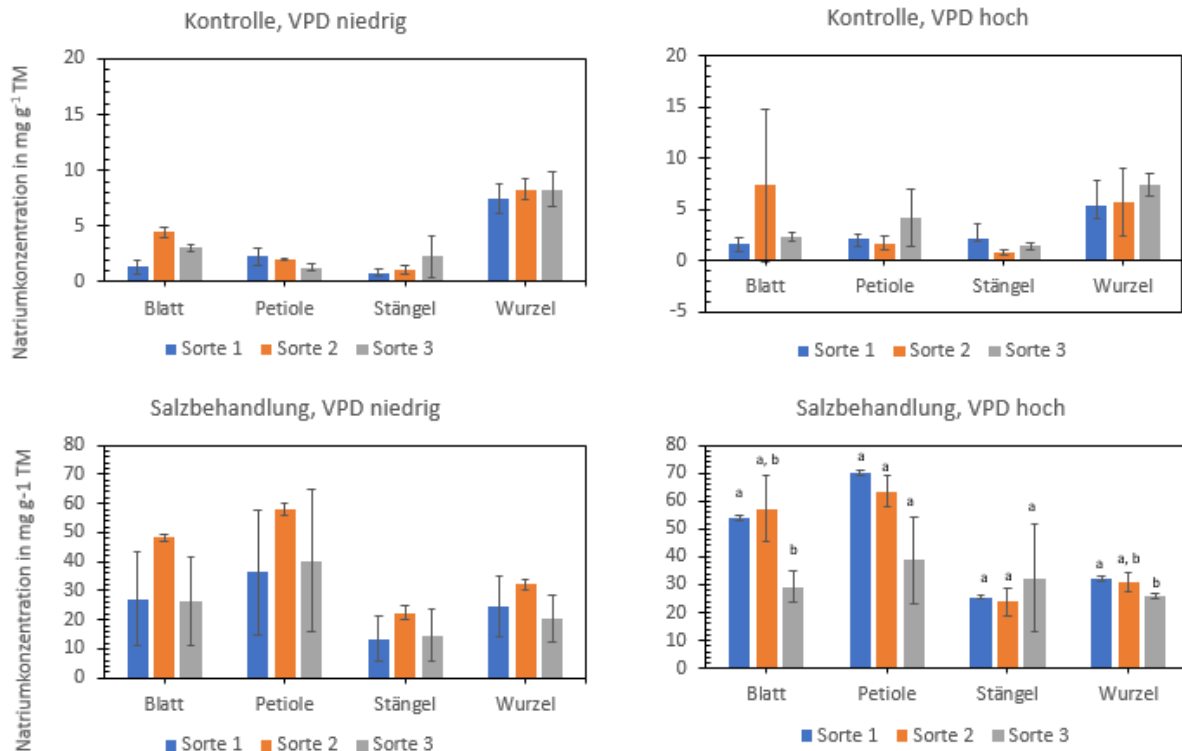


Abbildung 11: Darstellung der Natriumkonzentration in $\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$ der Pflanzenorgane über die Wiederholungen ($n=3$) in unterschiedlichen VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

4.3. Verteilung des Kaliums

In den Kontrollen ist der Kaliumgehalt höher als in den Salzbehandlungen (Tab. 4). Unterschiede zwischen den Sorten ($p < 0,05$) konnten ausschließlich in den Kontrollen festgestellt werden, welche durch eine einfaktorielle Varianzanalyse statistisch abgesichert wurden. Die Signifikanzen waren bei niedrigem VPD zwischen den Sorten 1 und 2 mit der Sorte 3 und bei hohem VPD zwischen der Sorte 2 und 3 vorzufinden. Der höchste Kaliumgehalt war in der Kontrolle bei hohem VPD der Sorte 2 mit 108,87 mg zu finden. Generell waren die Kaliumwerte der Sorte 3 in beiden VPD am niedrigsten. Dort lagen die Gehalte zwischen 45,70 mg und 62,76 mg. Höhere Kaliumgehalte waren bei niedrigem VPD der Kontrollen mit 0,60 mg und bei den Salzbehandlungen mit einem Gehalt von 4,73 mg größer als bei hohem VPD. Signifikante Unterschiede zwischen den Salzkontrollen waren bei niedrigem VPD bei der Sorte 2 und bei hohem VPD in der Sorte 1 und 2 vorhanden.

Tabelle 4: Kaliumgehalt in mg pro Behandlung gemittelt über die Wiederholungen (n=3) mit entsprechenden Standardfehlern. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet und signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen der Salzbehandlung mit der Kontrolle mit * gekennzeichnet.

K-Gehalt	Kontrolle				Salzbehandlung		
	Mg	Mittelwert	Standardfehler $\pm$		Mittelwert	Standardfehler $\pm$	
Bei niedrigem VPD	Sorte 1	108,17	4,50	a	68,27	28,21	a
	Sorte 2	100,45	7,07	a	51,25*	5,12	a
	Sorte 3	57,26	9,77	b	45,70	8,58	a
Bei hohem VPD	Sorte 1	92,44	14,03	a, b	53,62*	7,70	a
	Sorte 2	108,87	4,58	a	49,27*	10,94	a
	Sorte 3	62,76	3,71	b	48,14	3,04	a

Die Kaliumverteilung in den Pflanzenabschnitten hinsichtlich des Alters ist relativ homogen zwischen den VPD-Stufen, dies wird aus der Abbildung 12 deutlich. Ausnahme war der Kaliumanteil in den Wurzeln der Salzbehandlungen der Sorte 2 bei niedrigem VPD und der Sorte 1 bei hohem VPD, da der Anteil größer war als bei den anderen Behandlungen. Im Durchschnitt war der Anteil bei den sehr jungen Pflanzenabschnitten mit 13,07 % am geringsten und bei jungen Pflanzenteilen mit etwa 26,79 % am höchsten. Die Anteile der mittelalten, alten Sprossachse und den Wurzelteilen lagen zwischen 16,94 % und 22,34%.

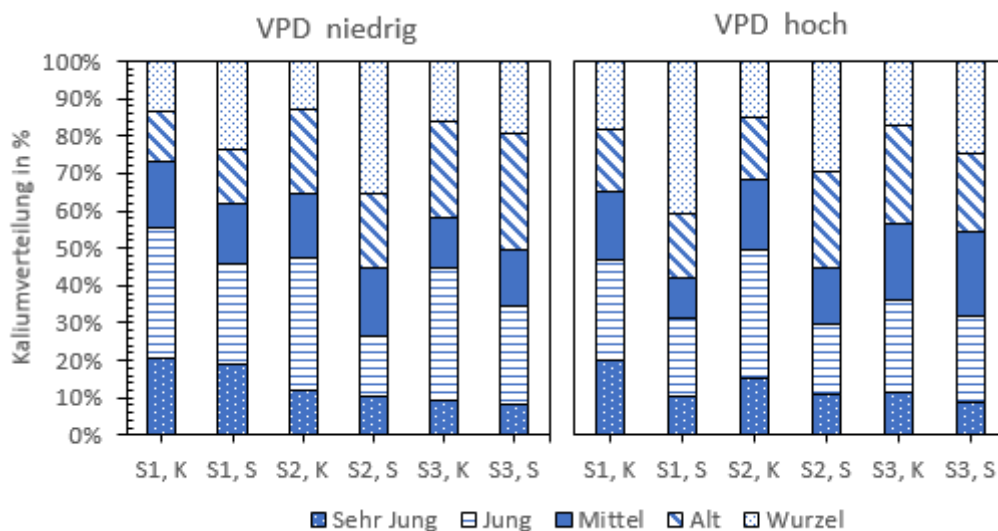


Abbildung 12: Die relative Verteilung von Kalium in der Pflanze über die Wiederholungen (n=3) in %. Abgebildet ist der gesamte Kaliumgehalt der jeweiligen Sprossabschnitts in Relation zum gesamten Kaliumgehalts in der Pflanze. S1, S2 und S3 sind die entsprechenden Sorten 1, 2 und 3; K steht für Kontrolle und S für die Salzbehandlung.

In der Abbildung 13 ist die Verteilung von Kalium innerhalb der Pflanzenorgane dargestellt. Die Verteilung innerhalb der Pflanze ist hier ebenfalls homogen zwischen den unterschiedlichen VPD-Stufen. Aus der Abbildung XX ist zu erkennen, dass das Kalium vorwiegend in den Blättern mit einem Mittelwert von 30,11 % sowie in den Stängeln mit etwa 32,72 % vorkam. Den geringsten Anteil an Kalium wiesen die Petiole mit etwa 14,82 %. Durchschnittlich waren mit 22,35 % des Kaliums in den Wurzeln vorzufinden.

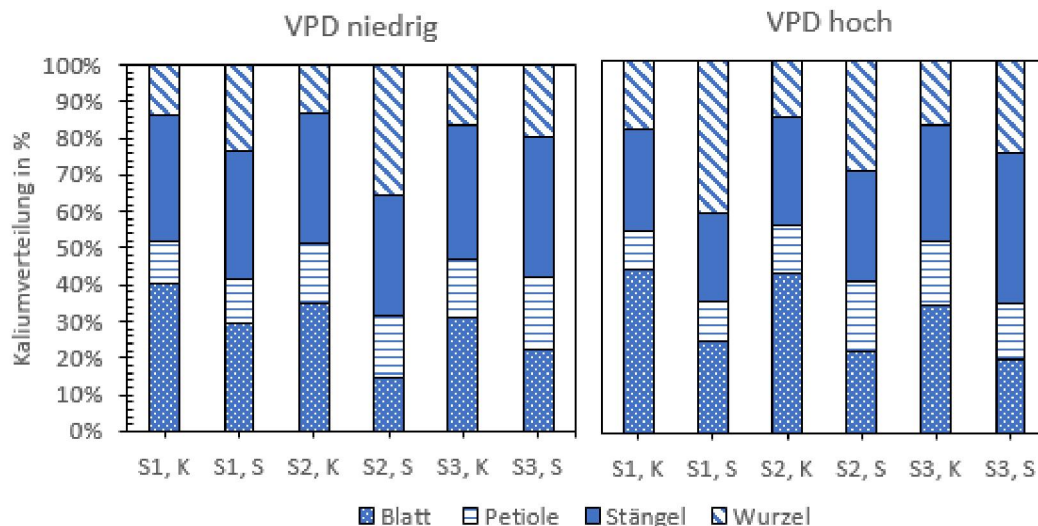


Abbildung 13: Die relative Verteilung von Kalium in der Pflanze über die Wiederholungen ($n=3$) in %. Abgebildet ist der gesamte Kaliumgehalt einzelner Pflanzenteile in Relation zum gesamten Kaliumgehalts in der Pflanze. S1, S2 und S3 sind die entsprechenden Sorten 1, 2 und 3.

