

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Die Auswirkung vorbelasteter Böden mit erhöhtem Salzgehalt auf die
Entwicklung ausgewählter Nutzpflanzen

verfasst von | submitted by

Thomas Pflügler BEd

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien | Vienna, 2024

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 199 502 511 02

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB)
Unterrichtsfach Biologie und Umweltbildung
Unterrichtsfach Geschichte und Politische
Bildung

Betreut von | Supervisor:

Dr. Thomas Reichenauer

Abstract

Die vorliegende Masterarbeit untersucht den Einfluss unterschiedlicher Salzkonzentrationen auf die Keimungsrate und das Wachstum ausgewählter Nutzpflanzen in streusalzbelasteten Böden. Vor dem Hintergrund des langjährigen Streusalzeinsatzes in Österreich, insbesondere auf Straßen ohne entsprechende Schutzmaßnahmen, werden die daraus resultierenden Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Nutzung analysiert. In Gewächshausversuchen wurden die Wachstumsbedingungen von Nutzpflanzen auf lehmigen und sandigen Böden unter zwei verschiedenen Salzkonzentrationen und einer Kontrollgruppe simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits geringe Salzkonzentrationen physiologische Auswirkungen auf die Pflanzen haben können, was für Landwirte, deren Felder an salzbelastete Straßen grenzen, potenzielle Ertragseinbußen bedeutet.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei denjenigen bedanken, die mich bei der Fertigung meiner Masterarbeit unterstützt haben. Zuerst möchte ich mich bei Thomas Reichenauer bedanken, der meine Arbeit betreut und begutachtet hat.

Ich danke auch Steffi, Theresa, Johanna und Martin, die mir mit wertvollen Ratschlägen und tatkräftiger Unterstützung zur Seite standen.

Besonderer Dank gilt Doris Engelmeier, die mein Interesse für Biologie und für Pflanzen im Besonderen geweckt hat und deswegen maßgeblich daran beteiligt ist, dass diese Arbeit zustande gekommen ist.

Der größte Dank gilt meiner Familie. Ohne sie hätte ich nicht die Kraft gehabt diese Arbeit zu schreiben und auch mein Studium zu bewältigen. Hier möchte ich besonders meine Eltern hervorheben, die mich nicht nur mental immer unterstützt haben, sondern mir auch das ganze Studium und somit mein jetziges Leben erst ermöglicht haben.

1.	Einleitung	4
2.	Theoretische Grundlagen.....	5
2.1.	Boden.....	5
2.2.	Auswirkungen der Versalzung des Kulturbodens.....	6
2.2.1.	Eintrag von Streusalz in den Boden	8
2.2.2.	Streusalzeinsatz in Österreich, Deutschland und Schweiz.....	10
2.3.	Physiologie von Nutzpflanzen in Bezug auf Na und Cl	11
2.3.1.	Salzstress	13
3.	Material und Methoden.....	15
3.1.	Auswahl von Saatgut, Boden, Salzgehalt und Versuchsablauf.....	15
3.2.	Salzgehaltmessung – $EC_{(e)}$	20
3.2.1.	Probenaufbereitung.....	22
3.3.	Durchführung der Vorversuche (VV) 1 und 2	22
3.4.	Durchführung der Hauptversuche (HV) 1 und 2.....	24
4.	Ergebnisse	25
4.1.	4.1 Vorversuche	26
4.1	Hauptversuch 1 (lehmiger Boden).....	27
4.2	Hauptversuch 2 (sandiger Boden)	39
5	Diskussion.....	51
6	Conclusio	57
7	Literaturverzeichnis	59
7.1	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis:	62
7.2	Anhang:.....	65

1. Einleitung

In Österreich wird seit den 1950er Jahren im Winter Streusalz von den Räumdiensten eingesetzt. Es ist bekannt, dass ein erheblicher Teil des ausgebrachten Salzes in die umliegende Vegetation gelangt, den Boden verändert und sich negativ auf die dort wachsenden Pflanzen auswirkt (Leonardi, 1985; Brod, 1995). Vor allem im Osten Österreichs liegen viele landwirtschaftliche Flächen in unmittelbarer Nähe von Straßen und viele dieser Flächen haben keine Schutzeinrichtungen wie Entwässerungskanäle oder Lärmschutzwände, die den Salzeintrag reduzieren könnten (Wresowar & Sieghardt, 2000). Diese Situation führt zu einer Versalzung der Böden in Straßennähe, was wiederum die Erträge der dort angebauten Nutzpflanzen potenziell mindert (siehe 2.2).

Ausgehend von der Frage „Wie beeinflussen unterschiedliche Salzkonzentrationen das Wachstum und die Keimrate ausgewählter Nutzpflanzenarten durch Salz vorbelasteten Böden?“ beschäftigt sich diese Arbeit mit den Auswirkungen von langjährigen und jährlichen Salzeinträgen auf Ackerböden entlang von Straßen. Vor dem Hintergrund, dass in Österreich insbesondere auf Feldern in der Nähe von Verkehrsinfrastrukturen regelmäßig Salz eingetragen wird (Statistik Austria, 2022), wurde der Einfluss unterschiedlicher Salzkonzentrationen in einer kontrollierten Gewächshausumgebung untersucht. Die Versuche wurden auf lehmigen und sandigen Böden mit einer Kontrollgruppe und zwei unterschiedlichen Salzkonzentrationen durchgeführt. Dies ermöglichte einen direkten Vergleich der Keimungsraten und Biomasseverluste unter den gegebenen Salzbedingungen. Über eine Vegetationsperiode von circa vier Wochen wurden die Pflanzen, die verschiedene Salztoleranzen repräsentieren (Grieve, Grattan, & Maas, 2012), kultiviert und anschließend geerntet, um aussagekräftige Daten zu erhalten. Die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Versuche zeigen, dass bereits geringe Salzeinträge physiologische Auswirkungen auf Nutzpflanzen haben können, was für Landwirte, deren Felder an Straßen grenzen, Ertragseinbußen bedeutet.

Der erste Abschnitt der Arbeit gibt eine theoretische Einführung in das Thema, einschließlich einer Darstellung der Auswirkungen von Salz im Boden, der Verwendung von Streusalz in der D-A-CH-Region und seiner physiologischen Auswirkungen auf Pflanzen. Im anschließenden Material- und Methodenteil werden die Auswahl der Kulturpflanzen sowie die Begründung der verwendeten Salzkonzentrationen erläutert, gefolgt von einer detaillierten Beschreibung der Versuchsdurchführung. Im Ergebnisteil werden die in dieser Arbeit erhobenen Daten dargestellt und im Diskussionsteil ausführlich analysiert und interpretiert.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Boden

„Der Boden“ ist ein nicht klar abgrenzbarer Körper, der in verschiedenen Disziplinen beziehungsweise von verschiedenen Wissenschaftler:innen unterschiedlich definiert wird. In dieser Arbeit wird Boden nach Hans Sticher (1993) folgend beschrieben. Boden wird als Begriff für den obersten Bereich der Lithosphäre benutzt, in der sich Lithosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre überlagern. Nach oben hin ist dieser von der Vegetationsdecke und der Atmosphäre begrenzt und nach unten hin durch lockeres, sowie festes Gestein und dem Grundwasser. Der Boden ist also demnach ein ungesättigter, nicht vom Grundwasser gefüllter Bereich mit Porensystem, in dem Bodenluft vorhanden ist. Dieser wurde und wird durch verschiedene Umweltfaktoren beeinflusst und entwickelt sich laufend weiter. Der Boden besteht aus verschiedensten Mineralien und biologischem Material (Humus). Er hat verschiedene Funktionen wie Filter-, Reinigungs-, Puffer- und Transportfunktion und dient auch als Pflanzenstandort. Er ist die Grundlage des Lebensraumes für viele Lebewesen (Lewandowski, Leitschuh, & Koß, 1997) nach (Sticher, 1993).

Der Boden, ein primäres Medium für die Ernährung terrestrischer Pflanzen, zeichnet sich durch seine Heterogenität aus, bestehend aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen. Er enthält Mineralien, Wasser (inklusive gelöster Stoffe), Gase, lebende Organismen und organische Substanzen, was ihn zu einem sehr dynamischen System macht, dessen mineralische Eigenschaften zeitlich und räumlich variieren können (siehe Abbildung 1). Im Gegensatz zu atmosphärischen oder aquatischen Prozessen, bei denen Materialien mobiler sind, sind die Mineralien im Boden relativ unbeweglich. Ebenso spielt die Korngröße eine wichtige Rolle. All diese Elemente beeinflussen den Boden und somit die Entwicklung von Pflanzen in diesem Medium entscheidend (Epstein & Bloom, 2005).

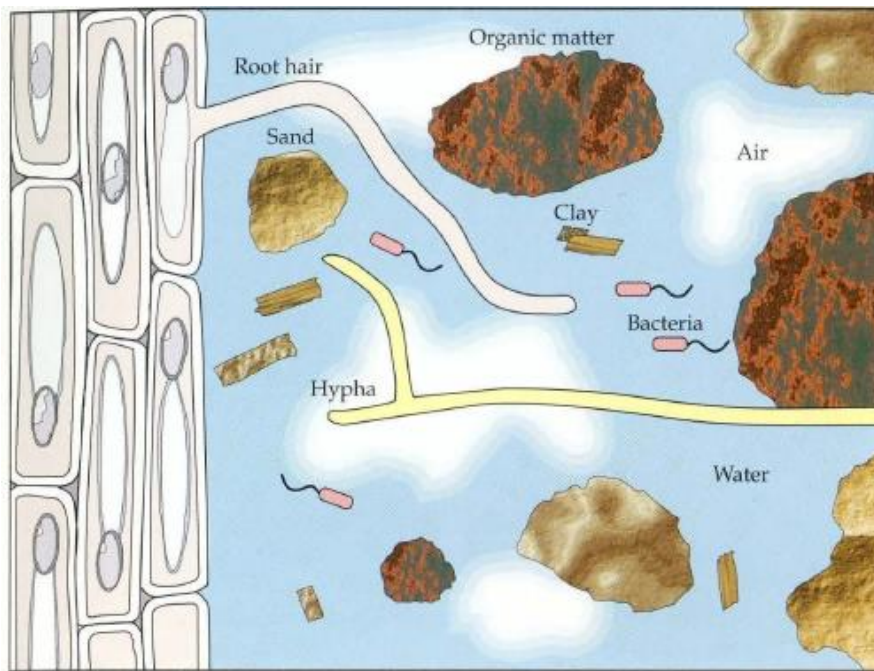


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung der Rhizosphäre (Epstein & Bloom, 2005)

Die Entstehung der verschiedenen Böden ist von Ausgangsgestein, Relief, Klima, Vegetation und Zeit abhängig. Seit 5000 Jahren spielt auch der Mensch aufgrund seiner Bodennutzung eine prägende Rolle in der Bodenentwicklung. Boden wird auf verschiedenste Arten vom Menschen genutzt, wie zum Beispiel zur Forstwirtschaft, als Baugrund, als Rohstofflieferant oder als Erholungsgebiet. Zu diesen gibt es auch die vom Menschen geprägten Kulturböden. Diese dienen vor allem zur Nahrungsmittelproduktion, aber auch zur Produktion von Energieträgern, Futter oder anderen organischen Stoffen. Die Ertragsfähigkeit von Kulturböden ist von der Bodenfruchtbarkeit, Standort, Klima Pflanzenart, Bodenbearbeitung, Düngung usw. abhängig. (Scheffer, et al., 2018).

2.2. Auswirkungen der Versalzung des Kulturbodens

Versalzung wird im Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer et al., 2018) wie folgt definiert: „Unter Versalzung versteht man die Anreicherung von wasserlöslichen Salzen in Böden oder Bodenhorizonten.“ Diese Salzanreicherungen können aufgrund Klimafaktoren, Meerwasser Zufuhr oder auch künstlicher Versalzung durch z.B. Streusalz-Einsatz passieren (Scheffer et al., 2018).

Eine der Variablen, die den Boden beeinflussen, ist der Salzgehalt. Dieser wird bestimmt durch die gelösten Salze im Wasser und im Boden. Die am häufigsten vorkommenden Salze sind NaCl, Na₂CO₃ und Na₂SO₄ (Scheffer, et al., 2018). Daraus ergeben sich die gelösten Anionen Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻ und NO₃⁻, sowie die Kationen Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ und K⁺ (Walleneder & Tanji, 1996). Diese sind im Boden nicht gleichmäßig verteilt und der Verbleib bzw. die Verortung dieser hängen

unter anderem von der Dichte, des Wassergehalts und der Struktur des Bodens ab (Maas & Grattan, 1999).. Salze spielen eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung des Bodens, insbesondere während Trockenperioden. Wenn der Boden austrocknet, führen Salze zu einer Verdichtung, die die Bodenstruktur stabilisiert. Außerdem beeinflussen Salze den pH-Wert des Bodens, wenn sie gelöst sind. Zum Beispiel neigt Natriumchlorid (NaCl), das eine starke Säure und eine starke Base ist, dazu, einen neutralen pH-Wert von 7 zu erzeugen. Auf der anderen Seite wirken Salze mit einer schwachen Säure, aber einer starken Base alkalisch. Ein Beispiel hierfür ist Soda. Gips hingegen hat eine starke Säure, aber nur eine mittelstarke Base und wirkt daher schwach sauer mit einem pH-Wert von 5,8 (Scheffer et al., 2018).

Salze beeinflussen nicht nur den Boden, sondern die Beschaffenheit des Bodens beeinflusst auch stark den Verbleib von Salzen. Aminogruppen, Carboxylgruppen und Hydroxylgruppen sind mineralische und organische Moleküle, die feste negative Ladungen an der Oberfläche von Bodenpartikeln bilden (Epstein & Bloom, 2005). Dadurch werden positiv geladene Teilchen eher im Boden gehalten als negativ geladene.

In durchlässigen oder sandigen Böden werden die Salze tiefer gelagert als in tonreichen. Dies liegt an der Bodendichte, da die Salze in lockeren Sedimenten schneller ausgewaschen werden können als in dichten Substraten (Scheffer, et al., 2018). Dichter Boden fördert nun nicht nur den Verbleib von Salzen, sondern stellt auch eine physikalische Wachstumserschwerung für Pflanzen dar. Dies kann zu einer Minderung der Keimung und des Pflanzenwachstums führen, wenn die Salztoleranz der am Feld wachsenden Pflanze überschritten wird (Maas & Grattan, 1999).

Böden mit hohem NaCl-Gehalt sind in vielen ariden und semiariden Gebieten der Erde ein großes Problem. Dies ist oft darauf zurückzuführen, dass nicht genügend Regen oder Bewässerung vorhanden ist, um das Salz auszuspülen. Dies wirkt sich negativ auf die Ernteerträge aus. Dieses Phänomen kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden, u. a. auf den kapillaren Aufstieg von Wasser im Boden und die Bewässerung mit zu salzhaltigem Wasser, insbesondere in diesen Gebieten (Epstein & Bloom, 2005). In Österreich kann es auch zu versalzten Böden in der Nähe von Straßen kommen. Der Boden neben der Straße kann aufgrund der Salzstreuung im Winter erhöhte Salinitätswerte aufweisen, was die Bodeneigenschaften verändern und die Pflanzen einem Salzstress aussetzen (Brod, 1993; Leonardi, 1985; Tegethof, 1998; Blomqvist, 1998).

2.2.1. Eintrag von Streusalz in den Boden

Eine Form der künstlichen Einbringung von Salzen in österreichische Kulturböden ist die Verwendung von Streusalz auf Straßen (Scheffer, et al., 2018). Seit Mitte der 1950er Jahre wird Salz als Auftaumittel für Straßen in Europa benutzt (Leonardi, 1985). Nach der Auftragung auf die Straße bildet das Streusalz mit dem Schnee, Eis und Wasser eine Lösung und fließt von der Straße ab. Somit gelangt ein Teil des Salzes in den Boden neben der Straße, wenn keine Abflusskanäle oder sonstige Auffangmechanismen vorhanden sind. Ein anderer Teil wird durch Spritzwasser von der Straße befördert. Dies kann durch natürlichen Wind oder Regenfall passieren, genauso wie durch das Aufwirbeln der salzhaltigen Flüssigkeit durch den Verkehr (Däumling, 2012). Das ausgestreute Salz kann von wenigen Centimetern bis zu 100 Metern neben der Straße deponiert werden. Dies ist von vielen Faktoren abhängig, wie Wind, Verkehrsaufkommen nach der Aufbringung, Fahrtgeschwindigkeit, Neigung des Straßenbanketts, Art der Salzaufbringung, Streugeschwindigkeit und Straßenart (Autobahn, Schnellstraße, Bundesstraße etc.) usw. (Wresowar & Sieghardt, 2000; Leonardi, 1985; Brod, 1995; Lindner, Vollhofer, Atanasoff-Kardjalieff, Stundner, & Wolfram, 2019). Innerhalb der ersten zwei Meter neben der Straße versickert der größte Teil des salzhaltigen Wassers und ist somit der am meisten belastete Bodenabschnitt. Im anschließenden Spritzwasserbereich bis zu zehn Metern findet man ebenso eine hohe Belastung von Salz (Tegethof, 1998; Leonardi, 1985). Aufgrund des Windes und bei einer Trockensalzaufbringung können Salze noch von 60 m bis zu 100m, vereinzelt sogar bis 200 m neben der Straße verlagert werden (Wresowar & Sieghardt, 2000; Tegethof, 1998; Blomqvist & Johansson, 1999). Besonders hohe Geschwindigkeiten und ein großes Aufkommen des Verkehrs nach der Streuung können den Verbreitungsgrad des Salzes erhöhen. Gegenmaßnahmen wie Lärmschutzwände und Abwasserkanäle am Straßenbankett, können die Versalzung des Bodens und des Grundwassers mindern (Graf, 2018). Den am stärksten von Salz belasteten Bereich bei Straßen findet man 0 m-15 m neben dieser. Hier findet man bis zu 90 % des verfrachteten Salzes (Tegethof, 1998; Graf, 2018; Däumling, 2012; Wresowar & Sieghardt, 2000).