Weder in den in den Kontrollen noch in den Salzbehandlungen gab es bezüglich der Kaliumkonzentration zwischen den Sorten signifikanten Unterschiede ($p<0,05$) (Abb. 14).

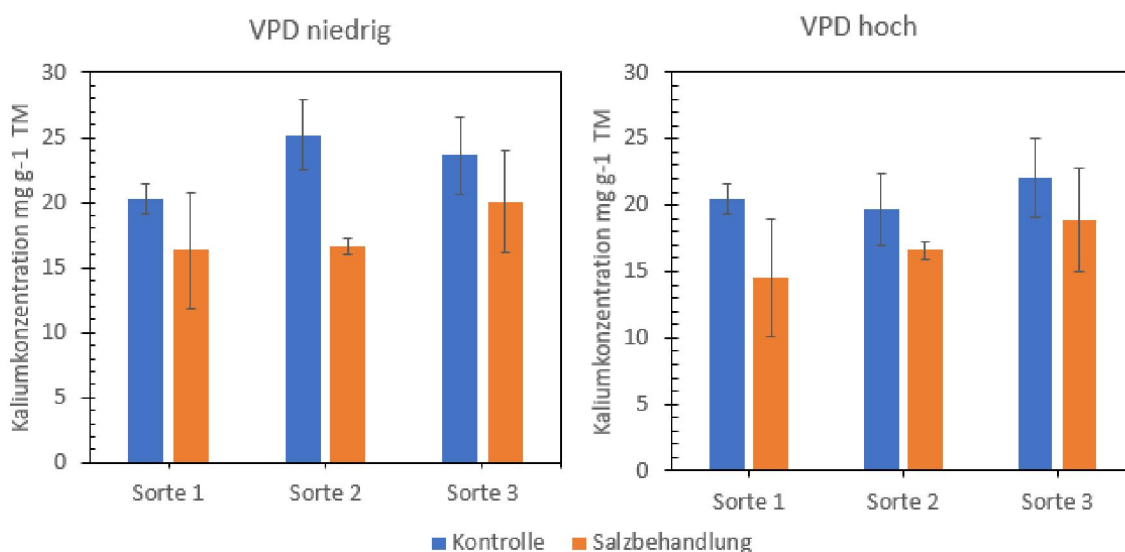


Abbildung 14: Darstellung der Kaliumkonzentration in $\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$ über die Wiederholungen ($n=3$) pro Behandlung in unterschiedlichen VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler.

Bei der Betrachtung der Kaliumkonzentration bezüglich des Pflanzenalters zwischen den Kontrollen kann man keine eindeutige Aussage machen, da die Konzentrationen variierten und die Standardfehler relativ hoch waren (Abb. 15). Das gleiche gilt für die VPD in den Salzbehandlungen.

In der Abbildung 16 ist die Kaliumkonzentration der Pflanzenorgane dargestellt. Die Konzentrationen in den Petiolen waren in jeder Behandlung am höchsten im Vergleich zu den anderen Pflanzenorganen. Zwischen den Kontrollen und den Salzbehandlungen war die Konzentration ähnlich verteilt in Bezug auf die Pflanzenorgane. Der höchste Wert lag in der Kontrolle bei niedrigem VPD der Sorte 3 mit $43,30 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ und der niedrigste Wert in der Salzbehandlung ebenfalls bei niedrigem VPD in der Sorte 2 im Blatt mit $7,20 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$.

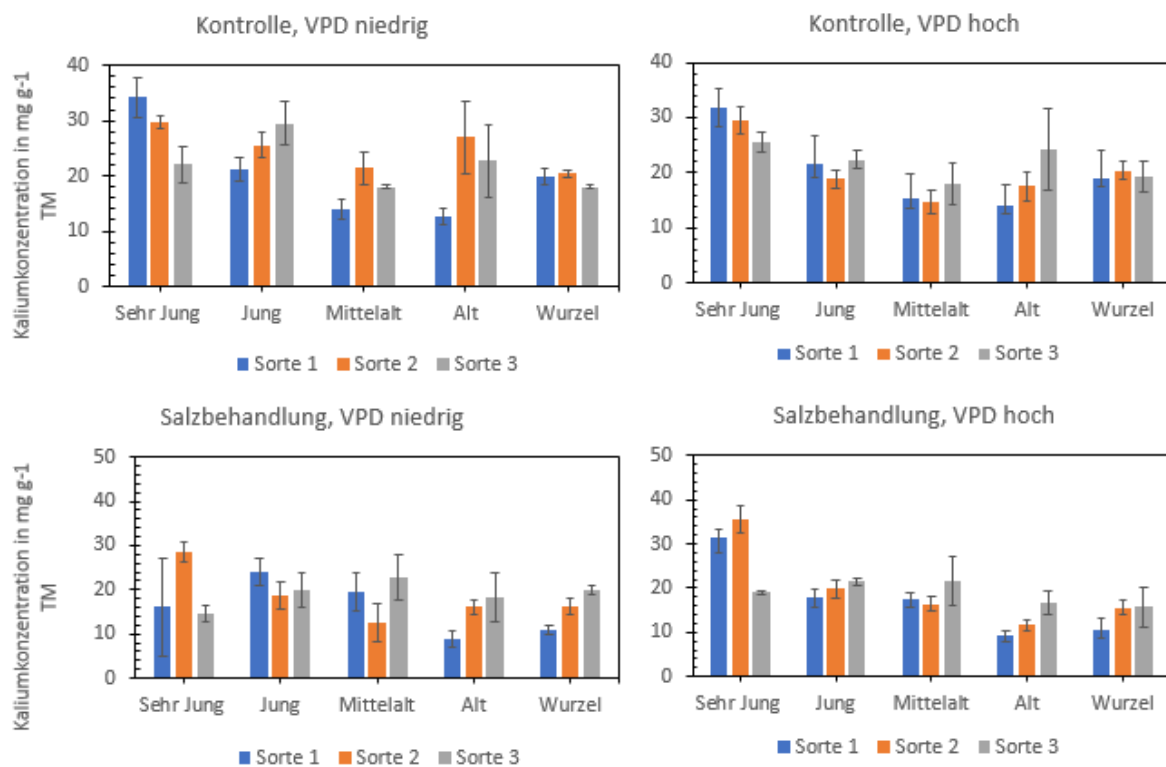


Abbildung 15: Darstellung der Kaliumkonzentration in $\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$ über die Wiederholungen ($n=3$) der Altersklassen in unterschiedlichen VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler.

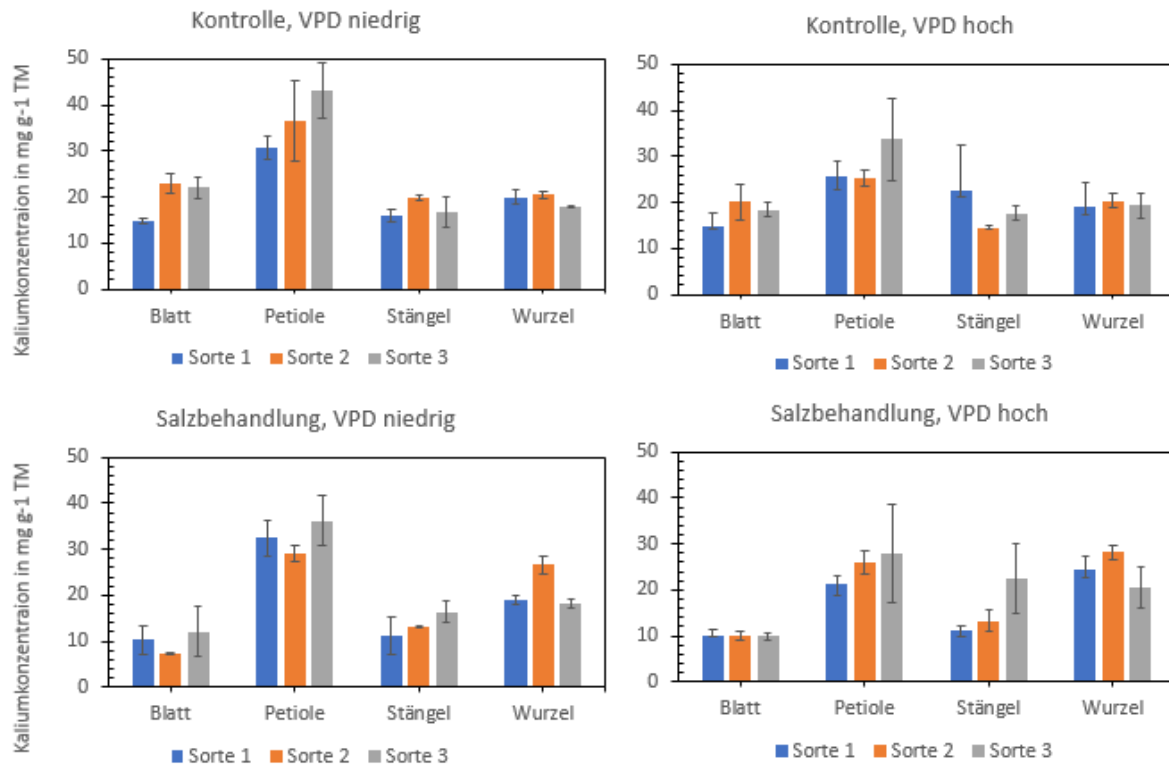


Abbildung 16: Darstellung der Kaliumkonzentration in mg g⁻¹ TM der Pflanzenorgane über die Wiederholungen (n=3) in unterschiedlichen VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler.

4.4. Verteilung des Chlorids

Durch eine einfaktorielle Varianzanalyse wurden signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) der Sorten im Chloridgehalt zwischen Sorte 1 und 3 in der Kontrolle bei niedrigem VPD festgestellt (Tab. 5). In der gleichen Kammer bei den Pflanzen, die mit Salz behandelt worden sind, gab es zwischen den Sorten 2 und 3 Signifikanzen ($p < 0,05$). Bei hohem VPD gab es sowohl bei der Kontrolle als auch bei der Salzbehandlung signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen der Sorte 1 und 2 mit der Sorte 3. Die Chloridgehalte waren geringer bei niedrigen VPD als bei hohem VPD. Bei den Kontrollen war ein Unterschied von 5,43 mg zu sehen. Mit einem Chloridgehalt von 216,83 mg hatte die Sorte 1 in der Salzbehandlung des hohen VPD den höchsten Wert. Wie auch bei den Natriumgehalten waren die Chloridgehalte der Sorte 3 in jeder Salzbehandlung und VPD-Stufen am niedrigsten. Signifikante Unterschiede zwischen den Salzkontrollen waren bei niedrigem VPD bei der Sorte 1 und bei hohem VPD in allen Sorten vorhanden.

Tabelle 5: Chloridgehalt in mg pro Behandlung gemittelt über die Wiederholungen (n=3) mit entsprechenden Standardfehlern. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet und signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen der Salzbehandlung mit der Kontrolle mit * gekennzeichnet.

Cl-Gehalt	Kontrolle				Salzbehandlung		
	Mg	Mittelwert	Standardfehler $\pm$		Mittelwert	Standardfehler $\pm$	
Bei niedrigem VPD	Sorte 1	52,08	6,14	a	136,99*	36,72	a
	Sorte 2	45,38	14,26	a, b	190,98*	18,44	a
	Sorte 3	25,63	4,59	b	72,95	31,70	b
Bei hohem VPD	Sorte 1	56,62	14,11	a	216,83*	3,86	a
	Sorte 2	62,23	17,22	a	178,83*	23,82	a
	Sorte 3	20,55	3,84	b	68,28*	19,39	b

Die Verteilung des Chloridgehalts ist in den Altersstufen wie beim Kalium homogen verteilt zwischen den VPD-Stufen (Abb. 17). Im sehr jungen Pflanzenabschnitt ist der Chloridgehalt am geringsten mit einem Anteil zwischen 3,31 % und 17,05 %. Der höchste Anteil an Chlorid war in den jungen Pflanzenteilen mit 23,69 %. Zwischen 16,53 % und 19,21 % lag der Anteil bei den mittelalten Pflanzenteilen, alten Pflanzenteilen und den Wurzeln. Bei der Verteilung in den Pflanzenorganen des Chloridgehalts ist in der Abbildung 18 klar zu sehen, dass sich das meiste Chlorid in den Blättern angereichert hatte. Durchschnittlich lag die Verteilung an Chlorid bei 45,35 %, in manchen Behandlungen sogar über 50%. Nur etwa ein Fünftel machten der Anteil in den Stängeln aus mit 20,41 %, gefolgt von den Wurzeln mit 19,88 % im Durchschnitt. Der geringste Anteil war in den Petiolen mit etwa 14,36 % zu sehen.

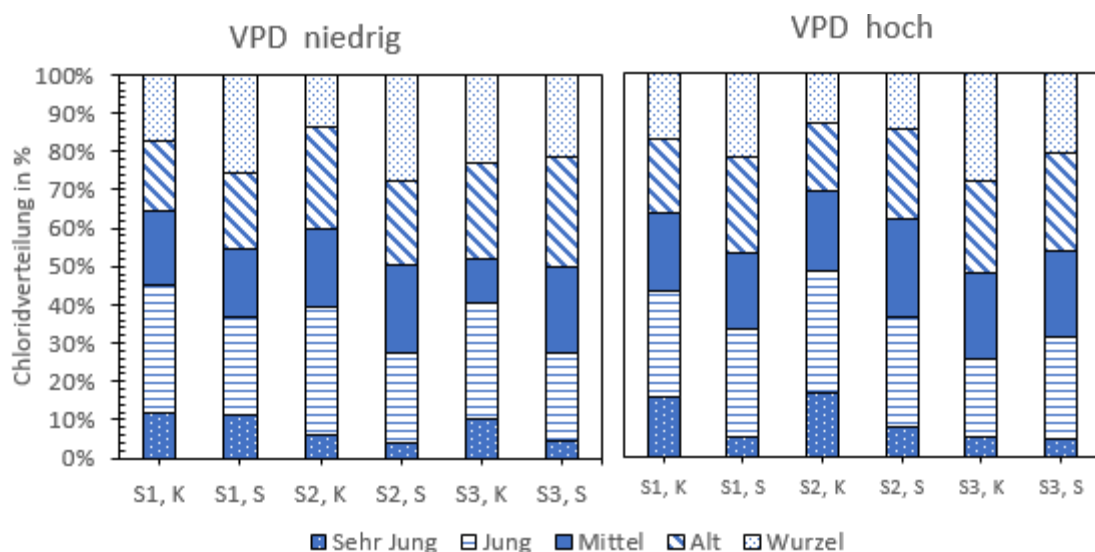


Abbildung 17: Die relative Verteilung von Chlorid in der Pflanze über die Wiederholungen (n=3) in %. Abgebildet ist der gesamte Chloridgehalt der jeweiligen Sprossabschnitts in Relation zum gesamten Chloridgehalts in der Pflanze. S1, S2 und S3 sind die entsprechenden Sorten 1, 2 und 3; K steht für Kontrolle und S für die Salzbehandlung.

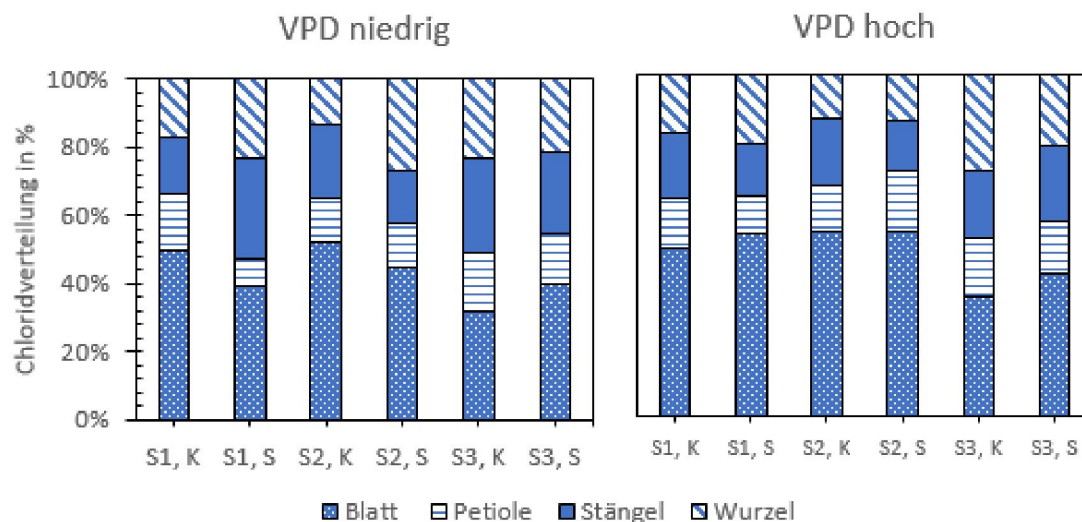


Abbildung 18: Die relative Verteilung von Chlorid in der Pflanze über die Wiederholungen ($n=3$) in %. Abgebildet ist der gesamte Chloridgehalt einzelner Pflanzenteile in Relation zum gesamten Chloridgehalts in der Pflanze. S1, S2 und S3 sind die entsprechenden Sorten.

Die gesamte Chloridkonzentration ist in der Abbildung 19 zu erkennen. Lediglich bei den Salzbehandlungen bei hohem VPD gab es zwischen den Sorten 1 und 2 mit der Sorte 3 Signifikanzen ($p<0,05$). Mit einer Konzentration von $69,75 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ hatte die Sorte 2 in der Salzbehandlung des niedrigen VPD den höchsten Wert. Die Sorten 1 und 2 zeigten deutlich höherer Konzentrationen in den Salzbehandlungen als Sorte 3. In den Kontrollen war die Konzentration im niedrigen VPD mit $0,10 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ minimal höher als bei hohem VPD. Der Unterschied der Chloridkonzentration bei Salzbehandlungen war $4,70 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$, wobei ebenfalls die Konzentration bei niedrigem VPD höher waren.