Die Streusalzverluste nach der Aufbringung sind der Grund für die Versalzung der Böden neben Straßen. Ein Großteil des Salzes geht direkt nach der Streuung durch Fahrtwind, Verkehrsaufkommen und Luftströmungen verloren. Diese Salzmengen finden sich danach in der Umgebung der Straße wieder. Ebenso spielt auch die Streugeschwindigkeit, Feuchtigkeit der Straße, Korngröße und Einsatzart von Feucht- oder Trockensalzstreuung eine Rolle. Feuchtsalz haftet besser am aufgetragenen Untergrund und hat somit eine bessere Tauleistung als Trockensalz. Andererseits verbleibt dieses auch länger auf den aufgetragenen Straßen und

dringt auch konzentrierter in den Boden der nahen Umgebung ein. Dadurch kann es vermehrt zu Kontaktschäden in der Vegetation und auch auf Brücken oder Kraftfahrzeugen kommen (Däumling, 2012; Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011). Feinkörniges Salz taut schneller als grobkörniges Salz, wobei sich die Wirkung beider Varianten nach etwa vier Stunden angleichen. Ein wesentlicher Nachteil des feinkörnigen Salzes ist jedoch, dass es durch Wind und Verkehr leichter verweht wird. Dadurch gelangt es einfacher von der Fahrbahn in die umgebende Vegetation (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011). Bei einer Streumenge von 5 g/m^2 ist der Verlust direkt nach der Aufbringung schwer interpretierbar, da es sich um eine ungleichmäßige Aufbringung und begrenzte Messbarkeit handelt. Ab einer Streumenge von 10 g/m^2 und nach etwa 100-150 Fahrzeugen ist eine rasche und gleichmäßige Verteilung des Streusalzes gegeben und somit eine interpretierbare Messung möglich (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011). Die Messungen auf Landstraßen dieser TU-Studie im Jahr 2011 haben gezeigt, dass man bei eingestellten Streumengen von $10\text{-}30 \text{ g/m}^2$ mit einem Anfangsverlust der Streusalzmenge von ca. 70 % ausgehen kann. Das bedeutet, dass die Restmenge an Salz, die auf der Straße direkt in der Rollspur verbleibt, ca. 30 % beträgt (siehe Abbildung 2) (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011).

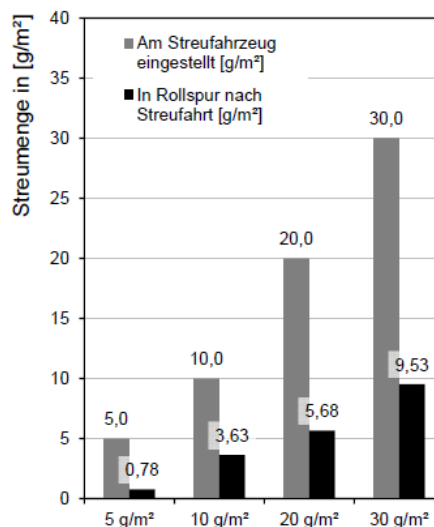


Abbildung 2: Streusalzverbleib in der Rollspur nach dem Anfangsstreuverlust (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011)

Der Streusalzverlust danach, bei dem schon zuvor verbliebenen Salz auf der Straße, ist wesentlich geringer als die Anfangsverluste. Im Mittelwert kann man von einem Verlust von 35 % nach einer Überfahrt von 2000-7000 Fahrzeugen sprechen. Aus der Literatur geht hervor, dass etwa ein Drittel der auf Straßen aufgebraachten Salzmenge innerhalb der ersten 10 m neben der Fahrbahn in den Boden gelangt (Brod, 1995; Hoffmann, W., & Trenkle, 1989). Die Messwerte zeigen allerdings eine sehr hohe Bandbreite und deuten deshalb darauf hin, dass noch einige andere Faktoren (wie oben genannt) eine starke Rolle spielen. Sehr hohe Verluste oder keine

Restsalzmengen auf der Straße hat diese Studie nur bei nasser Fahrbahn vorgefunden. Bei feuchten oder trockenen Straßen ist der Verbleib der Salzmenge wesentlich höher als bei Niederschlag (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011).

2.2.2. Streusalzeinsatz in Österreich, Deutschland und Schweiz

Auf Österreichs Straßen wird seit den 1950er Jahren Streusalz als Taumittel verwendet (Leonardi, 1985; Wresowar & Sieghardt, 2000). Hauptsächlich wird NaCl eingesetzt und hier werden pro Einsatz ca 10-15 g/m² gestreut. Im zehnjährigen Mittel (von 1986-1996) wurden pro Fahrstreifen (Fs)-km auf Autobahnen 5,7 Tonnen und auf Bundes- und Schnellstraßen 3 t/Fs-km Tausalz aufgetragen. Bei einer 2x2 Fahrstreifen Autobahn ergibt das 25,6 t NaCl/km Autobahn (Wresowar & Sieghardt, 2000). Insgesamt bedeutet das im betrachteten Zeitraum zwischen 1986 und 1996 einen Verbrauch von 103 000 Tonnen NaCl Tausalz auf österreichischen Straßen (Wresowar & Sieghardt, 2000). Diese Werte können sehr stark schwanken und sind von Winter zu Winter verschieden. Ein Forschungsbericht der TU Wien zeigt eine Auflistung des Salzverbrauchs für den Winterdienst in Österreich von 2004 bis 2011. Im siebenjährigen Mittel wurde 271 000 Tonnen Salz auf den Straßen aufgebracht (siehe Tabelle 1) (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011).

	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	Mittel
Burgenland	9,9	12,6	2,3	6,4	10,1	13,6	10,4	9,3
Kärnten	19,0	26,4	12,8	14,1	29,5	29,1	18,0	21,3
Niederösterreich	108,4	146,9	30,8	54,4	88,7	100,0	61,1	84,3
Oberösterreich	54,9	50,5	13,7	21,7	54,9	66,3	49,9	44,6
Salzburg	25,3	28,5	11,6	19,2	25,6	20,1	15,8	20,9
Steiermark	41,9	48,6	21,8	32,9	47,7	46,9	34,2	39,1
Tirol	34,7	40,2	18,0	28,1	37,1	26,3	23,6	29,7
Vorarlberg	8,4	7,3	3,4	5,5	8,5	9,7	7,0	7,1
Wien	12,1	16,3	2,7	15,0	21,6	19,9	16,6	14,9
Summe Österreich	315	377	117	197	324	332	237	271

Tabelle 1: „Jährlicher Salzverbrauch in 1.000 Tonnen für den Winterdienst in Österreich. Quelle: FSV-Ausschuss Winterdienst 2011“ (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011)

In der Schweiz werden seit 1956 die Straßen mit Streusalz behandelt. Hier kommt ebenfalls hauptsächlich NaCl zum Einsatz. Die jährliche Streusalzmenge variiert stark, jedoch kann man von durchschnittlich 300 000 bis 350 000 Tonnen im Jahr ausgehen. Die Aufbringungsmenge hat sich seit den 1960er Jahren von 40 g/m² auf 10-15 g/m² reduziert (Stand 2016). Dies ist auf bessere Auftragungstechniken zurückzuführen. Die Salzkonzentration in den straßennahen Böden ist nicht nur im Winter hoch, sondern auch in den Sommermonaten stark erhöht. Außerdem reichert sich der Boden mit Natrium an, von 50 mg Na/kg Boden auf 500 mg Na/kg Boden. Dies ist eine Verzehnfachung innerhalb von 20 Jahren. Dadurch sind Pflanzen und

Bodenorganismen stetig einem erhöhten Salzgehalt ausgesetzt (Boller & Andri, 2011/2016; Zuber, 2013).

In Deutschland wurde, wie auch in Österreich und der Schweiz, der bundesweite Gebrauch von Tausalzen auf den Straßen in den 1950er Jahren gestartet (Brod, 1993). Es werden pro Saison ca. 1,5 Millionen Tonnen des am häufigsten verwendeten Salz NaCl benutzt. Wie auch in Österreich oder der Schweiz kann die verwendete Menge stark schwanken, abhängig von der Stärke des Winters (Däumling, 2012). Wie auch in der Schweiz hat sich die verwendete Streumenge im Vergleich zu den 1960er und 1970er Jahren stark reduziert (Quack, Möller, & Gartiser, 2004).

2.3. Physiologie von Nutzpflanzen in Bezug auf Na und Cl

Höhere Pflanzen nehmen Nährstoffe über das Wurzelsystem auf. Der Kohlenstoff wird als CO_2 aus der Atmosphäre und Sauerstoff sowohl aus der Atmosphäre als auch aus dem Wasser aufgenommen. Die Nährstoffe werden vor allem als Kationen oder Anionen aufgenommen. Die geladenen Ionen müssen über ein Transportsystem die Membran passieren (Taiz & Zeiger, 2010). Die Bindungskapazität von Anionen ist geringer, da diese eher aus dem Boden ausgewaschen werden als Kationen. Zwischen Pflanze und Boden findet über das Wurzelsystem ein ständiger Ionenaustauschprozess in beide Richtungen statt (siehe Abbildung 3) (Taiz & Zeiger, 2010; Marschner, 2012). Um die Nährstoffaufnahme über die Wurzeln zu erhöhen, gibt es mehrere Möglichkeiten wie zum Beispiel die Symbiose mit Mykorrhizapilzen. Leguminosen gehen symbiotische Beziehungen mit stickstofffixierenden Bakterien ein, die es ihnen ermöglichen, Luftstickstoff (N_2) in eine nutzbare Form umzuwandeln. Im Gegensatz dazu entwickeln andere Pflanzenarten Strategien wie die Ausscheidung von Wurzelexsudaten oder die Bildung von Clusterwurzeln, um Nährstoffe effizienter aus dem Boden zu gewinnen. Wurzelexsudate fördern die Nährstoffverfügbarkeit, indem sie Bodenmikroben stimulieren, während Clusterwurzeln eine größere Oberfläche für die Nährstoffaufnahme bieten (Schmidt, Raven, & Paungfoo-Lonhienne, 2013).

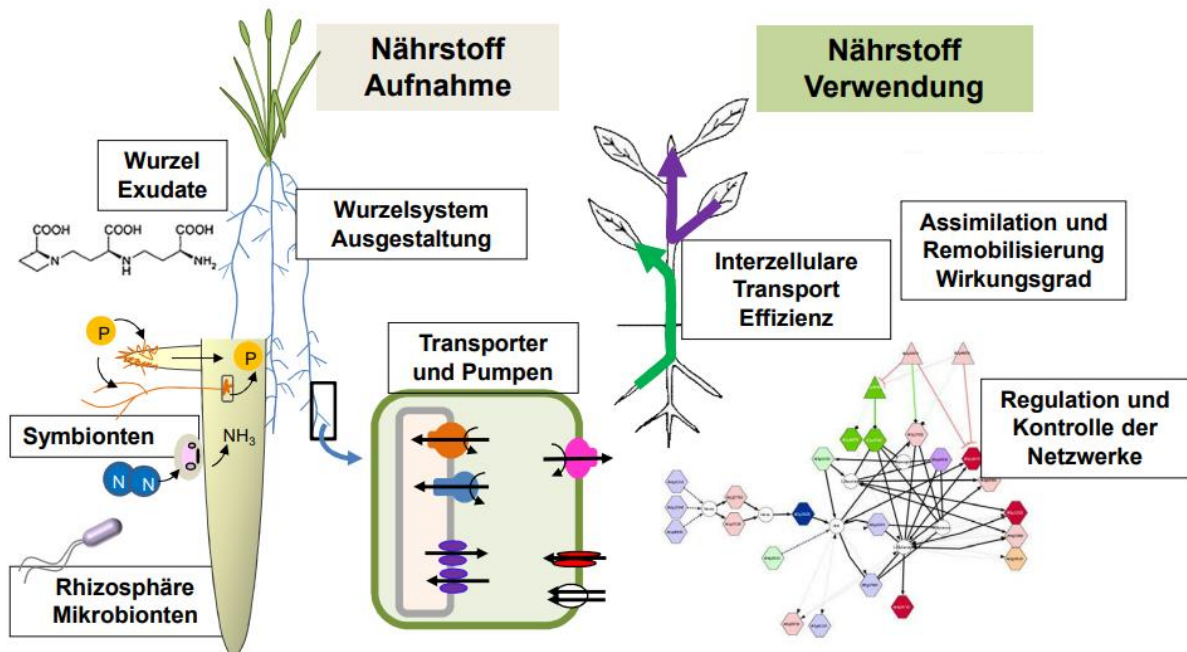


Abbildung 3: Nährstoffaufnahme, -assimilation und -verwertung (ASPB Plant Science today, insights and perspectives on plant science, 2024)

Nicht nur durch die oben genannten Faktoren kann die Nährstoffaufnahme gesteigert werden, sondern auch über eine erhöhte Wurzeloberfläche durch längere oder mehr Wurzeln und Wurzelhärchen. Ebenso kann dies durch eine erhöhte Expression von NH_4^+ Carrier (Transporter) passieren (Wanner, 2010). Die Expression der Wurzeln sowie das Vorkommen von Nährstoffen im Boden sind entscheidend für die Nährstoffversorgung der Pflanze (Larcher, 1980).

Das Wasser dringt passiv mit den gelösten Stoffen in die Zellen der Wurzelhaare ein. Dies ist aufgrund des Konzentrationsgefälles und des Ladungsgradienten zwischen Wurzeln und Bodenlösung möglich (Larcher, 1980). Über den Symplasten und Apoplasten strömen diese bis zur Endodermis ein. Der Caspary-Streifen verhindert, dass Wasser und gelöste Stoffe außerhalb der Zellen in den Zentralzylinder gelangen. Die Stoffe müssen in den Symplasten eintreten. Ab hier können die Stoffe nicht mehr frei diffundieren, es handelt sich um eine Kontrollstelle (siehe Abbildung 4) (Markl, Sadava, Hillis, Heller, & Hacker, 2019).

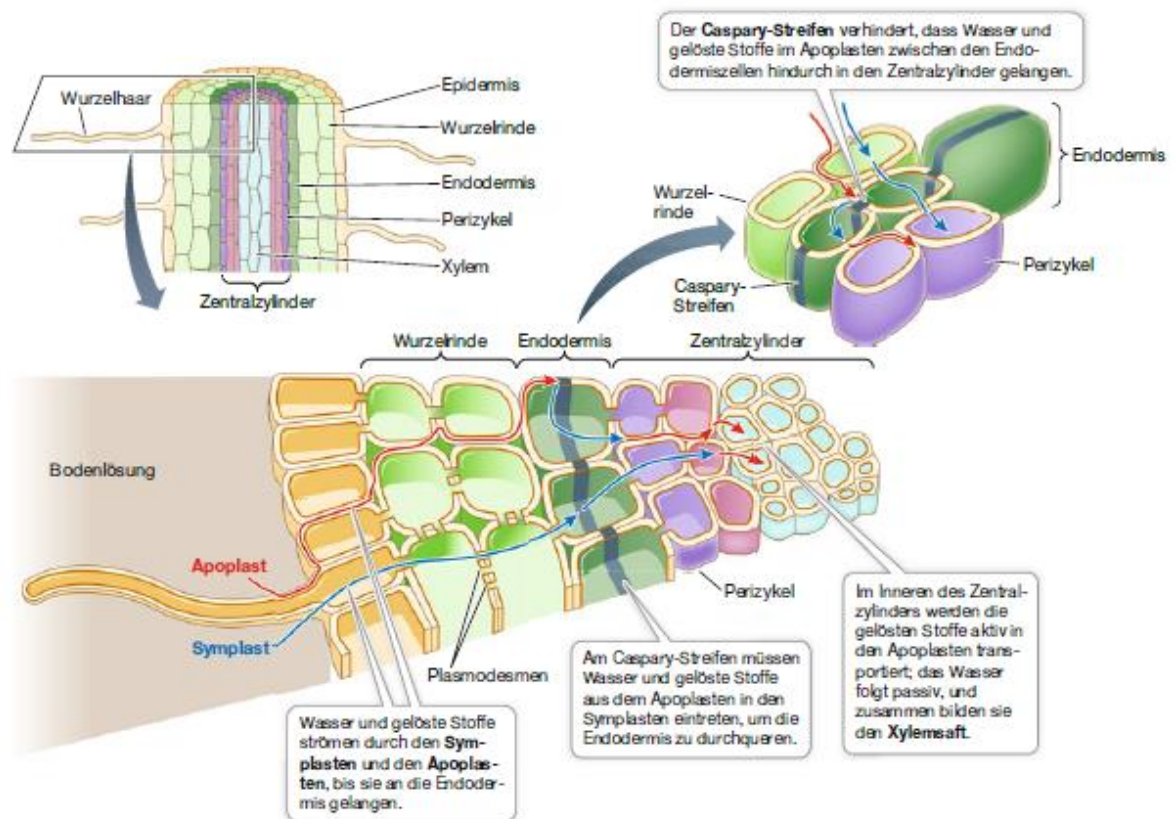


Abbildung 4: Stoffweg in das Wurzelsystem (macmillan learning, 2024)

2.3.1. Salzstress

Man spricht von Versalzung, wenn im Boden oder in Bodenhorizonten wasserlösliche Salze angereichert werden (Scheffer, et al., 2018). Der Grad der Versalzung des Bodens hängt von mehreren Faktoren ab (siehe 2.2). Wie schon erwähnt kommt es in Österreich, Deutschland und der Schweiz besonders neben Straßen zu Versalzung. Deswegen sind hier besonders Faktoren wichtig, die sich auf die Verlagerung des Salzes von der Straße in die umliegenden Böden beziehen. Hier ist die aufgebrachte Tausalzmenge, die Anzahl der Straßenspuren und das Vorhandensein von Pannestreifen, Lärmschutzwänden oder die Fläche des Straßenrandbereichs ausschlaggebend (Däumling, 2012). Ebenso wird die Aufnahme des Salzes im Boden durch Umweltfaktoren wie Niederschlagsmenge, Bodendurchlässigkeit oder Bodenfeuchte beeinflusst. Eine hohe Wassersättigung im Boden und eine hohe Niederschlagsmenge begünstigen die Auswaschung von Salzen (Däumling, 2012).

Durch das Tausalz wird Natrium und Chlor in den Boden eingetragen. Äußerliche Symptome eines Natrium-Überschuss bei einer Pflanze sind nicht bekannt. Die hemmende Wirkung auf das Wachstum einer Pflanze kommt also nicht nur von einer spezifischen Toxizitätserscheinung von Natrium, sondern aufgrund kombinierter Faktoren, die sich indirekt auf die Pflanze auswirken (Bergmann, 1993; Brod, 1993). Aufgrund hoher Natriumeinträge neigen Böden zu

Verschlämmung, und Dichtlagerung, kurz Bodenverdichtung. Dadurch kommt es zu einem ungünstigen Luft- und Wasserhaushaltsverhältnis, dies führt zu einer geringeren Nährstoffaufnahme. Dies wirkt sich hemmend auf das Pflanzenwachstum aus (Scheffer, et al., 2018; Zuber, 2013). Natrium wirkt sich auch auf die Bodenparameter aus und kann die chemischen und physikalischen Prozesse beeinflussen. Die Bodenstruktur wird verändert und dadurch weniger stabil (Däumling, 2012). Durch den steigenden Anteil an Natrium im Boden binden sich Na-Ionen an Kationenaustauschern. Die Nährstoffaufnahme von anderen Kationen in der Pflanze wird somit erschwert (Brod, 1993).

Im Gegensatz zu einem Natriumüberschuss zeigen Pflanzen sehr wohl äußere Symptome bei einem Chlorüberschuss. Das über Wurzeln oder den Spross aufgenommene Cl führt zu Chlorosen und braunen Nekrosen an den Blatträndern. Dies kann rasch zum Abwerfen der Blätter führen (Bergmann, 1993; Zorn, Marks, Heß, & Bergmann, 2016). Die bodenphysikalischen Eigenschaften werden, im Gegensatz zu Natrium, nicht durch die Cl-Ionen maßgeblich verändert (Brod, 1993). Chlor wirkt sich maßgeblich auf die Osmoregulation im Boden aus. Durch einen erhöhten Anteil an Cl im Boden kommt es zu einem erhöhten osmotischen Stress für die Pflanzen (Marschner, 2012; Zorn, Marks, Heß, & Bergmann, 2016).

Die Kombination von erhöhtem Natrium und Chloranteilen im Boden führt zu einer höheren Saugspannung der Bodenlösung (Bergmann, 1993). Natrium und Chlor gehören neben Kalium zu den wichtigsten Ionen, die das osmotische Potential und somit den osmotischen Stress in Böden beeinflussen (Turner & Passioura, 1986).

3. Material und Methoden

3.1. Auswahl von Saatgut, Boden, Salzgehalt und Versuchsablauf

Saatgut

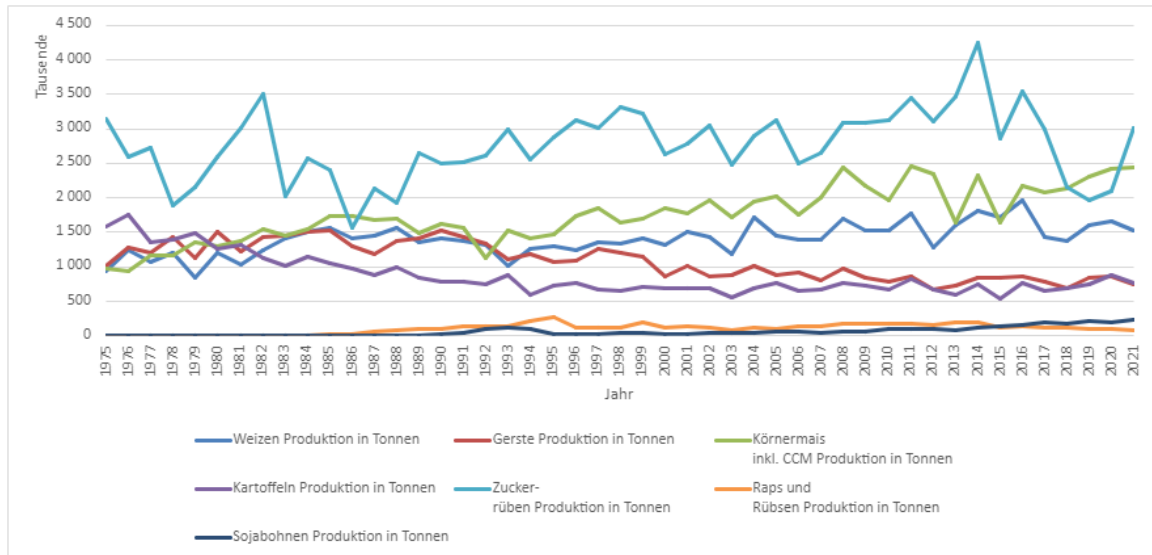


Abbildung 5: Feldfruchtproduktion in Österreich 1975 bis 2021, Grafik basierend auf Daten der Statistik Austria (Statistik Austria, 2022)

In Österreich gehören Zuckerrüben, Mais, Weizen, Gerste, Kartoffeln, Sojabohnen und Raps zu den am häufigsten angebauten Feldfrüchten (siehe Abbildung 5). Sie nehmen auch den größten Anteil an den Ackerflächen in Österreich ein und eignen sich deshalb für die Versuche.

Maas und Grattan (1999) ordnen Zuckerrüben, Sommerhartweizen, Roggen, Triticale und Wintergerste den Salztoleranten Feldfrüchten zu. Winterweichweizen, Sojabohnen, und Raps zu den moderat toleranten und Mais Kartoffeln sowie Körnererbsen zu den moderat sensitiven in Bezug auf Salzempfindlichkeit. Die Ackerbohne wird als moderat sensitiv bis salzempfindlich (sensitiv) eingestuft (Maas & Grattan, 1999; Grieve, Grattan, & Maas, 2012; Walleneder & Tanji, 1996).

Für die Vorversuche wurden Wintergerste, Mais, Winterdurum, Sommerdurum, Raps, Ackerbohne und Sojabohnen, mit jeweils drei unterschiedlichen Sorten, verwendet (siehe Tabelle 2). Eine Ausnahme war hier der Mais: eine der drei Sorten hatte die Keimprobe nicht bestanden hatte, weshalb zwei Sorten verwendet wurden. Die Pflanzen stellen einen Querschnitt von moderat toleranten und moderat sensitiven salzempfindlichen Nutzpflanzen dar, die in Österreich verhältnismäßig häufig angebaut werden (Maas & Grattan, 1999; Statistik Austria, 2022).

Wintergerste	Mais	Winterdurum	Sommerdurum	Raps	Ackerbohne	Sojabohne
<i>Sandra</i>	<i>LG 30179</i>	<i>Gitkadur</i>	<i>Durofinus</i>	<i>Artemis</i>	<i>Alexia</i>	<i>Melanie</i>
<i>Paradies</i>	<i>Futurixx</i>	<i>Sambadur</i>	<i>Videodur</i>	<i>Ludger</i>	<i>Sunrise</i>	<i>Judith</i>
<i>Ernesta</i>		<i>Tennodur</i>	<i>Colliodur</i>	<i>Randy</i>	<i>Emilia</i>	<i>Leonie</i>
				<i>Bradley</i>		

Tabelle 2: Verwendete Feldfrüchte und Sorten für die Vorversuche

Die in den Hauptversuchen verwendeten Pflanzen waren Winterdurum, Sojabohne, Mais und Ackerbohne. Der Versuchsaufbau erlaubte es neun Sorten zu verwenden, da von Mais nur zwei Sorten vorhanden waren, wurde noch eine Sorte von Ackerbohne verwendet (siehe Tabelle 3).

Mais	Winterdurum	Ackerbohne	Sojabohne
<i>LG 30179</i>	<i>Gitkadur</i>	<i>Emilia</i>	<i>Melanie</i>
<i>Futurixx</i>	<i>Sambadur</i>		<i>Judith</i>
	<i>Tennodur</i>		<i>Leonie</i>

Tabelle 3: Verwendete Feldfrüchte und Sorten für die Hauptversuche

Die Auswahl der Sorten für die Versuche erfolgte nach mehreren Kriterien: In Vorversuchen zeigten einige Sorten bereits Tendenzen, die sie für weitere Versuche geeignet erscheinen ließen. Weiters erwies sich die Handhabung dieser Pflanzen für die geplanten Versuche als praktikabel. Die ausgewählten Pflanzenarten variieren in ihrer Nutzungshäufigkeit in Österreich von sehr häufig bis selten. Außerdem wurde darauf geachtet, sowohl einkeimblättrige als auch zweikeimblättrige Pflanzen in die Untersuchung einzubeziehen.

Boden

Da in lehmigen Böden das Salz besser gehalten wird als in sandigen (Maas & Grattan, 1999), wurden für die Hauptversuche ein lehmiger und ein sandiger Boden verwendet. Der lehmige Boden stammte von einem Acker in Rafing (48°41'41.5"N 15°50'39.0"E) aus dem oberen Bodenhorizont. Der sandige Boden wurde von der Aushubfirma „Karner“ bezogen. Mit diesen Böden ergaben sich im Hauptversuch 1 und Hauptversuch 2 andere Voraussetzungen für die Versuchspflanzen, aufgrund unterschiedlicher Nährstoff- und Stoffverhältnisse (siehe Abbildung 6 bis Abbildung 11).

Der Versuchsboden wurde für alle Versuche auf 6 mm gesiebt und jeweils eine Probe wurde an die AGES zu Charakterisierung des Bodens geschickt.

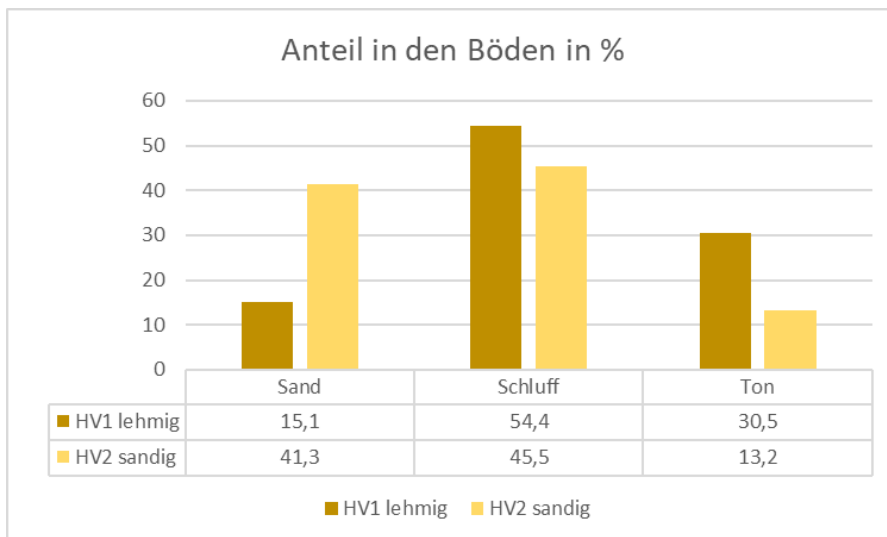


Abbildung 6: Sand, Schluff und Ton Anteil (in %) in den lehmigen und sandigen Versuchsböden

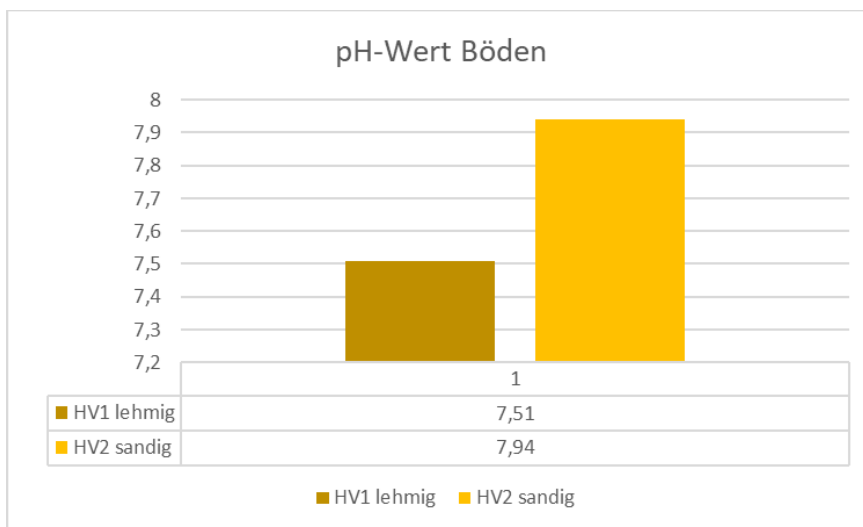


Abbildung 7: pH-Wert der lehmigen und sandigen Versuchsböden

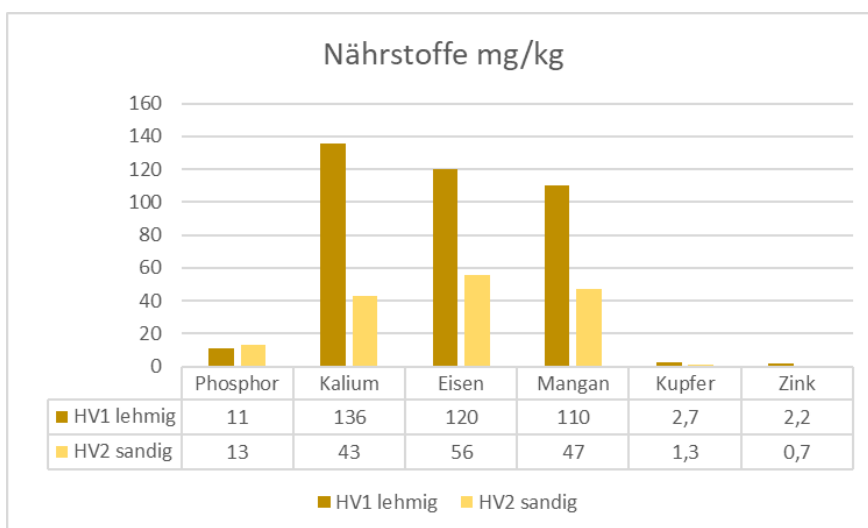


Abbildung 8: Nährstoffanteil von Phosphor, Kalium, Eisen, Mangan, Kupfer und Zink in lehmigen und sandigen Versuchsböden

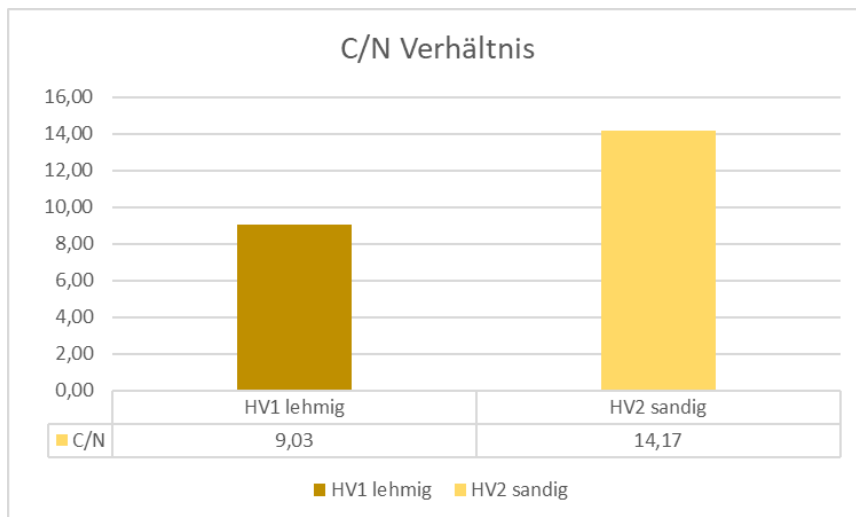


Abbildung 9: C/N Verhältnis in lehmigen und sandigen Versuchsböden

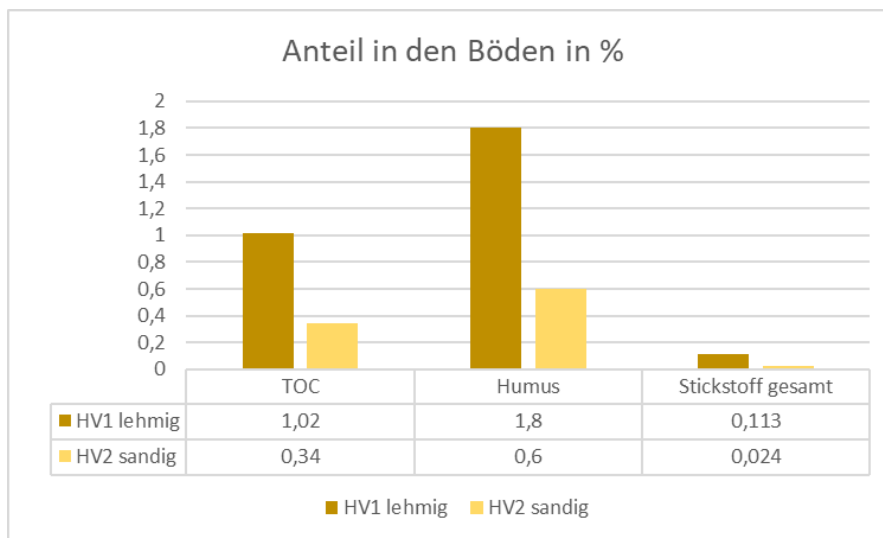


Abbildung 10: TOC, Humus und Stickstoffanteil (in %) in den lehmigen und sandigen Versuchsböden

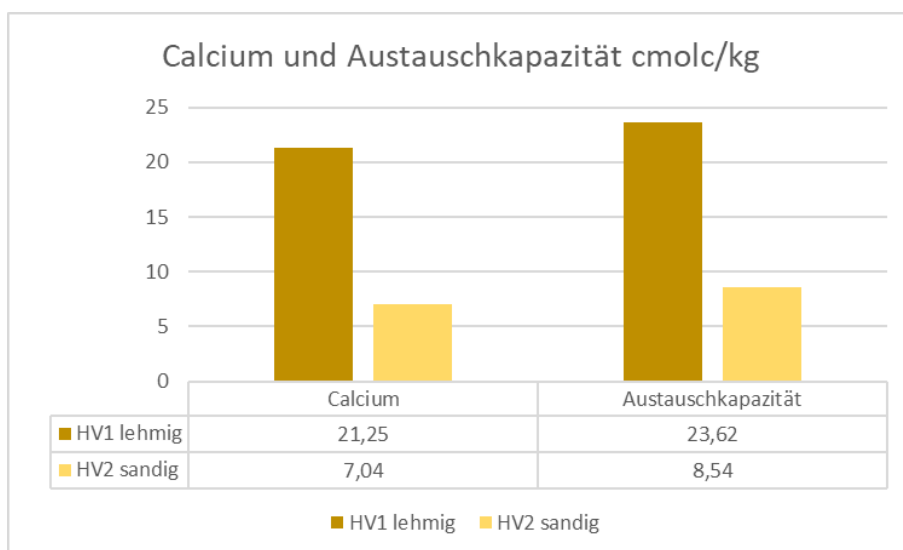


Abbildung 11: Calcium und Kationenaustauschkapazität cmolc/kg in den lehmigen und sandigen Versuchsböden

Salzgehalt

Aufgrund der verschiedenen Studien (siehe oben) kann man davon ausgehen, dass durchschnittlich 35 % der aufgetragenen Salzmenge nicht auf der Straße verbleibt. Laut Brod (1991) gehen 10 % des aufgebrauchten Salzes in den ersten 10 m in den Boden, also circa ein Drittel der Menge, die als Streuverlust gilt. Laut der Asfinag wurden im Winter 2019 durchschnittlich $1,64 \text{ kg Cl/m}^2$ in der Region Ost-Nord-Süd auf der Autobahn aufgebracht, umgerechnet sind das $2,24 \text{ kg NaCl/m}^2$. Bei einem Streuverlust von 10 % gelangen $270 \text{ g/m}^2 \text{ NaCl}$ in den umgebenden Boden. Davon gelangen etwa 90 %, also 243 g/m^2 , in die ersten 10 m Bodentiefe. Besonders intensiv ist die Salzanreicherung in den oberen Bodenschichten, hier werden von den 243 g/m^2 nochmals 90 %, also $218,7 \text{ g/m}^2$, im ersten Meter Boden eingelagert. Dies entspricht einer Salzkonzentration von $1094,95 \text{ g}$ pro Kubikmeter oder $0,78 \text{ g NaCl}$ pro Kilogramm Boden. In Milligramm ausgedrückt sind dies $782,1 \text{ mg NaCl}$ pro Kilogramm Boden. (Lindner, Vollhofer, Atanasoff-Kardjalieff, Stundner, & Wolfram, 2019). Diese Konzentration von $782,1 \text{ mg NaCl}$ pro kg Boden stellt einen moderaten Salzwert dar und wurde daher als erste Konzentration A in den Versuchen verwendet. Die weiteren Konzentrationen B, C und D wurden festgelegt, um die Auswirkungen deutlich höherer Salzkonzentrationen zu untersuchen. Insbesondere die Konzentrationen C und D wurden gewählt, um starke Veränderungen in der Reaktion auf steigende Salzkonzentrationen zu demonstrieren und die Reaktionen der Pflanzen auf hohe Salzstressniveaus aufzuzeigen.