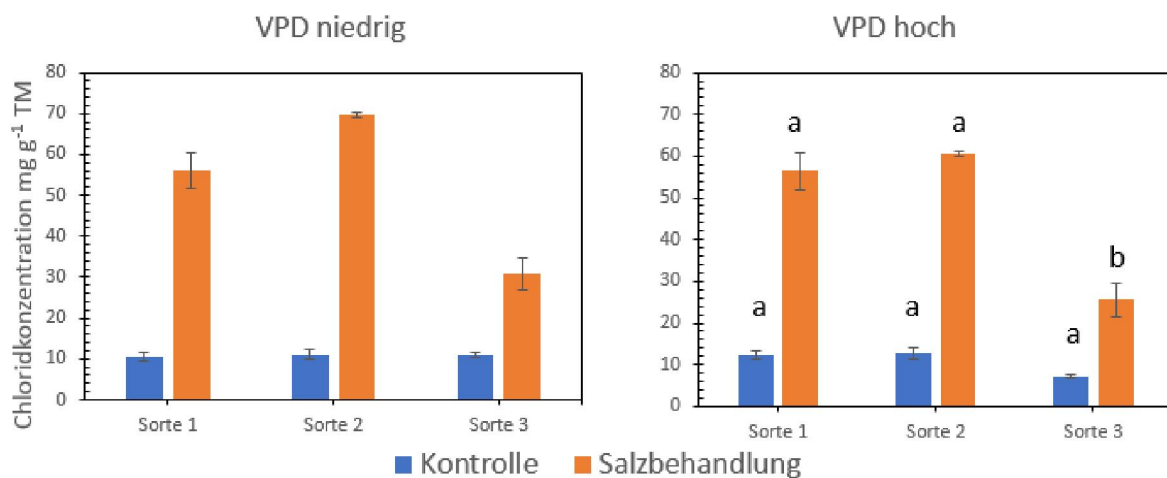


Abbildung 19: Darstellung der Chloridkonzentration in $\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$ über die Wiederholungen ($n=3$) pro Behandlung in unterschiedlichen VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler. Signifikante Unterschiede ($p<0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

Hinsichtlich der Altersgruppen gab es nur signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) in der Salzbehandlung bei hohem VPD in allen Pflanzenabschnitten (Abb. 20). Bei den sehr jungen und jungen Pflanzenteilen gab es Signifikanzen ($p < 0,05$) zwischen der Sorte 1 und 3. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) bei den mittelalten Pflanzenteilen gab es zwischen der Sorte 2 und 3. Im alten Pflanzenabschnitt und in den Wurzeln gab es zwischen den Sorten 1 mit den Sorten 2 und 3 signifikante Unterschiede ($p < 0,05$). Die Chloridkonzentrationen der Pflanzenteile lagen bei Kontrollen unter einer Konzentration von $16,32 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ und waren, bis auf einen Wert bei hohem VPD im sehr jungen Pflanzenabschnitt der Sorte 2 mit einer Konzentration von $23,68 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$, sehr ähnlich. Bei dieser Konzentration jedoch hat man einen sehr hohen Standardfehler. Man kann zwischen den Kontrollen keine eindeutigen Aussagen machen, da die Konzentrationen unterschiedlich sind. Sowohl bei hohem VPD als auch bei niedrigem VPD waren die Konzentrationen der Salzbehandlungen der Sorten 1 und 2 deutlich höher als bei der Sorte 3. Bei den Pflanzenorganen gab es nur Signifikanzen ($p < 0,05$) zwischen Sorte 1 und 2 mit der Sorte 3 bei hohem VPD der mit Salz behandelten Pflanzen bei den Blättern, Petiolen und Stängeln (Abb. 21). In allen Behandlungen war die Chloridkonzentration vorwiegend in den Petiolen mit etwa $16,73 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ in den Kontrolle und $71,95 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ bei den Salzbehandlungen am höchsten. Im Gegensatz zu den Stängeln, welche die niedrigste Konzentration im Schnitt mit $5,25 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ in den Kontrollen und $19,73 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$ in der Salzbehandlungen hatten.

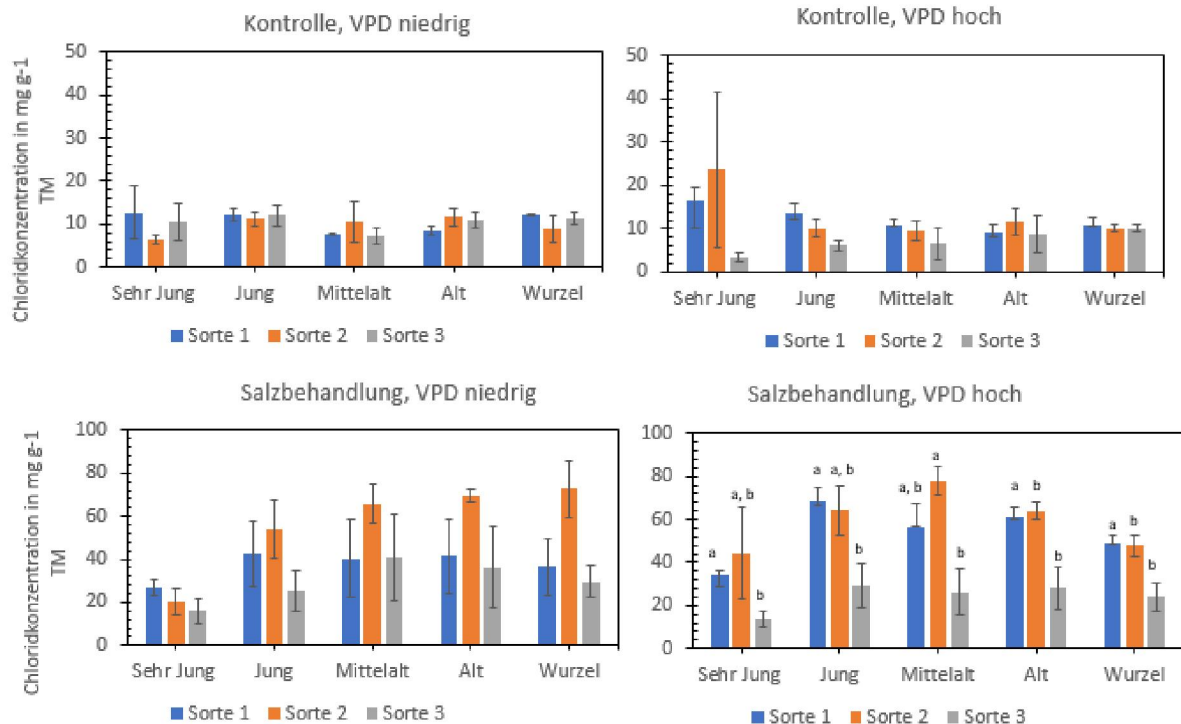


Abbildung 20: Darstellung der Chloridkonzentration in mg g^{-1} TM über die Wiederholungen ($n=3$) der Altersklassen in unterschiedlichen VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

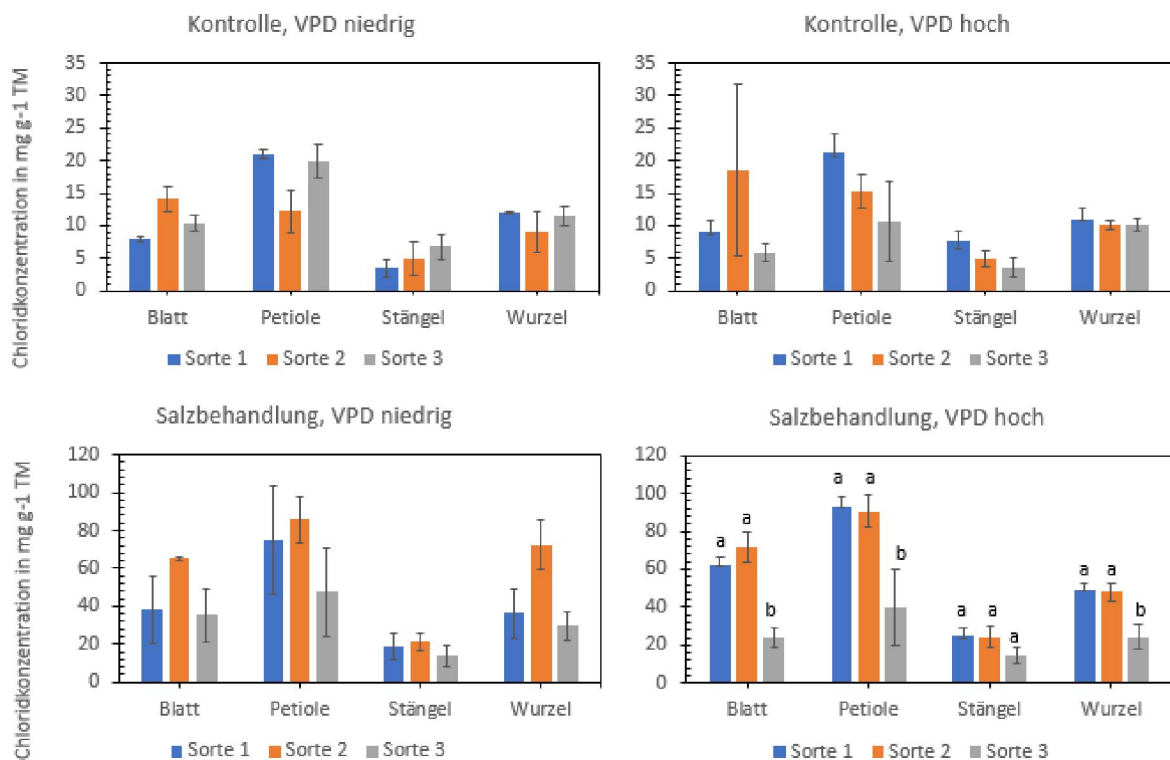


Abbildung 21: Darstellung der Chloridkonzentration in mg g^{-1} TM der Pflanzenorgane über die Wiederholungen ($n=3$) in unterschiedlichen VPD-Stufen und Salzbehandlungen mit Standardfehler. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

4.5. Wasserverbrauch

4.5.1. Kumulative Transpiration über Messzeitraum

Der Wasserverbrauch der Pflanzen wurde über die Wägung ermittelt. Die höchste Transpiration war in der Sorte 2 in der Kontrolle bei hohem VPD mit einem Wasserverbrauch von 2131 ml. In der salzbehandelten Sorte 1 bei niedrigem VPD war der niedrigste Wert mit 1339 ml. Es gab keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) zwischen den Sorten in den VPD-Stufen, weder in den Kontrollen und in den Salzbehandlungen. In der Abbildung 22 ist die kumulierte Transpiration bei niedrigem VPD der Kontrolle dargestellt. Jede Behandlung zeigte einen stetig steigenden Wasserverbrauch. Zwischen den Kontrollen hatte die Sorte 1 im Verlaufe des Messzeitraumes den höchsten Wasserverbrauch mit 1814 ml, im Vergleich zu den Sorten 2 mit 1572 ml und Sorte 3 mit 1549 ml. Bei den mit Salz behandelten Pflanzen hat die Sorte 1 den höchsten Wert mit 1577 ml erreicht. Die Sorte 2 hatte den niedrigsten Wasserverbrauch mit 1339 ml. Durchschnittlich lag der Wasserbrauch der Kontrollen bei 1645 ml und bei den Salzbehandlungen bei 1451 ml.

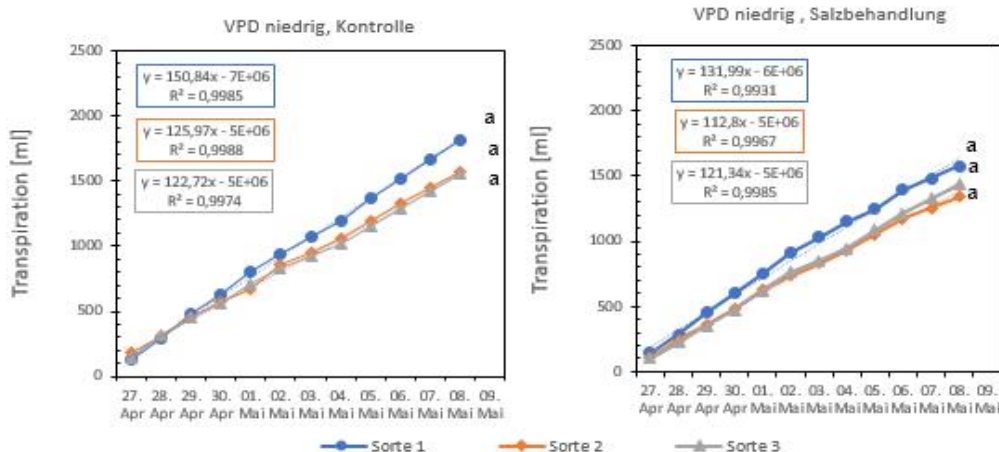
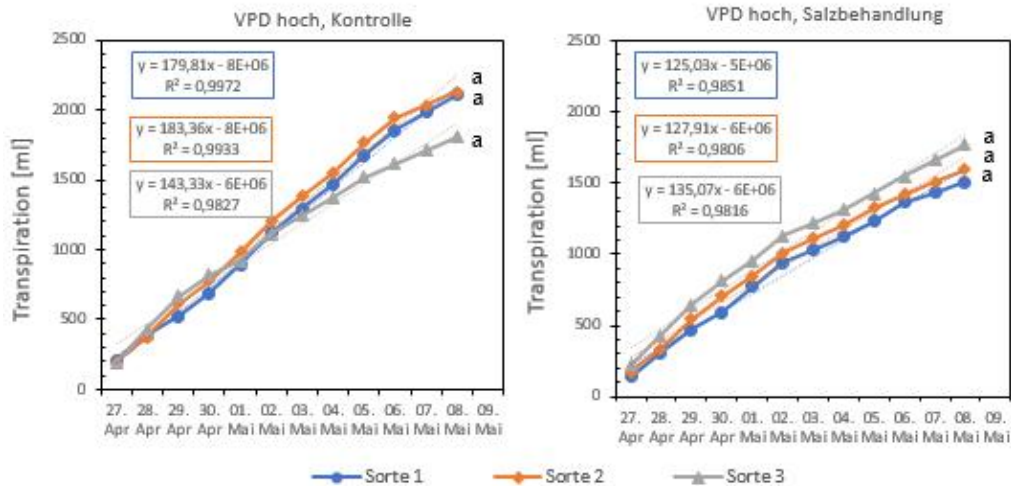


Abbildung 22: Kumulierte Transpiration der Kontrollen und Salzbehandlungen der Sorte 1,2 und 3 über den gesamten Messzeitraum bei niedrigem VPD. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

Die kumulierte Transpiration in ml der Pflanzen der Kontrollen und der Salzbehandlungen bei hohem VPD sind in der Abbildung 23 dargestellt. Die Sorte 1 und Sorte 2 in der Kontrolle wiesen einen nahezu gleichen Wasserverbrauch im

Verlaufe des Messzeitraumes auf. Sie erreichten einen Gesamtverbrauch an Wasser von jeweils etwa 2100 ml. Die Sorte 3 hatte lediglich einen Wasserverbrauch von 1805 ml. Die Sorten in den Salzbehandlungen zeigten einen durchschnittlichen



Wasserverbrauch von 1623 ml und die der Kontrollen bei etwa 2015 ml.

Abbildung 23: Kumulierte Transpiration der Kontrollen und Salzbehandlungen der Sorte 1, 2 und 3 über den gesamten Messzeitraum bei hohem VPD. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

4.5.2. Tägliche Transpirationsrate

Die Transpirationsrate der drei Sorten in Kontrolle und Salzbehandlung im Verlauf des Messzeitraumes bei niedrigem VPD ist in der Abbildung 24 dargestellt. Alle Pflanzen weisen eine sinkende Transpirationsrate im Verlauf des Versuches auf. Im Schnitt transpierte die Sorte 3 in der Kontrolle deutlich mehr mit $3,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Die Sorten 1 und 2 etwa $1,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Wasserverbrauch und zeigten zu Sorte 3 einen

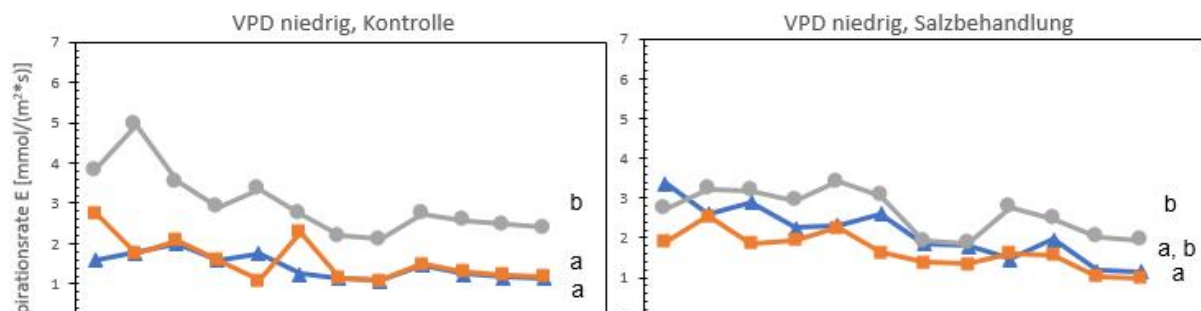


Abbildung 24: Transpirationsrate der Kontrollen und Salzbehandlungen der Sorte 1, 2 und 3 über den gesamten Messzeitraum bei niedrigem VPD. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet.

signifikant geringeren Unterschied ($p < 0,05$). Bei der Salzbehandlung hatte die Sorte 3 die höchste Transpiration mit $2,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Lediglich zwischen den Sorten 2 und 3 gab es Signifikanzen ($p < 0,05$). Bei den Kontrollen lag die durchschnittliche Transpirationsrate bei $2,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und bei der Salzbehandlung bei $2,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

In der Abbildung 25 ist die Transpirationsrate bei hohem VPD dargestellt. Bei den Kontrollen gab es keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) zwischen den Sorten. Die Transpirationsrate der Sorten war bei der Kontrolle gegen Ende des Versuches ähnlich. Die Werte lagen zwischen $2,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und $2,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Deutliche Unterschiede zwischen den Sorten gab es bei den mit Salz behandelten Pflanzen. Die höchste Transpiration hatte die Sorte 3 mit einem durchschnittlichen Wert von $3,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) waren zwischen den Sorten 1 und 2 mit der Sorte 3 zu erkennen. Durchschnittlich lag Transpirationsrate der Kontrollen bei $2,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und bei der Salzbehandlung bei $2,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

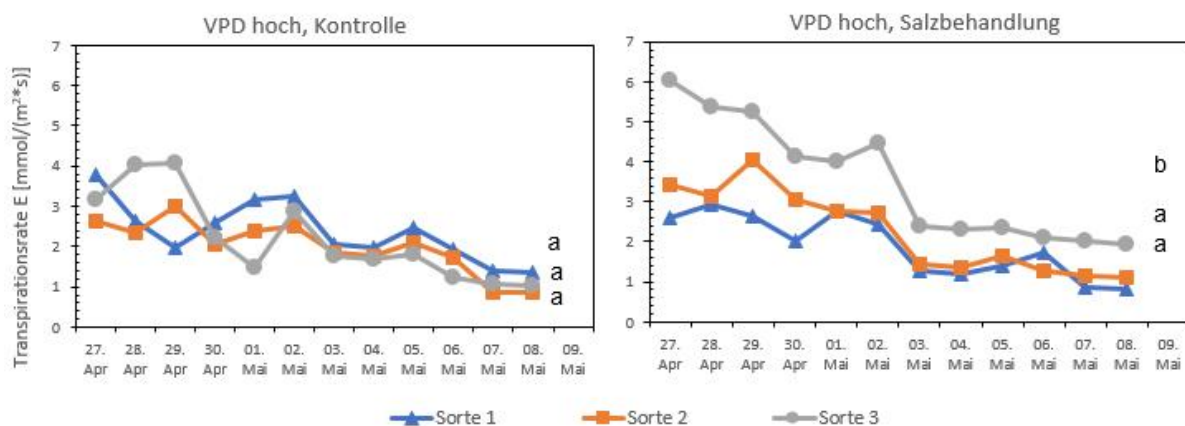


Abbildung 25: Transpirationsrate der Kontrollen und Salzbehandlungen der Sorte 1,2 und 3 über den gesamten Messzeitraum im Bei hohem VPD. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten sind mit a, b gekennzeichnet

4.5.3. Transpirationsrate und VPD

Der Zusammenhang zwischen Transpirationsrate und VPD in Bezug auf die unterschiedlichen Salzbehandlungen der Sorte 1 ist in der Abbildung 26 dargestellt. Es gab nur signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen Kontrolle und Salzbehandlung bei niedrigem VPD und zwischen den Kontrollen beider VPD-Stufen. Die Trendlinie der Salzbehandlung bei niedrigem VPD deutet darauf hin, dass mehr transpirierten als bei den Kontrollpflanzen. Die Kontrolle bei hohem VPD hat das höchste Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,1743$ und das niedrigste die Kontrolle im niedrigen VPD mit $R^2 = 0,0587$.