Bei Bodenmessungen in Österreich, Deutschland und der Schweiz sind Werte von $0,58 \text{ g NaCl/kg}$ bis $0,99 \text{ g NaCl/kg}$ Trockensubstanz nachgewiesen. Dies spiegelt Konzentration A wider. Die Proben wurden neben den Straßen A3 bei Schwechat, A1 bei Salzburg Mitte, A4 bei Heiligenkreuz, A10 bei Salzburg, B13 bei Triesdorf, Tösstal-Ost-Straße und A3 bei Siegb.-Troisdorf in einem Bodenhorizont von 0-50 cm und einer Entfernung zur Straße von 0,5 – 10 m entnommen (Brod, 1993; Albert & Frühwirt, 1987; Peer & Podlesak, 1991; Feige, Gruhm, Baumgärtner, & Herbert, 1985; Hoffmann, W., & Trenkle, 1989; Zuber, 1979). Proben neben der A5 Rimberg, A3 Siegb.-Troisdorf, A7 Meisungen, A10 Salzburg und A4 Heiligenkreuz weisen Werte von $1,12 \text{ g NaCl/kg}$ bis $2,64 \text{ g NaCl/kg}$ auf. Hier wurden diese auch aus einem Horizont von 0-50 cm Tiefe und einer Entfernung von 0-40 m entnommen (Albert & Frühwirt, 1987; Peer & Podlesak, 1991; Wentzel, 1973; Hoffmann, W., & Trenkle, 1989). Zwei Werte von der A7 bei Meisungen und der A5 bei Rimberg weisen Werte von $10,88 \text{ g}$ und $12,86 \text{ g NaCl/kg}$ Boden auf und sind somit auch über den Konzentrationen C und D (Wentzel, 1973; Brod, 1993).

Versuchsablauf

Das Konzept der Vorversuche basiert auf der Arbeit von A. D. Ayers und H. E. Hayward, in denen der Einfluss unterschiedlicher Salzkonzentrationen auf die Keimraten von sechs ausgewählten Nutzpflanzen untersucht wurde. Zunächst wurde der gesiebte Boden befeuchtet und dann das Salz in verschiedenen Konzentrationen eingearbeitet. Die Behälter wurden verschlossen, die Temperatur konstant gehalten und der Versuchsboden regelmäßig durchmischt. Nach etwa zwei Wochen wurden die Samen hinzugefügt und die gekeimten Samen regelmäßig bis zum zwanzigsten Tag gezählt. Die Versuchsbehältnisse wurden kontinuierlich unter konstanten Temperaturbedingungen nach dem Zufallsprinzip gemischt (Ayers & Hayward, 1949). Für diese Untersuchung wurde der Versuch modifiziert und an die spezifischen Bedingungen angepasst, wobei nicht nur die Keimungsraten, sondern auch das Frisch- und Trockengewicht der Pflanzen erfasst wurden (siehe Abschnitt 3.3 und 4.1).

Das Vorgehen im Hauptversuch orientiert sich an einem Versuch von Zhao, Ma und Ren aus dem Jahr 2007. In dieser Untersuchung wurden nach einem anfänglichen Keimtest jeweils 20 Samen verschiedener Hafersorten in Sand in 2-Liter-Töpfe ausgesät. Nach der Keimung wurde die Anzahl der Pflanzen pro Topf auf zwölf reduziert. Vierzehn Tage nach der Keimung begann die tägliche Bewässerung der Töpfe mit jeweils 200 ml verschiedener Salzlösungen, insgesamt sechs Varianten. Anschließend wurden wichtige Wachstumsparameter wie Chlorophyllgehalt, Gasaustauschkapazität und Ionenkonzentrationen in den Pflanzen systematisch erfasst (Zhao, Ma, & Ren, 2007).

Im Gegensatz zum obigen Versuch sollen in diesem Versuch die Auswirkungen eines zuvor mit Streusalz versalzen Bodens simuliert werden. Dazu wurde der Boden vor Versuchsbeginn gezielt mit Salz angereichert und sorgfältig durchmischt. Nach dieser initialen Salzzugabe erfolgte keine weitere Salzzugabe. Neben der Keimrate und dem Trockengewicht wurden noch andere Parameter erhoben (siehe 3.4)

3.2. Salzgehaltmessung – $EC_{(e)}$

Der Salzgehalt im Boden wurde mit der elektrischen Leitfähigkeit (EC), mit Hilfe eines Leitfähigkeits-Messgeräts (WTW Vario Cond Set), gemessen. Das Gerät wurde neu kalibriert (siehe Abbildung 12). Zur Herstellung eines Leitfähigkeitsstandards wurden 14,911 g KCl mit einer Genauigkeit von 0,001 g eingewogen. Diese Menge wurde mit destilliertem Wasser in einen 1 l Messkolben überführt und gespült. Der Kolben wurde bis zur Marke mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Aliquote der Stammlösung wurden in einen 100 ml Messkolben pipettiert und ebenfalls mit destilliertem Wasser bis zur Marke aufgefüllt, um die Verdünnung zu

vervollständigen. (siehe Tabelle 4) (Standardherstellung für die Überprüfung der Leitfähigkeit, 2016).

Standard	Aliquot in ml	c (KCl) [mg/l]	β (KCl) [mg/l]	Leitfähigkeit [mS/cm]
1	Stammlösung unverdünnt	200	14911	24,8
2	50	100	7455,5	12,9
3	25	50	3727,8	6,7
4	10	20	1491,1	2,77
5	5	10	745,55	1,41
6	2,5	5	372,78	0,72
7	0,5	1	74,555	0,147
8	0,25	0,5	37,278	0,074

Tabelle 4: Standardherstellung für die Überprüfung der Leitfähigkeit (Standardherstellung für die Überprüfung der Leitfähigkeit, 2016)

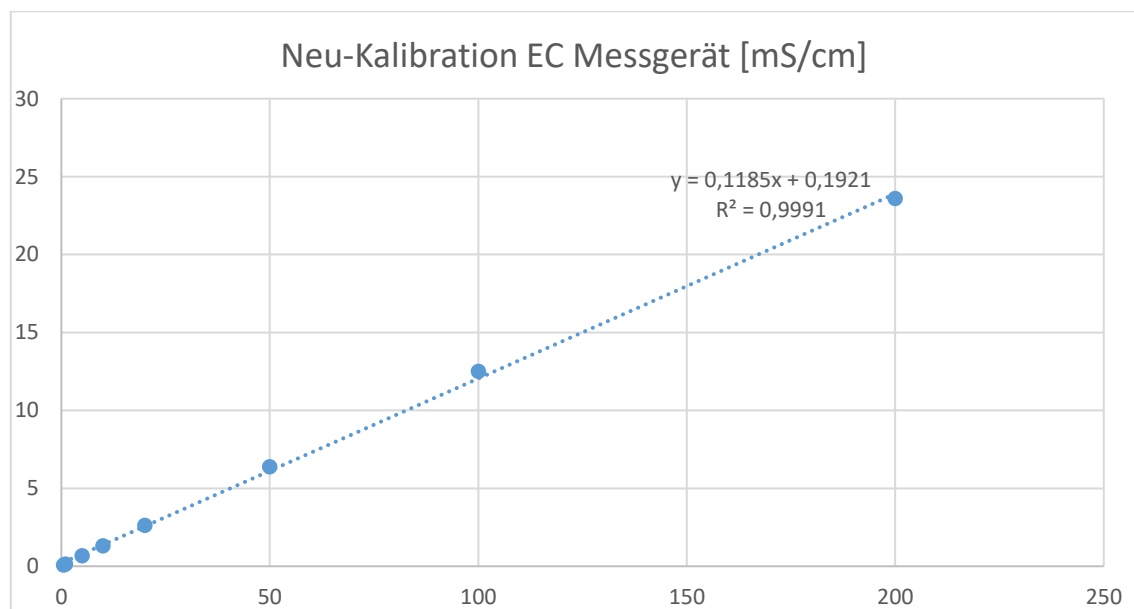


Abbildung 12: Neu-Kalibration EC Messgerät

Bei der Messung des Salzgehalts muss laut ÖNORM ein Masseanteil Feinboden mit einem Volumenanteil Reinwasser vermengt werden. Danach wird diese geschüttelt und anschließend zentrifugiert. Das Filtrat wird danach mit dem EC Messgerät gemessen und die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Die Messung muss bei einer Einstellung der Temperaturkorrektur auf 25°C durchgeführt werden (Standards, 2007)

In der Literatur wird die elektrische Leitfähigkeit mit EC_e angegeben. Hier handelt es sich um die *electrical conductivity of the saturation extract (dS/m)* (Grattan, 2016; Slavich & Lugg, 1993), also um die elektrische Leitfähigkeit eines mit Wasser gesättigten Extrakts. Die Proben werden jedoch nach der ÖNORM L 1099 (1:1 Verhältnis, $EC_{(1:1)}$) gemessen und müssen deswegen nach der folgenden Gleichung nach Kargas et al. (2018) umgerechnet werden.

$$EC_e = 1,83 (EC_{1:1}) + 0,117$$

Ebenso ist auch zu beachten, dass die Ergebnisse der ÖNORM Messung in $\mu\text{S}/\text{cm}$ oder mS/cm angegeben sind und müssen deshalb in dS/m umgerechnet werden.

3.2.1. Probenaufbereitung

Die zu beprobende Erde wurde homogenisiert und ca. 300 g kamen in eine Aluschale und anschließend in den Trockenschrank. Hier wurde die Erde bis zur Gewichtskonstante bei 105° getrocknet. Anschließend musste die Probe mit einem Mörser zerkleinert und in Falcon Tubes abgefüllt werden, zu 25 g Boden kamen 25 g destilliertes Wasser. Pro Probe wurden 3-5 Replikate hergestellt. Danach wurde die Lösung zuerst mit der Hand geschüttelt und anschließend mindestens eine Stunde auf einem Horizontalschüttler mit einer Schüttelfrequenz von 180 min^{-1} eluiert.

Die Falcon Tubes wurden 20 Minuten bei 4700 rpm zentrifugiert und die Lösung mit dem EC Messgerät gemessen. Jede Messung wurde dreimal wiederholt und nach jedem Vorgang wurde das Gerät und das Behältnis mit destilliertem Wasser gespült (Standards, 2007).

3.3. Durchführung der Vorversuche (VV) 1 und 2

Zur Herstellung der Salzlösungen für die vorbereitenden Experimente wurden jeweils 5 Liter entsalzten Wassers verwendet. Für die verschiedenen Konzentrationen – A bis D – wurden entsprechend 15,642 g, 31,28 g, 46,926 g und 62,568 g Natriumchlorid (NaCl) zugegeben, um die gewünschten Salzkonzentrationen zu erreichen, siehe Abschnitt 3.1 "Salzgehalt".

Die Experimente fanden unter Verwendung von lehmigem Ackerboden statt, siehe Abschnitt 3.1 und den Abbildung 6 bis Abbildung 11. Zuvor wurde das Trockengewicht des Bodens bestimmt, der einen Feuchtigkeitsanteil von 11,7 % bzw. 11,9 % aufwies. Für die Versuche wurden 225 g des Bodensubstrats, basierend auf einem Trockengewicht von 200 g, in Petrischalen mit einem Durchmesser von 150 mm eingefüllt. Für den ersten Vorversuch (VV1) wurden 13 Samen pro Pflanzensorte und für den zweiten Vorversuch (VV2) 10 Samen in jede Schale eingebracht und im Substrat platziert, sodass sie vollständig bedeckt waren. Jede Pflanzensorte und Konzentration wurde in drei Wiederholungen angelegt. Für VV2 wurden vier Rapssorten aufgrund ungeeigneter Handhabungsmöglichkeiten nach dem ersten Vorversuch nicht weiterverwendet, was zu einer Anpassung der Anzahl der Petrischalen pro Sorte führte, einschließlich der Kontroll- und vier Salzkonzentrationen, ebenso wurden im VV2 10 Samen pro Petrischale verwendet. Das Substrat wurde anschließend mit 50 ml der jeweiligen Salzlösung bzw. mit entsalztem Wasser für die Kontrollgruppe bewässert. Die Petrischalen wurden

daraufhin abgedeckt, wobei die Deckel nach zwei Tagen entfernt wurden, um eine angemessene Belüftung zu gewährleisten.

Die Bewässerung der Pflanzen erfolgte bei Bedarf mit 50 ml Leitungswasser, wobei nach den Wochenenden jeweils 100 ml verwendet wurden. Der Start von VV1 war am 27. Juni 2022 mit einer Ernte am 5. Juli 2022. VV2 begann am 15. Juli, mit der Ernte aufgeteilt in zwei Phasen: am 20. Juli für Mais, Bohnen und Sojabohnen und am 21. Juli 2022 für Wintergerste und Hartweizen (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: li - Petrischalen im Glashaus; re - Pflanzen bei Ernte und Messung

Zur Erntezeit wurden die Petrischalen mit Wasser gespült, um den Boden von den Pflanzen zu trennen. Die Samen wurden entfernt und das Frischgewicht der Pflanzen ermittelt. Anschließend wurden die Pflanzen einer jeden Schale in ein Papiersackerl gegeben und im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, woraufhin das Trockengewicht bestimmt wurde. Während bei VV1 die Ernte an einem Tag stattfand, wurde sie aus zeitlichen und arbeitstechnischen Gründen in den nachfolgenden Versuchen auf zwei Tage aufgeteilt.

Aufgrund eines sehr heißen Wochenendes sind vereinzelt Petrischalen nahe am Fenster während des VV1 eingetrocknet und somit konnte hier kein Frischgewicht erhoben werden, sondern nur das Trockengewicht (Wintergerste „Sandra“, Winterdurum „Tennodur“, Sommerdurum „Durofinus“, Sojabohne „Melanie“ und „Leonie“).

3.4. Durchführung der Hauptversuche (HV) 1 und 2

Für die Hauptversuche wurden 4,5 kg Erde mit einem Wassergehalt von 13 % in einem Rührgerät mit 500 ml entsalztem Wasser vermengt, was einem Trockengewicht von 4 kg entspricht. Diese Mischung wurde gleichmäßig auf zwei Töpfe verteilt. Zur Vermeidung jeglicher Verunreinigung wurden zunächst alle Kontrollmischungen hergestellt. Aus jeder Bodenmischung wurde eine Probe entnommen, um die elektrische Leitfähigkeit (EC) zu messen. Für Konzentration A wurden 782,1 mg NaCl pro kg Trockenmasse hinzugefügt, indem 100 ml dieser Salzlösung mit 400 ml entsalztem Wasser verdünnt und gründlich in die Erde eingearbeitet wurden. Dieser Prozess wurde für alle Töpfe mit Konzentration A wiederholt, wobei die Ausrüstung zwischen den Durchgängen gereinigt wurde, um zusätzliche Salzanreicherung zu verhindern. Derselbe Vorgang wurde anschließend für Konzentration B durchgeführt.

Für die Aussaat wurden in die vorbereiteten Töpfe mit unterschiedlichen Salzkonzentrationen Samen eingebracht: Pro Topf fünf Samen für Mais, Soja und Ackerbohne, und zehn für Winterdurum, aufgrund des geringeren Platzbedarfs. Es wurden jeweils fünf Töpfe aus der gleichen Salzkonzentrationsgruppe in ein Tray gestellt und mit drei Litern Leitungswasser zur Bewässerung versorgt. Um Salzauswaschungen zu verhindern, erfolgte die Bewässerung ausschließlich von unten, indem Wasser direkt in die Trays gegeben wurde, was eine kontinuierliche Feuchtigkeitsversorgung ohne direkten Wasserkontakt mit der Erdoberfläche sicherstellte.

Am 29. Juli wurden die Pflanzentöpfe zufällig angeordnet, wobei innerhalb jedes Trays ausschließlich Töpfe mit identischer Salzkonzentration platziert wurden. Diese Anordnung wurde durch Abdecken der Töpfe für einen Tag ergänzt, um die Keimung zu verbessern. Die Position der Trays im Glashaus wurde aufgrund der Fensterfront dreimal gewechselt, um eine gleichmäßige Sonnenlichtverteilung zu gewährleisten. Vier Tage vor der geplanten Ernte erfolgte eine Chlorophyllmessung bei allen Pflanzen. Die Ernte und Datenerfassung von Mais und Winterdurum wurde am 22. August durchgeführt, gefolgt von Soja und Ackerbohnen am 23. August.

Bei der Datenerfassung wurden die Pflanzen durch Wasser von der Erde getrennt, ähnlich wie bei den Vorversuchen. Die feinen Wurzeln von Winterdurum und die Beschaffenheit der lehmigen Erde erschwerten die Erhebung der Wurzeldata bei diesen, weshalb diese hier ausgelassen wurden. Die Wurzeln und oberirdischen Teile wurden separat gewogen. Zusätzlich wurden die Keimrate, die Stängellänge und die Blattoberfläche aller Pflanzen eines Topfes

ermittelt. Nach der Messung kamen die Pflanzen in den Trockenschrank, um das Trockengewicht von Wurzeln und Pflanzenteilen zu bestimmen.

Im zweiten Hauptversuch wurde sandige Erde anstelle von lehmiger Erde verwendet, was das Auswaschen der Wurzeln und somit die Datenerhebung bei Winterdurum erleichterte. Die Vorgehensweise entsprach ansonsten dem ersten Hauptversuch, einschließlich der Datenerhebungsmethoden wie die Trennung und das Wiegen der Wurzeln, die Ermittlung der Keimrate, die Messung der Stängellänge und der Blattoberfläche, sowie die Trocknung der Pflanzen im Trockenschrank zur Bestimmung des Trockengewichts

4. Ergebnisse

In Vorversuchen wurde der Einfluss unterschiedlicher Salzkonzentrationen auf die Keimrate und das Wachstum bzw. die Biomasse ausgewählter Nutzpflanzen untersucht (siehe Tabelle 2). Durch die anschließende Bewertung der Pflanzenentwicklung unter variierenden Salzbedingungen sollten erste Erkenntnisse über die Reaktion der Pflanzen auf erhöhte Salzgehalte gewonnen werden. Die Ergebnisse dieser Vorversuche bildeten die Grundlage für die weiterführenden Hauptexperimente.