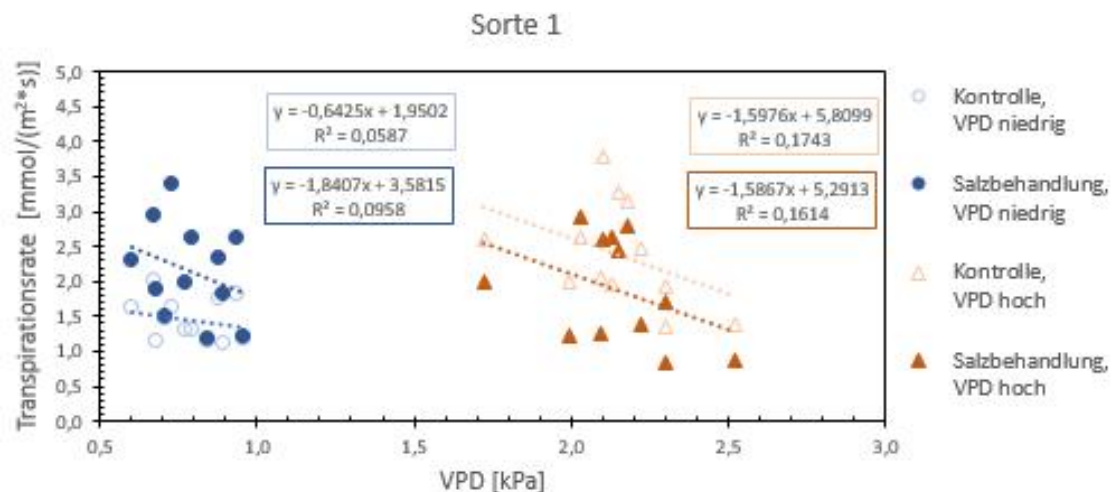


Abbildung 26: Korrelation von Transpirationsrate und VPD der Sorte 1 mit den vier Behandlungen, jeweils mit einer Gleichung der Regressionsgerade und dem Bestimmtheitsmaß.

Bei der Sorte 2 ergab die Auswertung für alle Behandlungen zwischen Transpirationsrate und VPD keinen signifikanten Unterschied ($p > 0,05$). Zudem ergaben die Punktwolken der VPD-Stufen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Salzbehandlungen (Abb. 27). Das höchste Bestimmtheitsmaß hat die Salzbehandlung bei hohem VPD mit $R^2 = 0,2609$ und das niedrigste die Salzbehandlung bei niedrigem VPD mit $R^2 = 0,0067$.

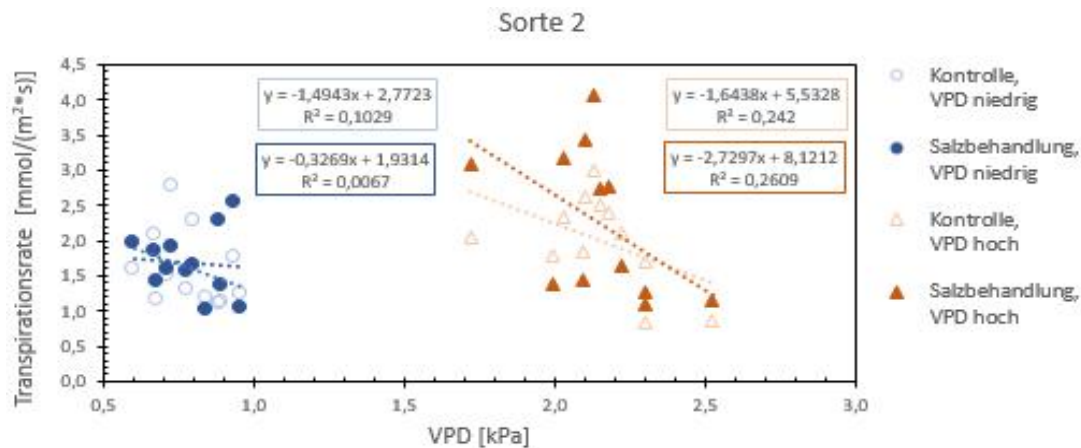


Abbildung 27: Korrelation von Transpirationsrate und VPD der Sorte 2 mit den vier Behandlungen, jeweils mit einer Gleichung der Regressionsgerade und dem Bestimmtheitsmaß.

Auch bei der Sorte 3 bei niedrigem VPD, zeigten die Punktwolken keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Salzbehandlungen (Abb. 28). Bei hohem VPD jedoch ist ein Unterschied der Salzbehandlungen deutlich an den Trendlinien zu erkennen. Nur zwischen den Salzbehandlungen bei hohem VPD ergab die Auswertung signifikante Unterschiede ($p < 0,05$). Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,2102$ hat die Salzbehandlung bei hohem VPD den höchsten Wert und den niedrigsten Wert die Kontrolle bei niedrigem VPD mit $R^2 = 0,0149$.

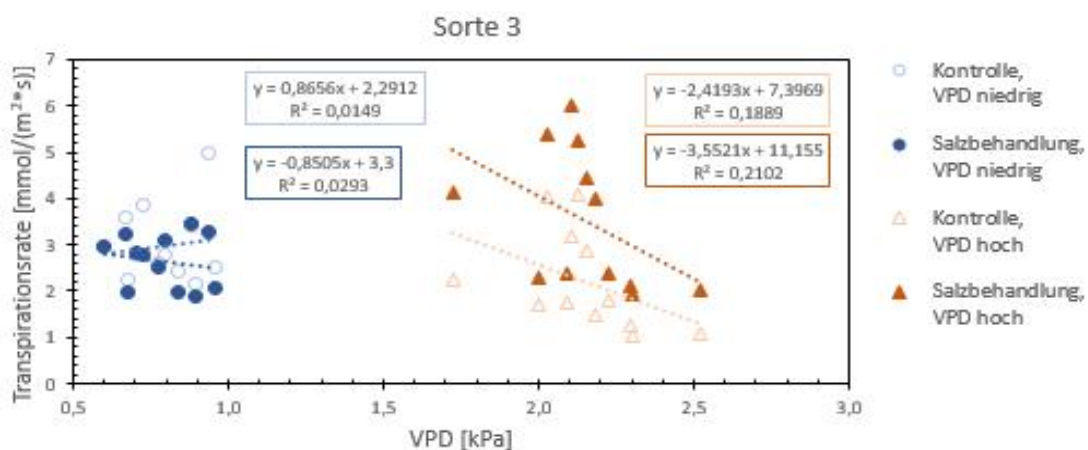


Abbildung 28: Korrelation von Transpirationsrate und VPD der Sorten 3 mit den vier Behandlungen, jeweils mit einer Gleichung der Regressionsgerade und dem Bestimmtheitsmaß.

4.5.4. Transpiration und Ionen

Der Zusammenhang zwischen Transpiration und den jeweiligen Ionengehalten ist in der Abbildung 29 dargestellt. Die zwölf Datenpunkte repräsentieren die Mittelwerte der Transpiration und Ionengehalte der drei Süßkartoffelsorten bei zwei VPD-Stufen und zwei Salzbehandlungen. Eine lineare Regressionsgerade wurde an die Datenpunkte angepasst. Die Natrium- und Chloridgehalte nahmen mit erhöhter Transpiration ab. Bei einer vermehrten Transpiration wurde der Kaliumgehalt zunehmend höher. Einen signifikanten Einfluss ($p < 0,05$) gab es nur bei hohem VPD zwischen der Transpiration und den Natriumgehalten der Salzbehandlungen und zwischen der Transpiration und den Chloridgehalten der Kontrollen. In Anbetracht der Abbildung 29 in Bezug auf die Natrium- und Chloridgehalte zeigten die Behandlungen bei niedrigem VPD ein geringere Transpiration und damit verbunden geringe Gehalte an Ionen. Bezüglich des Kaliums war die Transpiration bei hohem VPD größer als bei niedrigem VPD bei ähnlichen Kaliumgehalten.

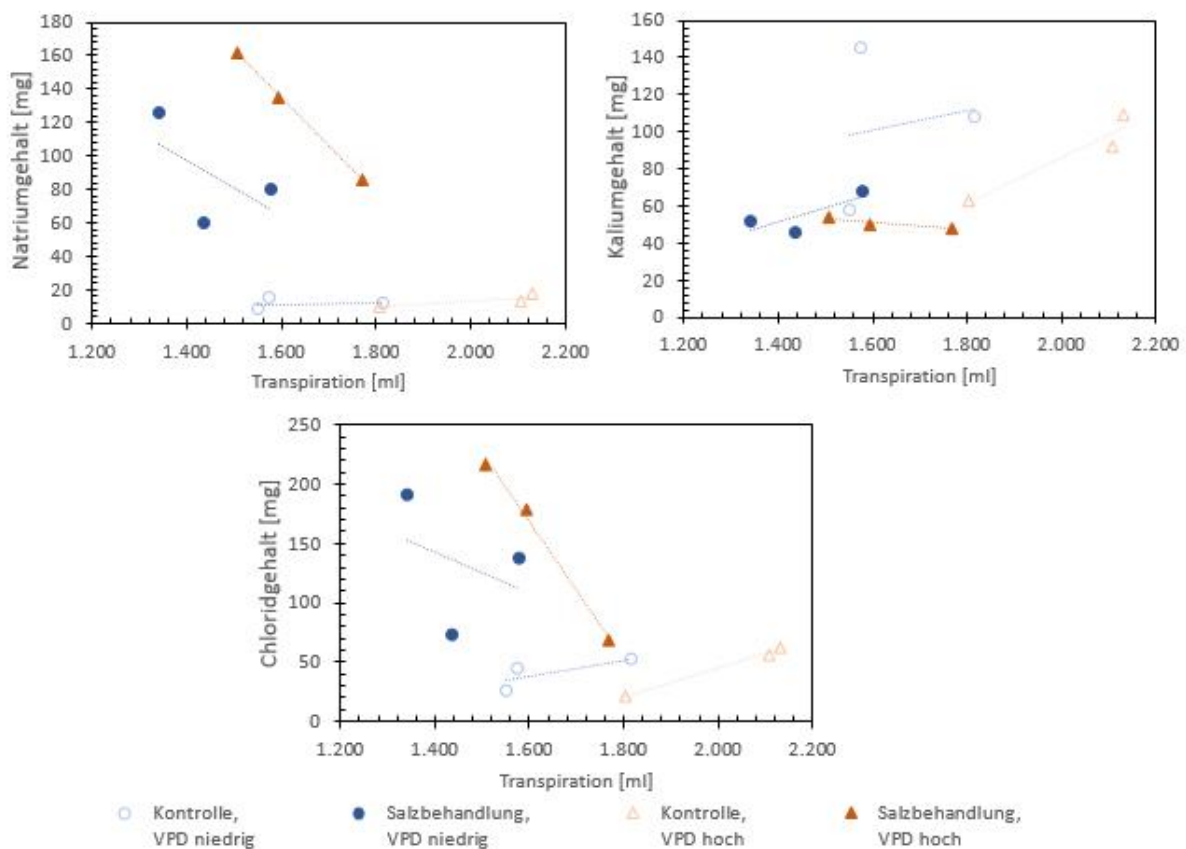


Abbildung 29: Korrelation von Ionengehalten in mg und Transpiration in ml der zwölf Behandlungen mit der Gleichung der Regressionsgeraden und dem zugehörigem Bestimmtheitsmaß. a) Natriumgehalt; b) Kaliumgehalt; c) Chloridgehalt.

5. Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss von VPD auf die Aufnahme und Verteilung von Natrium, Kalium und Chlorid bei Süßkartoffeln unter Salzstress zu untersuchen. Die Süßkartoffeln wurden bei zwei unterschiedlichen VPD-Stufen und zwei Salzbehandlungen in einem hydroponischen System aufgezogen. Die Natrium-, Kalium- und Chloridverteilung wurde bei allen Pflanzenteilen sowie Sprossabschnitten der Haupttriebe gemessen. Die Transpiration der Behandlungen wurde während der Salzapplikation erfasst. Zusätzlich wurden morphologische Unterschiede ermittelt. Es wurden Vergleiche zwischen den Sorten und den Salzbehandlungen gemacht. Der größte Effekt sollte zwischen hohem VPD der Kontrollen und niedrigem VPD der Salzbehandlungen zu erkennen sein.

5.1. Unterschiede in der Morphologie

In diesem Versuch konnten die Beobachtungen eines verringerten Rankenwachstums der Süßkartoffeln unter Salzstress von Greig und Smith (1962) nicht bestätigt werden. Es gab keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) in der Trockenmasse bei niedrigem und hohem VPD zwischen Kontrolle und Salzbehandlung. Die Untersuchungen von Begum et al. (2015), die zeigten, dass die Salinität einen negativen Einfluss auf das Wachstum der Süßkartoffeln hatte, konnten mittels dieser Versuche betätigt werden. Einige Pflanzen, die mit Salz behandelt worden waren, zeigten gelbe Verfärbungen der Blätter sowie Verwelkung am Blattrand. Dass salzempfindliche Sorten bei einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit einen Anstieg des Wachstums unter Salzstress erzielten, wie bei den Beobachtungen von salzempfindlichen Tomatensorten von An et al. (2015), konnten diese Versuche nicht bestätigt werden. Es gab keine signifikante Unterschiede zwischen den Sorten der Salzbehandlungen bezüglich der Trockenmasse. Die Kombination von Salzstress und hohem VPD führte laut Jagadish (2012) bei Reis zum Absterben der Blätter. Bei einigen Versuchspflanzen sind die Blätter abgestorben, jedoch konnten keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) bei niedrigem und hohem VPD zwischen der Kontrolle und Salzbehandlung hinsichtlich der Blattfläche nachgewiesen werden. Nur bei der Trockenmasse konnte

bei hohem VPD der Sorte 2 signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen Salzbehandlungen ermittelt werden. Vermutlich lag dies daran, dass die Dauer der Salzapplikation zu kurz war und die Versuchspflanzen nicht lang genug gestresst worden sind um das Absterben der Pflanzenorgane zu bewirken. Bei diesem Versuch wurden nur die Messungen der Haupttriebe ermittelt, daher sind die erhobenen Daten in Bezug auf Inhomogenität der Pflanzen nicht aussagekräftig genug, um die Untersuchungen statistisch zu bestätigen. Lediglich bei den Pflanzen der Sorte 2 bei hohem VPD konnten signifikant negative Auswirkungen auf die Trockenmasse unter Salzstress festgestellt werden. Daher ist anzunehmen, dass die Sorte 2 unter Salzstress bei hohem VPD empfindlicher reagiert als die übrigen zwei Sorten.

5.2. Ionenverteilung

Eine höhere Anreicherung von Natrium und Chlorid konnte in den Pflanzen der Salzbehandlungen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse deckten sich mit dem Versuch von Begum et al. (2015). Auch die Verringerung des Kaliumgehaltes in den Pflanzen während des Salzstress stimmten mit der Versuchsergebnissen von Begum et al. (2015) überein.

Das Natrium wird hauptsächlich durch den Transpirationsfluss in die Pflanze verlagert. Besonders in den Blättern und Stängeln ist die Anreicherung von Natrium laut White (2012) vorzufinden. In diesem Versuch stellten sich ähnliche Resultate der Akkumulation von Natrium in Blättern und Stängeln bei niedrigem und hohem VPD in Bezug auf das Natriumverteilung ein. Im Hinblick auf die Konzentration waren jedoch vermehrt Natrium in Blättern und Petiole zu erkennen. Aber aufgrund großer Standardfehler konnte keine eindeutige Aussage getroffen werden. Unterschiede zwischen den Sorten bei niedrigem und hohem VPD in Bezug auf das Natriumgehalt gab es nur zwischen Sorte 1 und 2 mit der Sorte 3. Daher kann die Aussage von An et al. (2001), dass im Vergleich die salztolerante Sojasorte zur salzempfindlichen Sojasorte eine schlechtere Fähigkeit besaß, Natriumionen aus den Wurzeln auszuschließen, bei Süßkartoffeln nicht bestätigt werden. Nur signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Sorten gab es in der Natriumkonzentration der Salzbehandlung bei hohem VPD. Die Natriumkonzentration der Sorte 1 war höher als bei der Sorte 3. Auch eine steigende relative Luftfeuchtigkeit, die dazu führt, dass eine

Verminderung der Natriumaufnahme und -verteilung in den Blättern vorhanden war, konnte ebenfalls nicht belegt werden. Die überschüssigen Ionen werden laut Singh et al. (2002) von der Pflanze in die älteren Pflanzenteile verlagert, da sie bald absterben und die jungen Blätter vor der Salinität geschützt sind. Durch diesen Versuch bestätigt sich diese Aussage, da die Verlagerung von Natrium in die älteren Pflanzenteile größer war als bei den jüngeren Pflanzenteilen.

Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) der Kaliumgehalte waren zwischen Sorten und Salzbehandlungen vorhanden. Zur Kaliumkonzentration können keine signifikanten Aussagen getroffen werden, da aufgrund von unterschiedlichen Werten die Standardfehler sehr hoch waren. Dass die Menge an Kalium bei erhöhtem Salzstress sinkt und tendenziell in die Triebe transportiert wird (Begum et al., 2015), um den K-Gehalt aufrecht zu erhalten, konnte bestätigt werden. Die Verteilung der Kaliumkonzentration in Pflanzenorganen und -teilen verhält sich bei niedrigem und hohem VPD ähnlich.

Die Chloridgehalte in den Versuchspflanzen waren bei den mit Salz behandelten Pflanzen mit einer Ausnahme signifikant ($p < 0,05$) höher. Es gab Signifikanzen ($p < 0,05$) zwischen den Sorten bei niedrigem und hohem VPD. Die Chloridkonzentrationen in der Salzbehandlung bei hohem VPD der Sorte 1 und 2 waren höher im Vergleich zur Sorte 3. Generell verhält sich die Chloridverteilung unterschiedlich zu der Natriumverteilung in der Pflanze. Während die Natriumionen in den jüngeren Pflanzenteilen verlagert wurden, befanden sich die Chloridionen gleichermaßen in der Pflanze verteilt. In Bezug auf die Pflanzenorgane sind die Chloridionen vermehrt in den Blättern und Natriumionen eher in Blättern und Wurzeln verteilt. Bei der Untersuchung von Hasanuzzaman et al. (2013) waren die Konzentration von Chloridionen besonders hoch im Blattgewebe. Dies kann in diesem Versuch nicht bestätigt werden. Die Chloridkonzentration war vorwiegend in den Petiolen, gefolgt von den Blättern vorzufinden.