Die Hauptversuche konzentrierten sich auf die Auswirkungen der Salzkonzentrationen A und B auf ausgewählte Gruppen von Pflanzenarten unter zwei verschiedenen Bodenbedingungen. Diese Experimente erweiterten das Verständnis von Salzstressreaktionen über die anfängliche Keimungs- und frühe Wachstumsphase hinaus, indem die Pflanzenentwicklung über einen längeren Zeitraum und unter spezifischeren Bedingungen untersucht wurde. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse geben einen detaillierten Einblick in die Wachstumsdynamik und die physiologischen Anpassungen der Pflanzen an salzbelastete Umweltbedingungen.

Legende Hauptversuche:

-  Kontrollgruppe; Anzahl der Wiederholungen 5
-  Salzkonzentration A, 782,1 mg/kg NaCl; Anzahl der Wiederholungen 5
-  Salzkonzentration B, 1564,2 mg/kg NaCl; Anzahl der Wiederholungen 5

4.1. 4.1 Vorversuche

In den Vorversuchen zeigte sich, dass die Keimraten bestimmter Pflanzensorten auf die Veränderungen in den Salzkonzentrationen unterschiedlich reagierten. Im ersten Vorversuch fiel die Keimrate der Maissorte „LG30179“ von 97,44 % in der Kontrolle auf 87,18 % bei Salzkonzentration A, weiter auf 82,05 % bei B, stieg dann wieder auf 87,18 % bei C und fiel erneut auf 82,05 % bei D. Ähnlich verhielt es sich bei der Ackerbohne „Sunrise“, deren Keimrate von 64,1 % in der Kontrolle bis auf 43,59 % bei Konzentration C und 51,28 % bei D fiel. Im zweiten Vorversuch sank die Keimrate der Ackerbohne „Emilia“ von 93,33 % in der Kontrolle auf 76,66 % bei der höchsten Salzkonzentration.

Die meisten Nutzpflanzensorten zeigten keine eindeutigen Korrelationen zwischen der Keimrate und der Salzkonzentration. Einige Sorten, wie die Wintergerste „Paradies“ im ersten Vorversuch und die Sojabohne „Judith“ im zweiten, wiesen durchgängig ähnliche Keimraten auf, unabhängig von der Salzkonzentration. Andere, wie die Wintergerste „Sandra“ und wiederum die Sojabohne „Judith“ im zweiten Vorversuch, zeigten Schwankungen in den Keimraten. Der Sommerdurum „Durofinus“ und „Videodur“ verzeichneten als einzige Sorten im zweiten Vorversuch eine steigende Keimrate bei erhöhten Salzkonzentrationen.

Die Daten aus den Vorversuchen zeigen, dass mit erhöhter Salzkonzentration eine Abnahme des Trockengewichts bei den meisten Nutzpflanzensorten stattfand. Speziell bei der Sojabohne „Leonie“ sank das Durchschnittsgewicht pro Pflanze von 0,05 g auf 0,01 g bei der höchsten Salzkonzentration D. Dieses Muster zeigte sich ebenfalls bei der Ackerbohne „Emilia“, deren Trockengewicht von 0,03 g auf 0,01 g fiel. In einem weiteren Vorversuch verringerte sich das Gewicht des Maises „LG30179“ kontinuierlich von 0,16 g auf 0,10 g in den Gruppen C und D.

In den Vorversuchen zeigten wenige Pflanzen eine deutliche Abnahme des durchschnittlichen Frischgewichts mit steigender Salzkonzentration. Jedoch bei der Sojabohne „Leonie“ und der Ackerbohne „Emilia“ im ersten Vorversuch, der Ackerbohne „Alexia“ im zweiten Vorversuch sowie der Sojabohne „Judith“ in beiden Vorversuchen wurde ein fallendes Frischgewicht mit zunehmender Salzkonzentration festgestellt.

Detaillierte Ergebnisse und entsprechende Graphen zu den Vorversuchen sind im Anhang der Arbeit zu finden.

4.1 Hauptversuch 1 (lehmiger Boden)

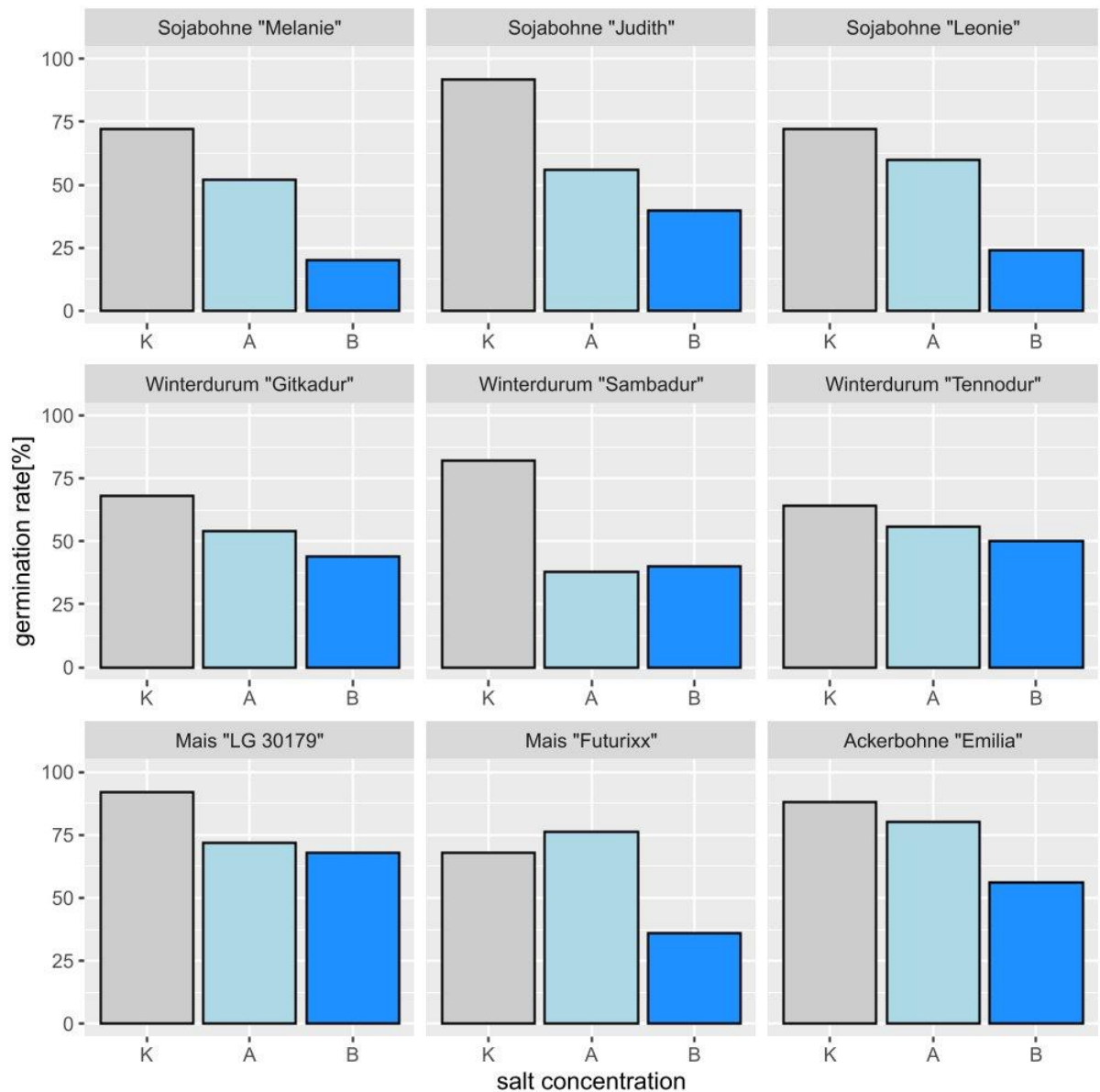


Abbildung 14: Keimrate der gekeimte Samen im Vergleich zu gesäten Samen (10 Stk. bei Durum Sorten und je 5 Stk bei Sojabohne, Mais und Ackerbohnen Sorten), K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Anzahl der Wiederholungen jeweils 5; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

Im ersten Hauptversuch zeigte sich bei fast allen untersuchten Sorten eine klare Tendenz zur Abnahme der Keimrate mit steigender Salzkonzentration. Besonders deutlich wurde dies bei der Sojabohne „Judith“, bei der die Keimrate von 92 % in der Kontrolle auf 56 % in der Salzkonzentration A und weiter auf 40 % in der Konzentration B sank. Ähnliche Muster wurden auch bei anderen Sojabohnensorten beobachtet (siehe Abbildung 14 und Tabelle 5).

Bei Winterdurum zeigten die Sorten „Gitkadur“ und „Tennodur“ die geringsten Unterschiede in den Keimraten über die Salzkonzentrationen. Die Keimrate der Sorte „Gitkadur“ betrug 68 % in der Kontrolle, 54 % in A und 44 % in B. Die Keimrate der Sorte „Tennodur“ betrug 64 % in der Kontrolle, 56 % in A und 50 % in B. Die Sorte „Sambadur“ zeigte eine stärkere Abnahme von 82 % in der Kontrolle auf 38 % in A und 40 % in B, aber der Unterschied zwischen den Konzentrationen A und B war geringer (siehe Abbildung 14 und Tabelle 5).

Die Maissorte "LG 30179" zeigte einen abnehmenden Trend der Keimrate mit steigender Salzkonzentration von 92 % in der Kontrolle auf 72 % in Salzkonzentration A und weiter auf 68 % in Salzkonzentration B. Im Gegensatz dazu zeigte die Maissorte "Futurixx" einen anfänglichen Anstieg der Keimrate von 68 % in der Kontrolle auf 76 % in Salzkonzentration A, gefolgt von einem deutlichen Rückgang auf 36 % in Salzkonzentration B. Die Maissorte "Futurixx" zeigte einen abnehmenden Trend der Keimrate mit steigender Salzkonzentration (siehe Abbildung 14 und Tabelle 5).

Wie bei den anderen Sorten zeigte die Ackerbohne „Emilia“ eine stetige Abnahme der Keimrate mit zunehmender Salzkonzentration. Die Keimrate fiel von 88 % in der Kontrollgruppe auf 80 % bei Salzkonzentration A und weiter auf 56 % bei Konzentration B. Dieses Muster stimmte mit den Beobachtungen bei Sojabohne, der Maissorte „LG30179“ und den Winterdurumsorten „Gitkadur“ und „Tennodur“ überein (siehe Abbildung 14 und Tabelle 5).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	72	92	72	68	82	64
A	52	60	60	54	38	56
B	20	24	24	44	40	50
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	92	68	88			
A	72	76	80			
B	68	36	56			

Tabelle 5: Wertetabelle der Keimrate in [%], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

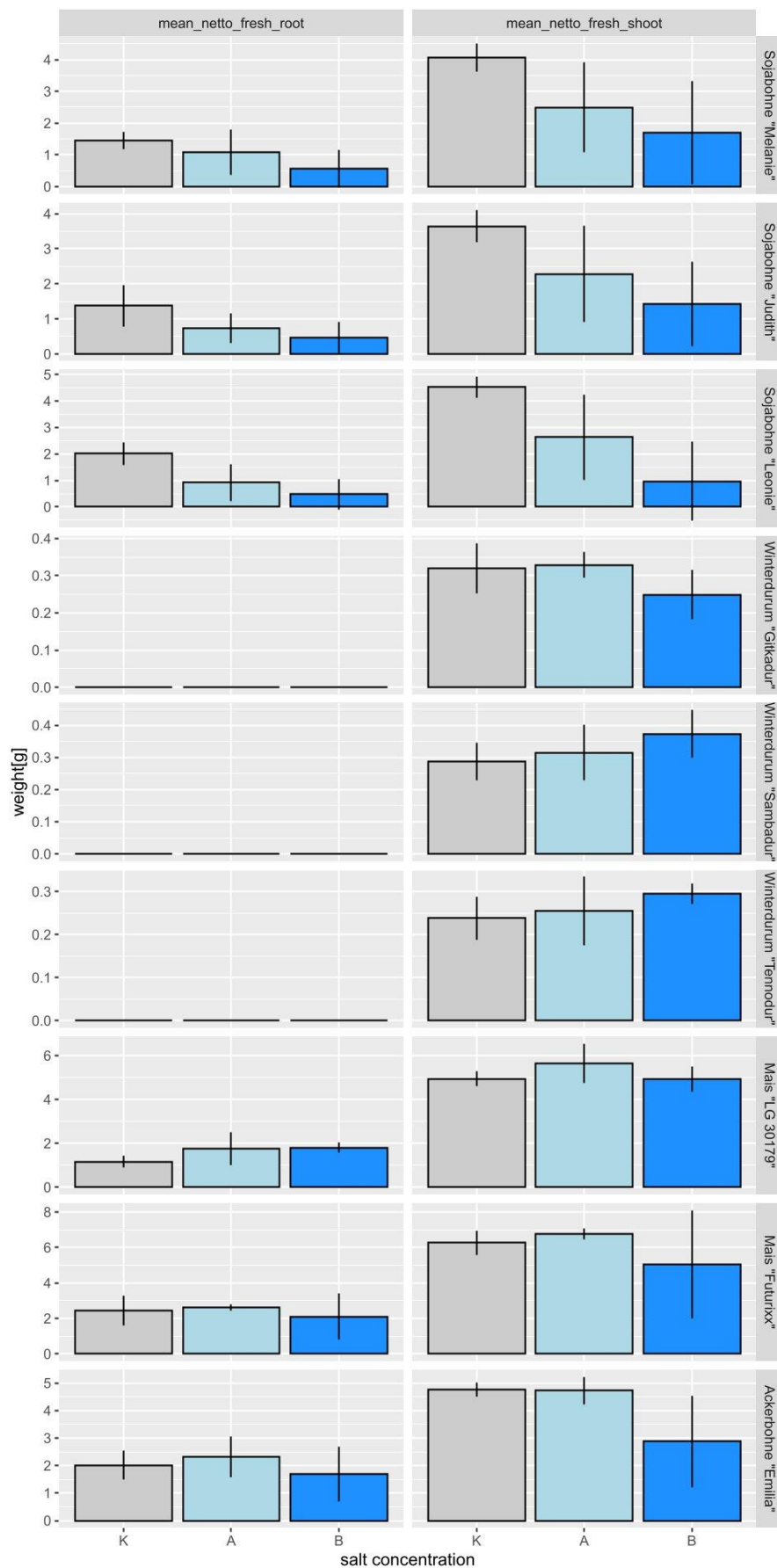


Abbildung 15: Frischgewicht der Wurzeln und der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

Bei allen drei Sojabohnensorten wurde eine Abnahme des Frischgewichtes sowohl der Wurzel als auch der Sprossachse mit zunehmender Salzkonzentration festgestellt. Bei der Sorte „Melanie“ sank das Wurzelgewicht von 1,46 g in der Kontrolle auf 0,56 g in der Konzentration B, während das Sprossgewicht von 4,06 g auf 1,71 g sank. Ähnliche Muster wurden auch bei den Sorten „Judith“ und „Leonie“ beobachtet. Bei Winterdurum wurde nur das Gewicht der Sprossachse gemessen. Im Gegensatz zu den Sojabohnen zeigten die Sorten „Sambadur“ und „Tennodur“ eine kontinuierliche Gewichtszunahme mit steigender Salzkonzentration. Bei „Sambadur“ stieg das Gewicht von 0,29 g in der Kontrolle auf 0,37 g in der Konzentration B, während „Tennodur“ in der Gruppe A von 0,32 g auf 0,33 g anstieg und in der Konzentration B auf 0,25 g fiel (siehe Abbildung 15, Tabelle 6 und Tabelle 7). Bei den Maissorten wurde sowohl das Wurzel- als auch das Sprossachsengewicht durch die Erhöhung der Salzkonzentration unterschiedlich beeinflusst. Bei der Sorte „Futurixx“ erhöhte sich das Wurzelgewicht von 2,44 g in der Kontrolle auf 2,62 g bei der Konzentration A, bevor es auf 2,10 g bei der Konzentration B sank. Die Sprossachse wog in der Kontrolle 6,27 g, stieg mit A auf 6,76 g und fiel mit B auf 5,05 g. Die Ackerbohnen Sorte „Emilia“ wies in der Kontrollgruppe ein Wurzelgewicht von 2,01 g und ein Sprossgewicht von 4,76 g auf. In der Salzkonzentrationsgruppe A stieg das Wurzelgewicht leicht auf 2,31 g an, während das Sprossgewicht mit 4,72 g nahezu unverändert blieb. Bei der Konzentration B sank das Wurzelgewicht auf 1,69 g und das Sprossgewicht deutlich auf 2,88 g (siehe Abbildung 15, Tabelle 6 und Tabelle 7).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	1,46	1,38	2,01	-	-	-
A	1,08	0,74	0,92	-	-	-
B	0,56	0,46	0,46	-	-	-
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	1,16	2,44	2,01			
A	1,75	2,62	2,32			
B	1,81	2,10	1,69			

Tabelle 6: Wertetabelle des Frischgewichts der Wurzeln in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	4,06	3,64	4,52	0,32	0,29	0,24
A	2,49	2,28	2,63	0,33	0,31	0,26
B	1,71	1,42	0,97	0,25	0,37	0,30
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	4,94	6,27	4,76			
A	5,65	6,76	4,72			
B	4,93	5,54	2,88			

Tabelle 7: Wertetabelle des Frischgewichts der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