5.3. Transpiration

Über den Messzeitraum während der Salzapplikation herrschte in einer Kammer ein niedriger VPD mit Werten zwischen 0,60 kPA und 0,96 kPA und in der anderen

Kammer ein hoher VPD mit Werten zwischen 1,72 kPa und 2,52 kPa. Die höchste Transpiration war in der Sorte 2 der Kontrolle bei hohem VPD mit 2131 ml und der niedrigste bei der Salzbehandlung der Sorte 1 bei niedrigem VPD mit 1339 ml. Es gab zwischen den Sorten keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$), weder bei niedrigem noch bei hohem VPD. Daher lässt sich die Beobachtung von Salim (1989), dass aufgrund des Salzstresses eine Reduktion der Transpiration und damit eine Verringerung des Wasserflusses einhergeht, nicht bestätigt werden konnte.

Die tägliche Transpirationsrate sank im Verlaufe des Versuches sowohl bei niedrigem als auch bei hohem VPD. In fast jeder Behandlung zeigte die Sorte 3 signifikant höhere Transpirationsraten. Ausschließlich in der Kontrolle bei hohem VPD gab es keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$) zwischen den Sorten.

Die Differenz der Transpirationsrate zwischen der Kontrolle und der Salzbehandlung war bei hohem VPD mit einem Unterschied von $0,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ etwas höher als bei niedrigem VPD mit $0,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Unterschiede der Transpirationsrate zwischen VPD-Stufen waren bei den Pflanzen, die mit Salz behandelt worden sind, höher mit einer Abweichung von $0,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, als bei den Kontrollen mit einer Differenz von $0,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Damit bestätigt sich laut Larcher (2001), dass die Transpirationsrate bei einer niedrigen Luftfeuchtigkeit steigt.

Die Sorte 1 zeigte zwischen den Salzbehandlungen bei niedrigem VPD und zwischen den Kontrollen der VPD-Stufen Signifikanzen ($p < 0,05$) in Bezug auf den Zusammenhang von Transpiration und VPD. In der Sorte 3 konnten nur zwischen Kontrolle und Salzbehandlung bei hohem VPD signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) festgestellt werden. Keine signifikanten Zusammenhänge ($p > 0,05$) konnten in der Sorte 2 auffindig gemacht werden.

Im Hinblick auf die Beziehung zwischen Transpiration und den jeweiligen Ionengehalten zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$) lediglich bei hohem VPD zwischen der Transpiration und Natriumgehalt der Salzbehandlung und zwischen Transpiration und Chloridgehalt der Kontrollen. Durch die Versuche von Backenhausen et al. (2015) konnte die Beobachtung, dass bei hoher Luftfeuchtigkeit der Ionentransport zu den Blättern und damit der Wasserfluss in der Pflanze sich verringert, nur teilweise belegt werden. Bei den Natrium- und Chloridgehalten zeigten die Behandlungen bei niedrigem VPD eine geringere Transpiration und damit geringere Ionengehalte. Die Untersuchungen von Tack et al. (2014) bestätigen, dass

bei einem hohen VPD ein größeres Volumen von Bodenwasser in die Pflanze und im Zuge dessen vermehrt Salze in der Pflanze akkumuliert werden.

5.4. Fehlerdiskussion

Die Versuchspflanzen wurden in einem hydroponischen System mit Luftzufuhr aufgezogen. Um den Wasserhaushalt der Pflanzen aufrecht zu erhalten, wurde in regelmäßigen Abständen deionisiertes Wasser bei der Markierung, die sich etwa 1 cm unterhalb von der oberen Kante im Kunststoffgefäß befand, aufgefüllt. Durch die Luftzufuhr sprudelte, infolge des geringen Abstandes der Markierung, Wasser aus den Gefäßen. Dies könnte eventuell zu Verfälschungen der Ergebnisse der Transpiration führen. Bei einer Wiederholung dieses Versuches wäre es sinnvoll, den Abstand der Markierung zum Auffüllen von deionisiertem Wasser zu vergrößern. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Wurzeln verständlicherweise sich im Wasser befinden sollten. Aufgrund von Platzmangel wurden im Verlaufe des Versuches die Ranken der Süßkartoffeln mit Schnüren aufhängen. Dadurch sind von zwei Pflanzen die Spitzen der Triebe abgebrochen. Außerdem lagen zum Teil die Pflanzen in Wasser bzw. Salzlösungen, da durch die Luftzufuhr Wasser bzw. Salzlösung aus den Gefäßen herausgeflossen ist. Dies führte dazu, dass manche Pflanzenteile verwelkt sind durch den direkten Kontakt zur Salzlösung. Deshalb sollte für kommende Versuche genügend Platz vorhanden sein.

Für die Messungen der Natrium-, Kalium- und Chloridgehalte wurden lediglich die Haupttriebe verwendet. Da aber einige Versuchspflanzen auch Seitentriebe gebildet hatten, könnte die Auswertung der Daten womöglich durch die Inhomogenität der Pflanzen verfälscht sein. Des Weiteren gab es für die Analyse der Ionen sehr wenig Trockenmasse der Petiolen, weshalb das geringe Trockengewicht unter Umständen das Ergebnis verändert haben könnte. Aus diesem Grunde sollten für künftige Experimente mehrere Pflanzen herangezogen werden, um möglichst homogene Pflanzen für den Versuch auszuwählen. Auch könnte man den Messzeitraum verlängern um ein größeres Wachstum zu erzielen und dadurch mehr Trockenmasse zu erhalten. In manchen Proben befand sich geringe Menge an Schimmel aufgrund erhöhter Temperatur im Labor. Diese sollten beim nächsten Versuch kühlgestellt werden.

6. Literaturverzeichnis

AG, L., 1997-2019.

CHEMIE. [Online]

Available at: <https://www.chemie.de/lexikon/S%C3%A4ttigungsdefizit.html>

[Zugriff am 30.08.2019].

Amin, et al., 2011.

Crop adaptation in saline soils of noakhali: I. Crop performance. Bangladesh Agron. Journal, pp.43-52.

An, P. et al., 2001.

Different effect of humidity on growth and salt tolerance of two soybean cultivars. *Biologia Plantarum*, pp. 405-410.

An, P. et al., 2005.

Interactive Effects of Salinity and Air Humidity on Two Tomato Cultivars Differing in Salt Tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, pp. 459-473.

Backhausen, J. E. et al., 2005.

Salt tolerance of potato (*Solanum tuberosum* L. var. Desiree) plants depends on light intensity and air humidity. *Plant Science*, pp. 229-237.

Begum, F., M.Azizul, H., M.S., A. & H.C., M., 2015.

EVALUATION OF SWEET POTATO GENOTYPES. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*.

Chandna, R., Azooz, M. & Ahmad, P., 2013.

Recent Advances of Metabolomics to Reveal Plant Response During Salt Stress. In: *Salt Stress in Plant: Signalling, Omics and Adaptations*. New York: Springer Science+Business Media, pp. 1-14.

FAO, 2019.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Online]

Available at: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/>

[Zugriff am 08.09.2019].

FAO, 2019.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Online]

Available at: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/technical-issues/en/>

[Zugriff am 07.09.2019].

Greig, J. & Smith, F., 1962.

Salinity Effectson Sweetpotato Growth. pp. 309-313.

Hasanuzzaman, M. et al., 2013.

Enhancing Plant Productivity Under Salt Stress: Relevance of Poly-omics. In: *Salt Stress in Plants; Signalling, Omics and Adaptations*. New York: Springer Science+Business Media, pp. 113-156.

HORTIPENDIUM, 2009-2019.

Das grüne Lexikon HORTIPENDIUM. [Online]
Available at: <http://www.hortipendium.de/S%C3%BC%C3%9Fkartoffel>
[Zugriff am 30.08.2019].

Larcher, W., 2001.

Ökophysiologie der Pflanzen. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH & Co..

Mahajan, S. & Tuteja, N., 2005.

Cold, salinity and drought stresses: An overview. p. 139–158.

Munns, R., 2002.

Comparative physiology of salt and water stress. In: *Plant, Cell and Environment*. Australia: Blackwell Science Ltd, p. 239–250.

P. Ahmad, P., Rasool, S., Azooz, M. M. & Rehman, M. U., 2013.

Salt Stress: Causes, Types and Responses of Plants. In: *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress*. New York: Springer Science+Business Media, pp. 1-24.

Peng- Gao, L. & Tai-Hua, M., 2019.

Sweet potato: origin and production. In: *Sweet Potato - Chemistry, Processing and Nutrition*. China: Inc., © 2019 Elsevier, pp. 5-25.

S. V. K. Jagadish, E. M. S. A. K. M. J. T. Y. E. R. . A. K. B. G. R. W. A. M. I. R. K. S., 2012.

Genetic Advances in Adapting Rice to a Rapidly Changing Climate. *Journal of Agronomy and Crops Science*, pp. 360-373.

Salim, M., 1989.

Effects of salinity and relative humidity on growth and ionic relations of plants. *New Phytol*, pp. 13-20.

Singh, R. et al., 2002.

Solution culture for screening rice varieties for sodicity tolerance. *Journal of Agricultural Science*, p. 327–333.

Tack, J. et al., 2014.

High vapor pressure deficit drives salt-stress-induced rice, India: John Wiley & Sons Ltd.

White, P. J., 2012.

Long-distance Transport in the Xylem and Phloem. In: *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. UK: Elsevier Ltd.