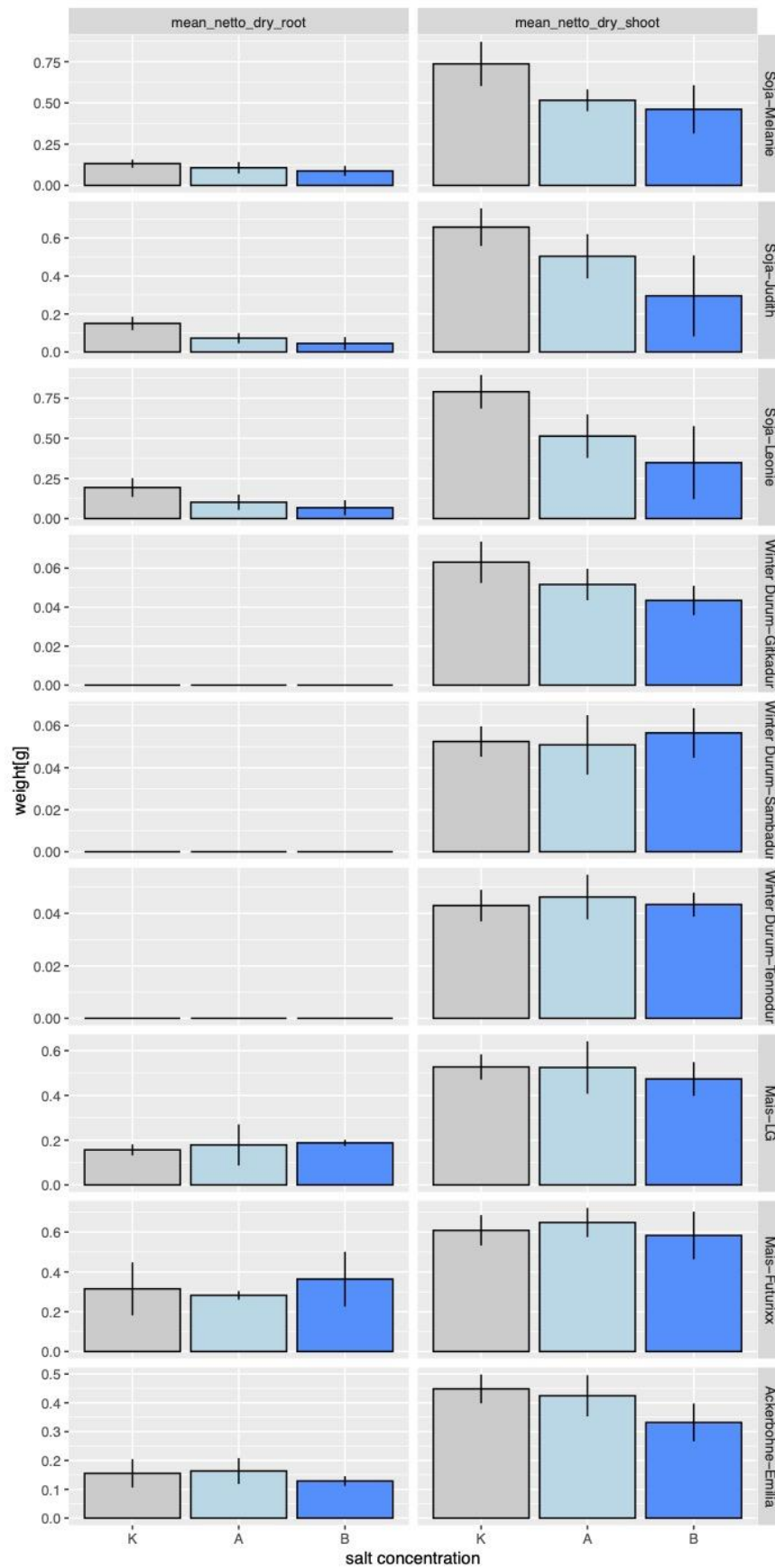


Abbildung 16: Trockengewicht der Wurzeln und der Sprossachse, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

Auch das Trockengewicht nahm bei allen Sojabohnensorten mit steigender Salzkonzentration ab. Bei der Sorte „Leonie“ sank das Wurzeltrockengewicht von 0,19 g in der Kontrolle auf 0,07 g in der Konzentration B und das Sprossgewicht von 0,79 g auf 0,35 g (siehe Abbildung 16, Tabelle 8Tabelle 9). Das Trockengewicht des Winterdurums „Gitkadur“ nahm mit steigender Salzkonzentration kontinuierlich ab, von 0,06 g in der Kontrolle auf 0,04 g in der Konzentration B. Bei der Sorte „Sambadur“ blieb das Gewicht mit 0,05 g in der Kontrolle und 0,05 g in der Konzentration A fast unverändert, stieg dann aber auf 0,06 g an. Bei „Tennodur“ waren die Veränderungen im Trockengewicht in allen drei Gruppen gering (siehe Abbildung 16, Tabelle 8Tabelle 9).

Bei der Maissorte „LG30179“ wurde ein leichter Anstieg des Wurzeltrockengewicht mit zunehmender Salzkonzentration festgestellt. Das Sprossachsengewicht blieb in der Kontrolle und in der Gruppe A mit ca. 0,53 g gleich und sank in der Gruppe B auf 0,47 g. Bei „Futurixx“ nahm das Wurzelgewicht von der Kontrolle bis zur Gruppe A leicht ab, stieg aber in der Gruppe B über das Kontrollniveau an. Das Sprossachsengewicht stieg von 0,61 g in der Kontrolle auf 0,65 g in Gruppe A und fiel dann auf 0,58 g in Gruppe B. Bei der Ackerbohne „Emilia“ wurde mit steigender Salzkonzentration ein anfänglicher Anstieg des Wurzeltrockengewicht beobachtet, der jedoch unter das Niveau der Kontrolle fiel. Das Sprossachsengewicht sank kontinuierlich von 0,45 g in der Kontrolle auf 0,43 g in der Salzkonzentration A und weiter auf 0,33 g in der Gruppe B (siehe Abbildung 16, Tabelle 8Tabelle 9).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	0,13	0,15	0,19	-	-	-
A	0,11	0,07	0,10	-	-	-
B	0,09	0,05	0,07	-	-	-
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	0,16	0,32	0,16			
A	0,18	0,28	0,16			
B	0,19	0,36	0,13			

Tabelle 8: Wertetabelle des Trockengewichts der Wurzeln in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	0,74	0,66	0,79	0,06	0,05	0,04
A	0,52	0,50	0,51	0,05	0,05	0,05
B	0,46	0,30	0,35	0,04	0,06	0,04
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	0,53	0,61	0,45			
A	0,53	0,65	0,43			
B	0,47	0,58	0,33			

Tabelle 9: Wertetabelle des Trockengewichts der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

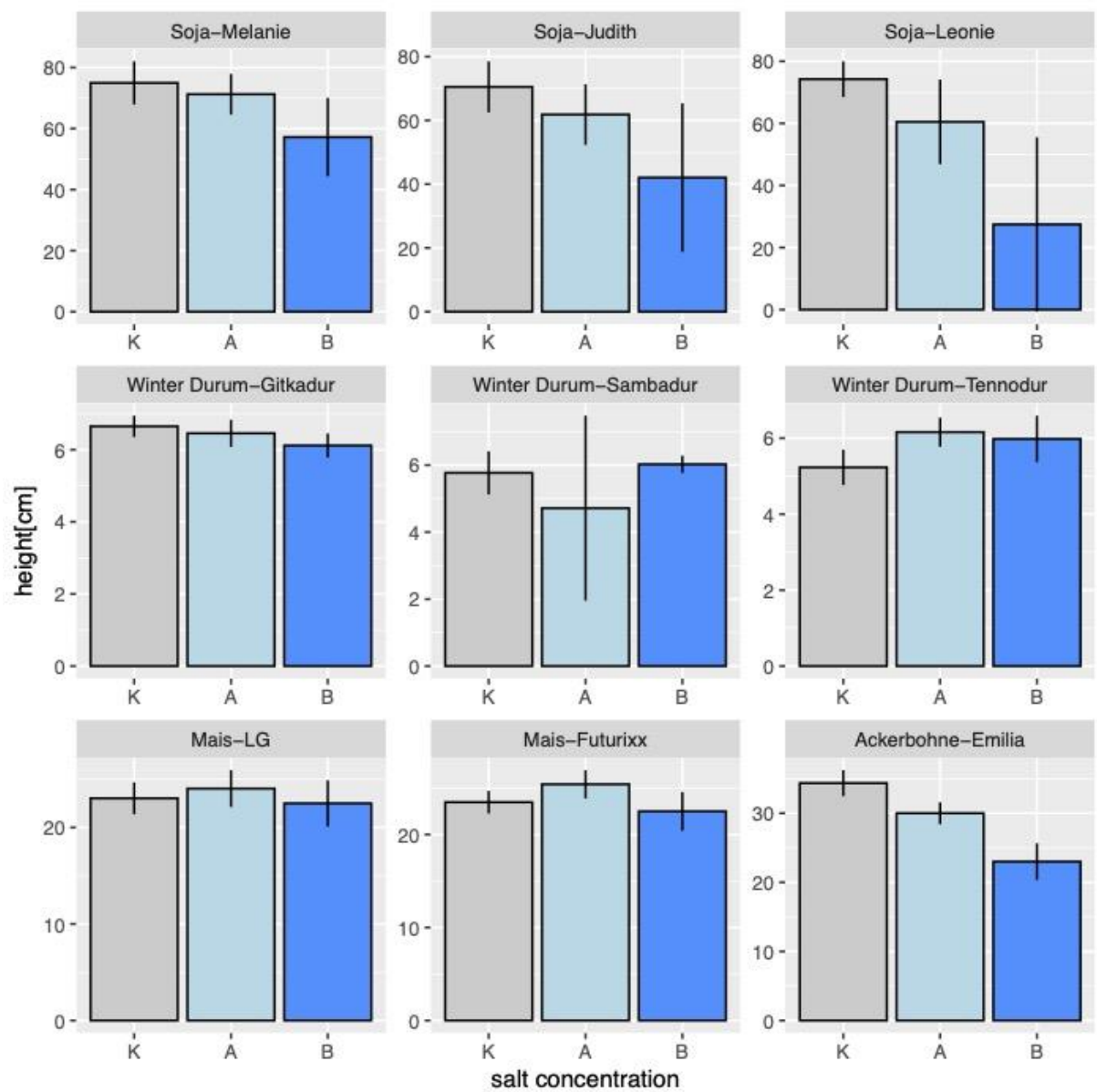


Abbildung 17: Durchschnittliche Höhe der Sprossachsen, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

Die durchschnittliche Höhe der Sojabohnen zeigte eine stetige Abnahme mit steigender Salzkonzentration. Insbesondere bei der Sorte „Leonie“ verringerte sich die Höhe deutlich von 74,2 cm in der Kontrolle auf 60,5 cm in der Gruppe A und weiter auf 27,5 cm in der Gruppe B (siehe Abbildung 17 und Tabelle 10).

Die drei Winterdurumsorten wiesen geringe Unterschiede im Längenwachstum der Sprossachse auf. Bei „Gitkadur“ verringerte sich die Höhe leicht von 6,6 cm auf 6,5 cm und dann weiter auf 6,2 cm. Bei „Tennodur“ hingegen nahm die Höhe von 5,2 cm auf 6,2 cm zu und dann wieder leicht auf 6 cm ab (siehe Abbildung 17 und Tabelle 10).

Bei Mais wurden ähnlich geringe Unterschiede im Wachstum der Sprossachsen festgestellt. Bei der Sorte „LG30179“ stieg die Länge in der Gruppe A geringfügig auf 24 cm an, sank jedoch in der Gruppe B auf 22,5 cm und lag damit knapp unter dem Niveau der Kontrolle. Bei der Sorte „Futurixx“ zeigte sich ein ähnliches Muster mit einer leichten Zunahme in der Gruppe A und einer leichten Abnahme in der Gruppe B, jeweils im Vergleich zur Kontrolle (siehe Abbildung 17 und Tabelle 10).

Die Ackerbohne „Emilia“ zeigte eine kontinuierliche Abnahme der Sprossachsenlänge mit steigender Salzkonzentration. Die Kontrollpflanzen erreichten eine durchschnittliche Höhe von 34,4 cm. In Gruppe A verringerte sich diese Höhe auf 30 cm und in Gruppe B weiter auf 23 cm (siehe Abbildung 17 und Tabelle 10).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	75,0	70,5	74,2	6,6	5,8	5,2
A	71,3	61,8	60,5	6,5	4,7	6,2
B	57,2	42,1	27,5	6,2	6,0	6,0
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	23,0	23,5	34,4			
A	24,0	25,4	30,0			
B	22,5	22,5	23,0			

Tabelle 10: Wertetabelle der durchschnittlichen Höhe der Sprossachsen in [cm], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

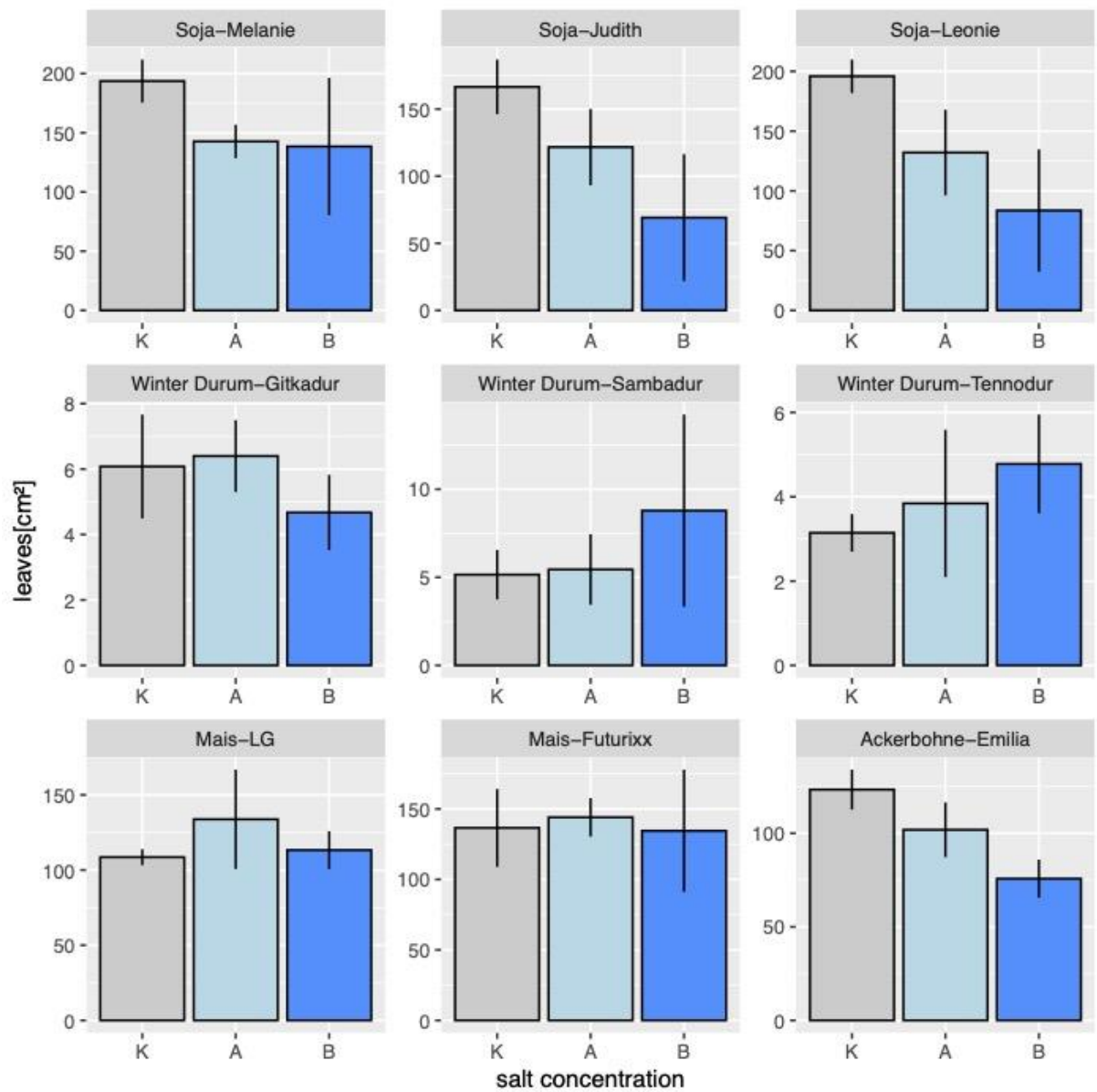


Abbildung 18: Blattfläche pro Topf in [cm²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

Auch die Blattfläche der Sojabohnen nahm mit steigender Salzkonzentration stetig ab. Die Sorte „Melanie“ zeigte die geringste Blattflächenabnahme von 193,7 cm² in der Kontrolle auf 142,7 cm² in der Gruppe A und weiter auf 138,5 cm² in der Gruppe B. Die stärkste Abnahme der Blattfläche wurde bei der Sorte „Leonie“ beobachtet, wo die Blattfläche von 195,9 cm² in der Kontrolle auf 132,1 cm² in der Gruppe A und schließlich auf 83,6 cm² in der Gruppe B abnahm (siehe Abbildung 18 und Tabelle 11).

Im Gegensatz zur Sojabohne zeigten die Winterdurumsorten „Sambadur“ und „Tennodur“ ein kontinuierliches Wachstum der Blattfläche. Besonders auffällig war dies bei „Sambadur“, wo die Blattfläche von 5,2 cm² in der Kontrollgruppe auf 8,8 cm² in der Gruppe B anstieg. Bei „Gitkadur“ nahm die Blattfläche von 6,1 cm² in der Kontrolle auf 6,4 cm² in Gruppe A zu, in Gruppe B aber auf 4,7 cm² ab (siehe Abbildung 18 und Tabelle 11).

Bei der Maissorte „LG30179“ stieg die Blattfläche von 108,6 cm² in der Kontrolle auf 133,7 cm² in der Gruppe A und sank dann auf 113,2 cm² in der Gruppe B, blieb aber über dem Kontrollwert. Ähnlich verhielt es sich bei „Futurixx“, wo die Blattfläche von 136,6 cm² in der Kontrolle auf 144 cm² in Gruppe A zunahm und in Gruppe B auf 134,5 cm² abnahm und damit leicht unter dem Kontrollwert lag (siehe Abbildung 18 und Tabelle 11).

Die Blattfläche der Ackerbohne „Emilia“ zeigte ebenfalls eine stetige Abnahme mit steigender Salzkonzentration, ähnlich wie bei den Sojabohnensorten. In der Kontrollgruppe betrug die Blattfläche 123,4 cm², in Gruppe A verringerte sie sich auf 101,9 cm² und in Gruppe B weiter auf 75,7 cm² (siehe Abbildung 18 und Tabelle 11).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	193,7	166,5	195,9	6,1	5,2	3,1
A	142,7	121,7	132,1	6,4	5,4	3,8
B	138,5	69,1	83,6	4,7	8,8	4,8
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	108,6	136,6	123,4			
A	133,7	144,0	101,9			
B	113,2	134,5	75,7			

Tabelle 11: Wertetabelle der Blattfläche pro Topf in [cm²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

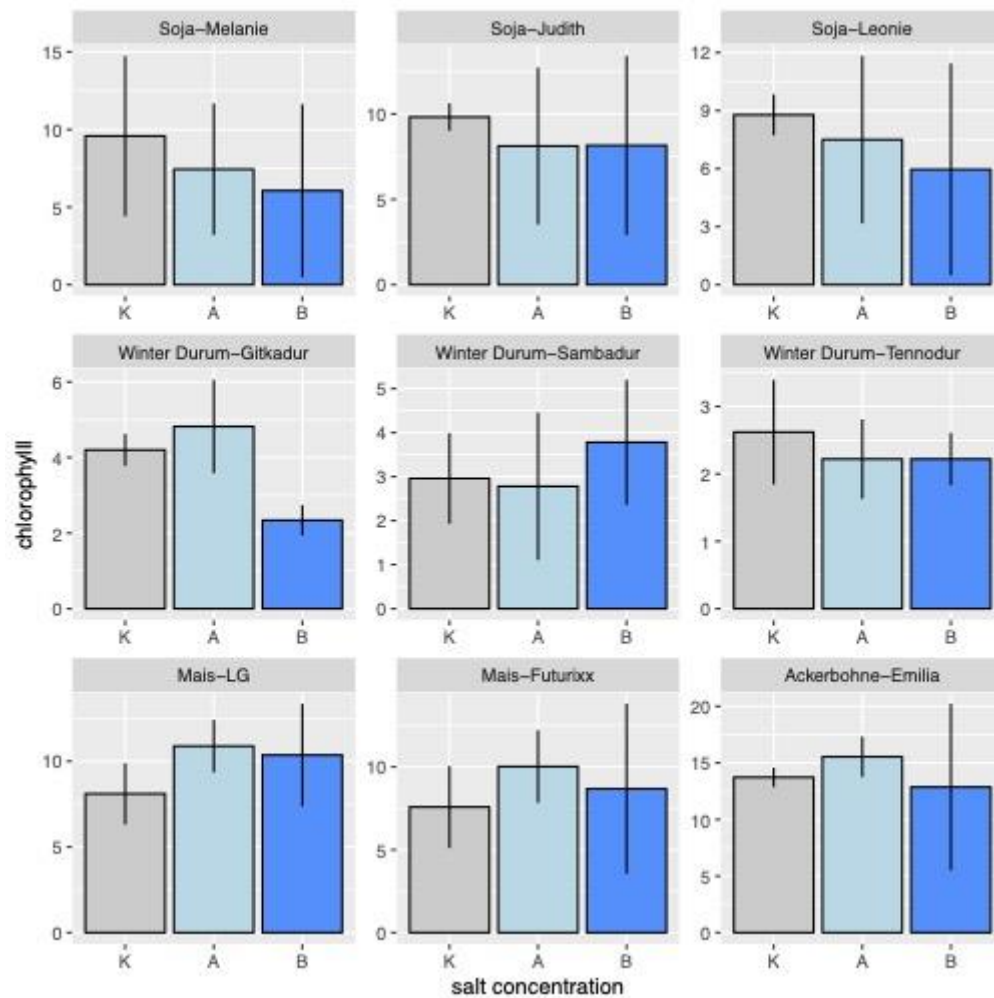


Abbildung 19: Chlorophyllgehalt pro Topf [$\mu\text{mol}/\text{m}^2$], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

Die Sojabohnensorten „Melanie“ und „Leonie“ zeigten eine stetige Abnahme des Chlorophyllgehaltes mit zunehmender Salzkonzentration. Bei „Judith“ betrug der Chlorophyllgehalt in der Kontrollgruppe 9,82 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, sank in der Gruppe A auf 8,12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ und blieb in der Gruppe B mit 8,16 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ nahezu konstant (siehe Abbildung 19 und Tabelle 12).

Bei Winterdurum „Gitkadur“ wurde ein Anstieg des Chlorophyllgehaltes von 4,2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ in der Kontrolle auf 4,82 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ in der Gruppe A und ein starker Abfall auf 2,34 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ in der Gruppe B beobachtet. Bei „Sambadur“ nahm der Chlorophyllgehalt in Gruppe A gegenüber der Kontrolle leicht ab und stieg dann in Gruppe B auf 3,78 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ an. Bei „Tennodur“ hingegen betrug der Chlorophyllgehalt in der Kontrolle 2,62 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, mit einer leichten Abnahme auf 2,22 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ in den Gruppen A und B, was insgesamt nur geringe Unterschiede zwischen den Konzentrationen zeigt (siehe Abbildung 19 und Tabelle 12).

Bei beiden Maissorten war der Chlorophyllgehalt in den Gruppen A und B höher als in der Kontrolle. Bei „LG60179“ betrug der Chlorophyllgehalt in der Kontrolle 8,1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, stieg in der Gruppe A auf 10,88 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ an und fiel in der Gruppe B leicht auf 10,36 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ab (siehe Abbildung 19 und Tabelle 12).

Bei der Ackerbohnenorte „Emilia“ veränderte sich der Chlorophyllgehalt unter den verschiedenen Salzkonzentrationen. Er betrug in der Kontrollgruppe 13,72 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, stieg in der Gruppe A auf 15,54 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ und fiel in der Gruppe B auf 12,86 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ und damit unter den Kontrollwert (siehe Abbildung 19 und Tabelle 12).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	9,58	9,82	8,78	4,2	2,96	2,62
A	7,44	8,12	7,5	4,82	2,78	2,22
B	6,06	8,16	5,96	2,34	3,78	2,22
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	8,1	7,58	13,72			
A	10,88	10,02	15,54			
B	10,36	8,68	12,86			

Tabelle 12: Wertetabelle des Chlorophyllgehalts pro Topf [$\mu\text{mol}/\text{m}^2$], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden

Durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit des lehmigen Bodens im HV 1:

Im ersten Hauptversuch wies der Kontrollboden einen mittleren EC-Wert von 1,42 dS/m auf. Die mit Salzkonzentration A behandelten Böden erreichten einen EC-Wert von 3,96 dS/m, während die mit Konzentration B behandelten Böden einen Wert von 5,78 dS/m aufwiesen.

4.2 Hauptversuch 2 (sandiger Boden)

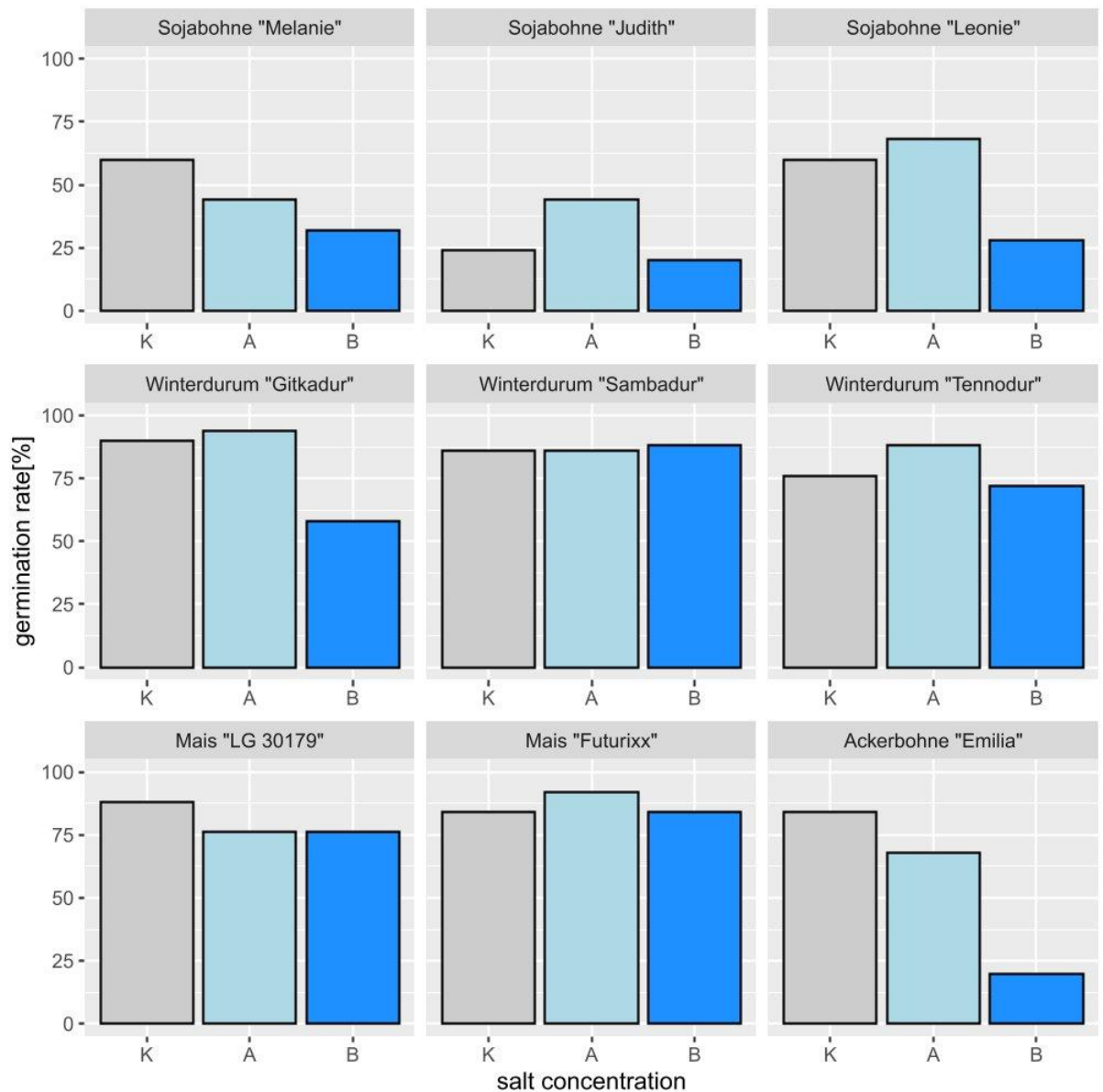


Abbildung 20: Keimrate der gekeimte Samen im Vergleich zu gesäten Samen (10 Stk. bei Durum Sorten und je 5 Stk. bei Sojabohne, Mais und Ackerbohnen Sorten), K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Anzahl der Wiederholungen jeweils 5; Hauptversuch 2 sandiger Boden

Im zweiten Hauptversuch sank die Keimrate der Sojabohne „Melanie“ mit zunehmender Salzkonzentration von 60 % in der Kontrolle über 44 % in Gruppe A auf 32 % in Gruppe B ab. Im Gegensatz dazu stieg bei den Sorten „Judith“ und „Leonie“ die Keimrate in der Gruppe A im Vergleich zur Kontrolle an und fiel dann in der Gruppe B unter den Kontrollwert (siehe Abbildung 20 und Tabelle 13).

Bei den Winterdurumsorten „Gitkadur“ und „Tennodur“ zeigte sich ein ähnliches Muster wie bei den Sojabohnensorten: Die Keimrate stieg in der Gruppe A im Vergleich zur Kontrolle an und fiel in der Gruppe B unter den Kontrollwert. Im Gegensatz dazu blieb die Keimrate der Sorte „Sambadur“ in allen drei Salzkonzentrationsgruppen konstant hoch, mit Werten von 86 % in der Kontrolle und Gruppe A und 88 % in Gruppe B (siehe Abbildung 20 und Tabelle 13).

Bei der Maissorte „LG30179“ lag die Keimrate in der Kontrolle bei 88 % und sank in den Gruppen A und B auf 76 %. Bei der Sorte „Futurixx“ hingegen stieg die Keimrate in der Gruppe A auf 92 % gegenüber 84 % in der Kontrolle und blieb in der Gruppe B gleich wie in der Kontrolle (siehe Abbildung 20 und Tabelle 13).

Bei Ackerbohnen nahm die Keimrate mit steigender Salzkonzentration kontinuierlich ab. Die Kontrolle erreichte 84 %, die Gruppe A 68 % und die Gruppe B 20 % (siehe Abbildung 20 und Tabelle 13).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	60	24	60	90	86	76
A	44	44	68	94	86	88
B	32	20	28	58	88	72
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	88	84	84			
A	76	92	68			
B	76	84	20			

Tabelle 13: Wertetabelle der Keimrate in [%], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

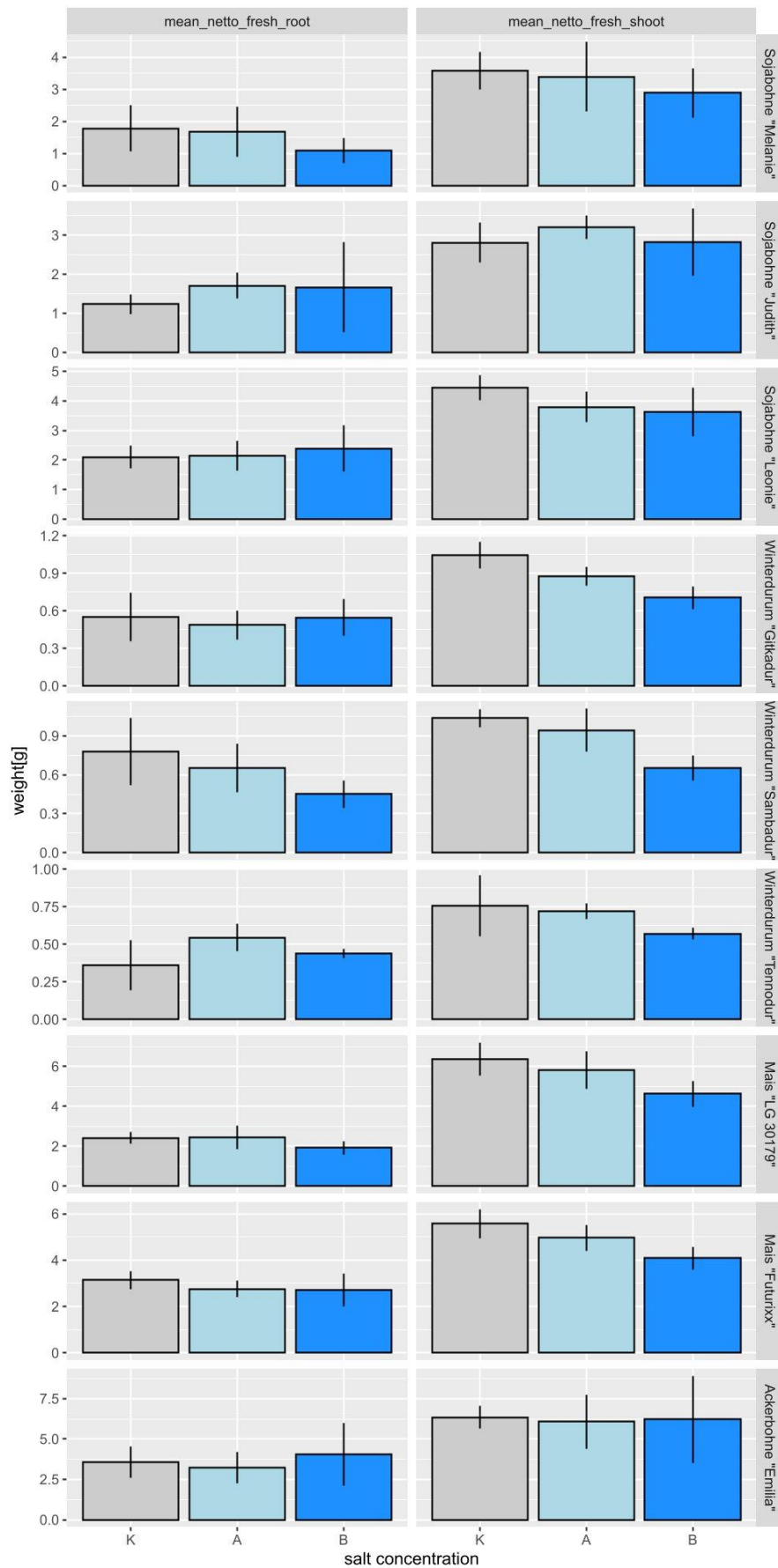


Abbildung 21: Frischgewicht der Wurzeln und der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

Bei der Sojabohne „Melanie“ nahmen sowohl das Frischgewicht der Wurzel als auch das der Sprossachse mit steigender Salzkonzentration kontinuierlich ab. Im Gegensatz dazu nahm das Wurzelgewicht der Sorten „Judith“ und „Leonie“ mit steigender Salzkonzentration zu. Das Sprossachsengewicht nahm in der Gruppe A im Vergleich zur Kontrolle zu und in der Gruppe B wieder ab. Bei der Sorte „Judith“ lag das Gewicht in der Gruppe B noch über dem Kontrollwert, während es bei der Sorte „Leonie“ unter den Kontrollwert fiel (siehe Abbildung 21, Tabelle 14Tabelle 15). Bei den Winterdurumsorten „Gitkadur“ und „Tennodur“ blieb das Frischgewicht der Wurzeln trotz steigender Salzkonzentration relativ stabil. Im Gegensatz dazu zeigte „Sambadur“ deutliche Gewichtsverluste: Das Wurzelgewicht sank von 0,78 g in der Kontrolle auf 0,65 g in der Gruppe A und weiter auf 0,45 g in der Gruppe B. Das Gewicht der Sprossachsen nahm bei allen drei Sorten mit steigender Salzkonzentration ab, am deutlichsten bei „Sambadur“ von 1,04 g in der Kontrolle auf 0,65 g in Gruppe B (siehe Abbildung 21, Tabelle 14Tabelle 15). Bei beiden Maissorten nahm das Wurzelfrischgewicht mit steigender Salzkonzentration leicht ab. Auch die Sprossachsen beider Sorten zeigten eine stetige Gewichtsabnahme. Das Wurzelgewicht der Ackerbohne „Emilia“ variierte von 3,55 g in der Kontrolle auf 3,24 g in der Gruppe A und stieg dann auf 4,05 g in der Gruppe B an. Das Frischgewicht der Sprossachse sank von 6,34 g in der Kontrolle auf 6,06 g in der Gruppe A und stieg leicht auf 6,22 g in der Gruppe B, blieb aber unter dem Ausgangswert der Kontrolle (siehe Abbildung 21, Tabelle 14Tabelle 15).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	1,79	1,23	2,10	0,55	0,78	0,36
A	1,67	1,70	2,14	0,49	0,65	0,55
B	1,10	1,67	2,39	0,55	0,45	0,44
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	2,42	3,13	3,55			
A	2,43	2,76	3,24			
B	1,92	2,71	4,05			

Tabelle 14: Wertetabelle des Frischgewichts der Wurzeln in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	3,58	2,81	4,44	1,05	1,04	0,76
A	3,39	3,20	3,80	0,88	0,94	0,72
B	2,88	2,83	3,63	0,71	0,65	0,57
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	6,38	5,57	6,34			
A	5,82	4,97	6,06			
B	4,63	4,08	6,22			

Tabelle 15: Wertetabelle des Frischgewichts der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

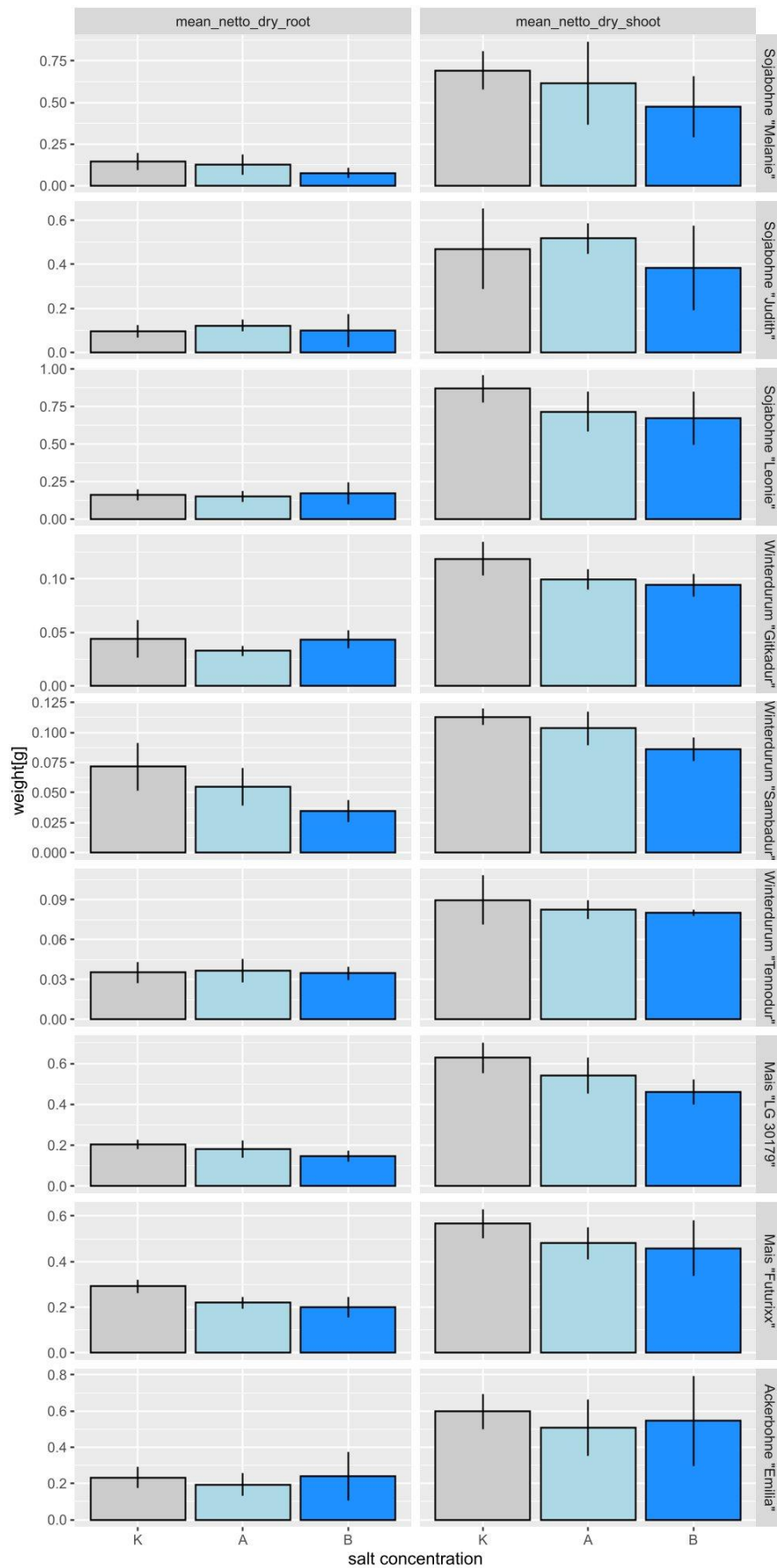


Abbildung 22: Trockengewicht der Wurzeln und der Sprossachse, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

Das Trockengewicht sowohl der Wurzeln als auch der Sprossachse nahm bei der Sojabohnensorte „Melanie“ kontinuierlich ab. Bei „Judith“ stieg das Gewicht in der Gruppe A gegenüber der Kontrolle an, sank aber in der Gruppe B wieder ab, wobei das Sprossgewicht sogar unter das Niveau der Kontrolle fiel. Bei „Leonie“ blieb das Trockengewicht der Wurzeln relativ konstant, das Sprossachsengewicht nahm jedoch mit steigender Salzkonzentration ab: von 0,87 g in der Kontrolle auf 0,72 g in Gruppe A und weiter auf 0,67 g in Gruppe B (siehe Abbildung 22, Tabelle 16Tabelle 17). Bei den Winterdurumsorten nimmt das Trockengewicht der Sprossachsen mit steigender Salzkonzentration kontinuierlich ab. Während bei „Sambadur“ auch das Wurzelgewicht abnahm, blieb es bei „Tennodur“ in allen drei Gruppen relativ konstant. Bei „Gitkadur“ sank das Gewicht von 0,04 g in der Kontrolle auf 0,03 g in der Gruppe A und stieg dann wieder auf 0,04 g in der Gruppe B an (siehe Abbildung 22, Tabelle 16Tabelle 17).

Bei beiden Maissorten wurde mit zunehmender Salzkonzentration eine stetige Abnahme des Trockengewichtes sowohl der Wurzel als auch der Sprossachse beobachtet. Insbesondere bei der Sorte „Futurixx“ nahm das Sprossgewicht von 0,57 g in der Kontrolle auf 0,48 g in der Gruppe A und weiter auf 0,46 g in der Gruppe B ab (siehe Abbildung 22, Tabelle 16Tabelle 17). Das Trockengewicht der Ackerbohne „Emilia“ zeigt einen ähnlichen Verlauf wie das Frischgewicht. In der Gruppe A nahm das Gewicht im Vergleich zur Kontrolle zu, während es in der Gruppe B wieder abnahm (siehe Abbildung 22, Tabelle 16Tabelle 17).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	0,48	0,10	0,16	0,04	0,07	0,04
A	0,13	0,12	0,15	0,03	0,06	0,04
B	0,08	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	0,21	0,29	0,23			
A	0,18	0,22	0,19			
B	0,15	0,20	0,24			

Tabelle 16: Wertetabelle des Trockengewichts der Wurzeln in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	0,69	0,47	0,87	0,12	0,11	0,09
A	0,62	0,52	0,72	0,10	0,10	0,08
B	0,48	0,38	0,67	0,09	0,09	0,08
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	0,63	0,57	0,60			
A	0,54	0,48	0,51			
B	0,46	0,46	0,55			

Tabelle 17: Wertetabelle des Trockengewichts der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

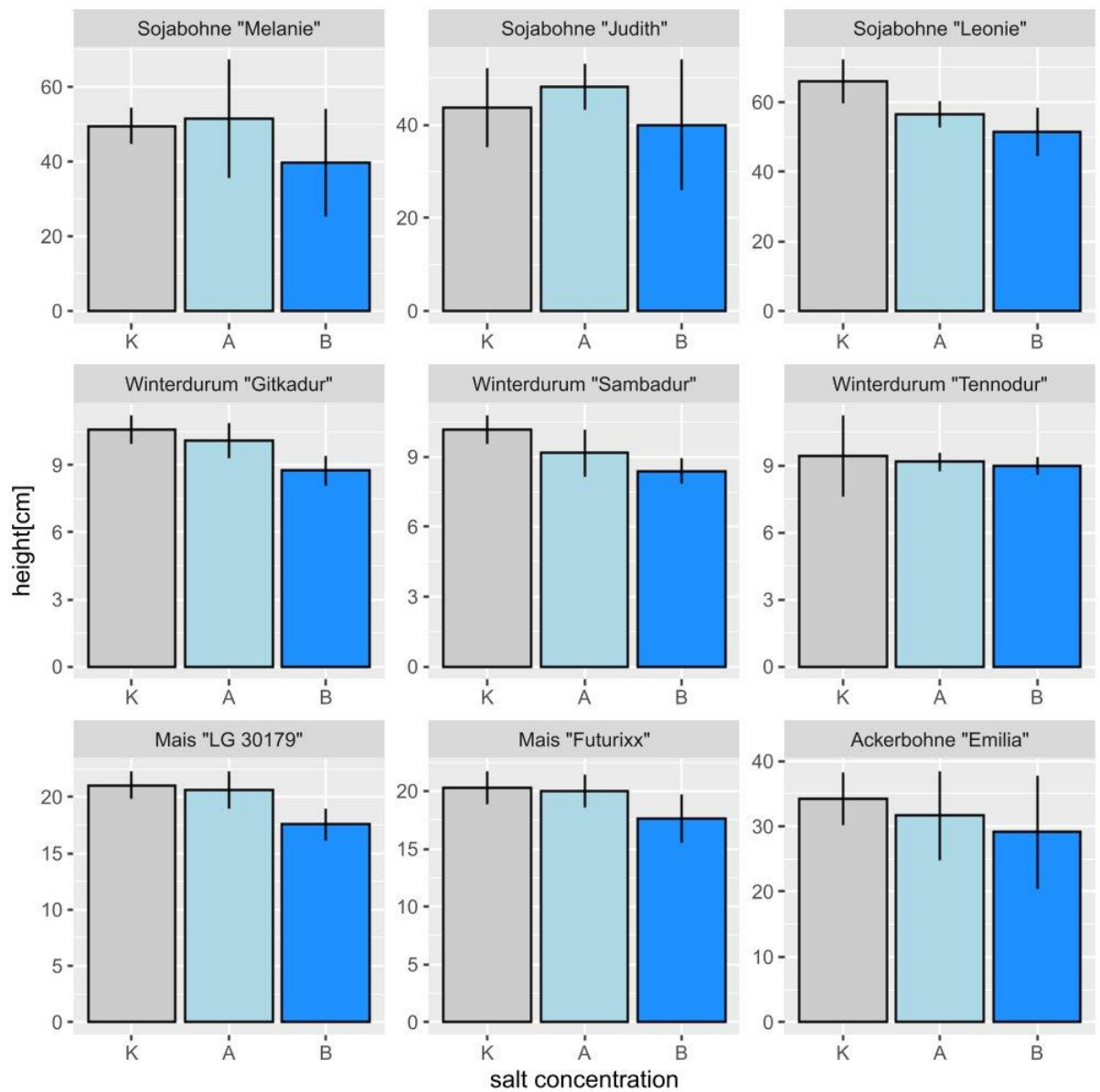


Abbildung 23: Durchschnittliche Höhe der Sprossachse, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

Bei der Sojabohnensorte „Leonie“ nahm die mittlere Höhe der Sprossachse mit steigender Salzkonzentration kontinuierlich ab: von 65,9 cm in der Kontrolle auf 56,6 cm in der Gruppe A und weiter auf 51,4 cm in der Gruppe B. Bei den Sorten „Melanie“ und „Judith“ nahm die Höhe in der Gruppe A im Vergleich zur Kontrolle zu, fiel aber in der Gruppe B unter den Kontrollwert (siehe Abbildung 23 und Tabelle 18).

Bei den Winterdurumsorten „Gitkadur“ und „Sambadur“ war eine stetige Abnahme der Sprossachsenhöhe mit zunehmender Salzkonzentration zu beobachten. Bei „Tennodur“ war diese Tendenz ebenfalls erkennbar, jedoch weniger ausgeprägt: Die Höhe nahm von 10,2 cm in der Kontrolle auf 9,2 cm in Gruppe A und weiter auf 9 cm in Gruppe B ab (siehe Abbildung 23 und Tabelle 18).

Ähnlich wie bei den Winterdurumsorten zeigte sich auch bei den Maissorten eine stetige, wenn auch geringe Abnahme der Sprossachsenhöhe mit steigender Salzkonzentration. Bei der Sorte „LG30179“ verringerte sich die mittlere Höhe von 21,1 cm in der Kontrolle auf 20,6 cm in der Gruppe A und weiter auf 17,6 cm in der Gruppe B (siehe Abbildung 23 und Tabelle 18).

Der Trend einer stetigen Abnahme der Sprossachsenhöhe mit zunehmender Salzkonzentration war auch bei der Ackerbohnenorte „Emilia“ zu beobachten. Die Kontrollpflanzen erreichten eine Höhe von 34,3 cm, in Gruppe A sank die Höhe auf 31,7 cm und in Gruppe B auf 29,1 cm (siehe Abbildung 23 und Tabelle 18).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	49,5	43,8	65,9	10,6	10,2	10,2
A	51,5	48,1	56,6	10,1	9,2	9,2
B	39,8	40	51,4	8,7	8,4	9
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	21,1	20,2	34,3			
A	20,6	20	31,7			
B	17,6	17,6	29,1			

Tabelle 18: Wertetabelle der durchschnittlichen Höhe der Sprossachse in [cm], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

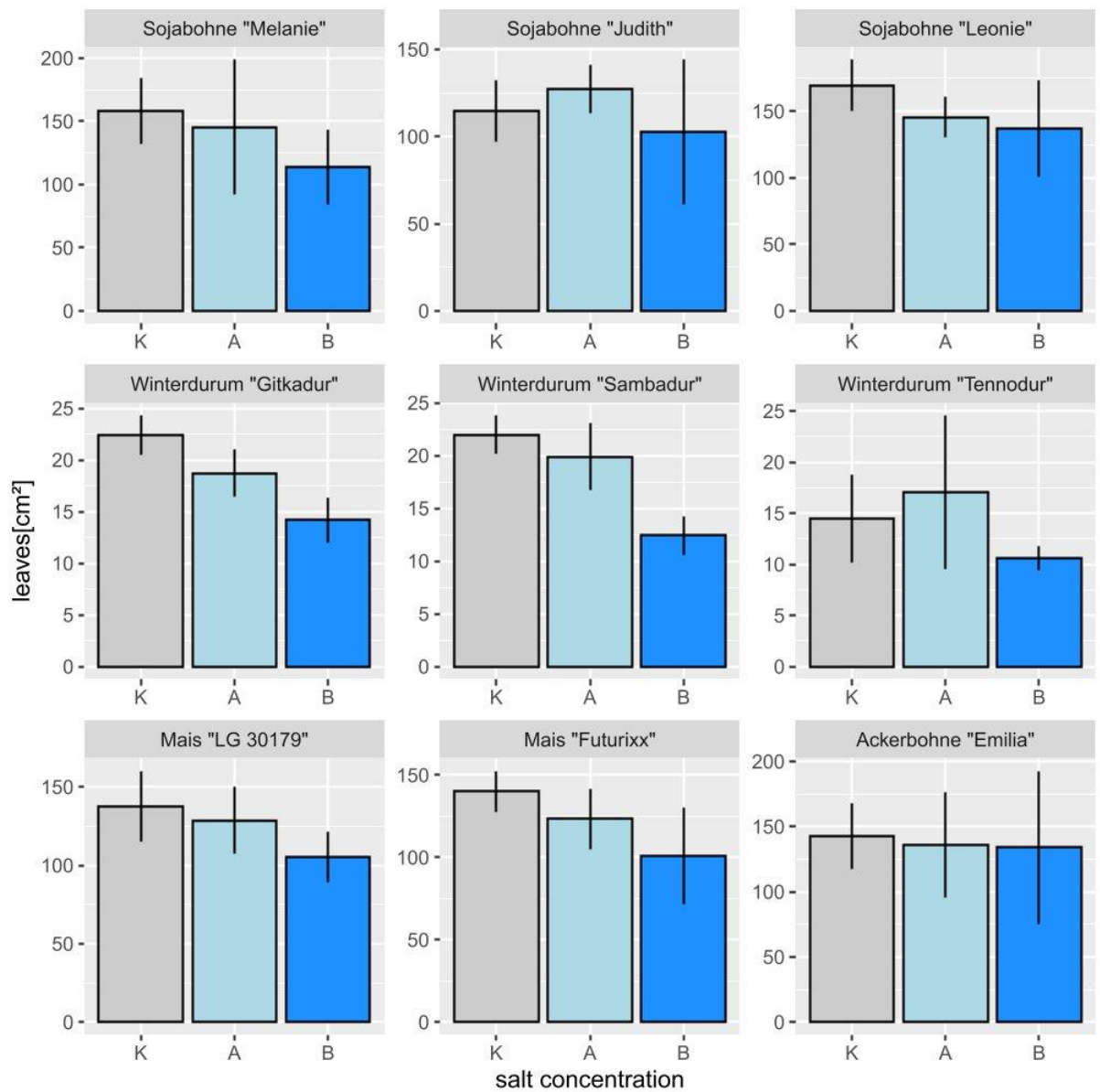


Abbildung 24: Blattfläche pro Topf in [cm²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

Bei den Sojabohnensorten „Leonie“ und „Melanie“ wurde eine Abnahme der Blattfläche mit steigender Salzkonzentration beobachtet. Bei „Melanie“ verringerte sich die Blattfläche von 157,9 cm² in der Kontrolle auf 145,4 cm² in Gruppe A und weiter auf 114 cm² in Gruppe B. Bei „Judith“ hingegen nahm die Blattfläche von 114,7 cm² in der Kontrolle auf 127,3 cm² in Gruppe A zu, fiel aber in Gruppe B auf 102,7 cm² und damit unter den Wert der Kontrollgruppe (siehe Abbildung 24 und Tabelle 19).

Bei den Winterdurumsorten „Gitkadur“ und „Sambadur“ wurde eine Abnahme der Sprossachsenhöhe mit steigender Salzkonzentration festgestellt. Im Gegensatz dazu zeigte „Tennodur“ eine Zunahme der Höhe von 14,5 cm in der Kontrolle auf 17,1 cm in der Gruppe A, fiel aber in der Gruppe B auf 10,6 cm und damit unter den Wert der Kontrolle (siehe Abbildung 24 und Tabelle 19).

Bei den Maissorten, einschließlich der Sorte „Futurixx“, wurde eine stetige Abnahme der Blattoberfläche mit steigender Salzkonzentration beobachtet. Bei „Futurixx“ nahm die Blattfläche von 140 cm² in der Kontrolle auf 123,3 cm² in der Gruppe A und weiter auf 100,8 cm² in der Gruppe B ab (siehe Abbildung 24 und Tabelle 19).

Die Blattfläche der Ackerbohne „Emilia“ zeigte ebenfalls eine Abnahme mit steigender Salzkonzentration. In der Kontrollgruppe betrug die mittlere Blattfläche 142,4 cm², sank in Gruppe A auf 135,9 cm² und nahm in Gruppe B weiter, aber nur geringfügig auf 134,1 cm² ab (siehe Abbildung 24 und Tabelle 19).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	157,9	114,7	169,5	22,4	22	14,5
A	145,4	127,3	145,6	18,7	19,9	17,1
B	114	102,7	136,9	14,2	12,4	10,6
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	137,7	140	142,4			
A	128,7	123,3	135,9			
B	105,7	100,8	134,1			

Tabelle 19: Wertetabelle der Blattfläche pro Topf in [cm²], K_ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

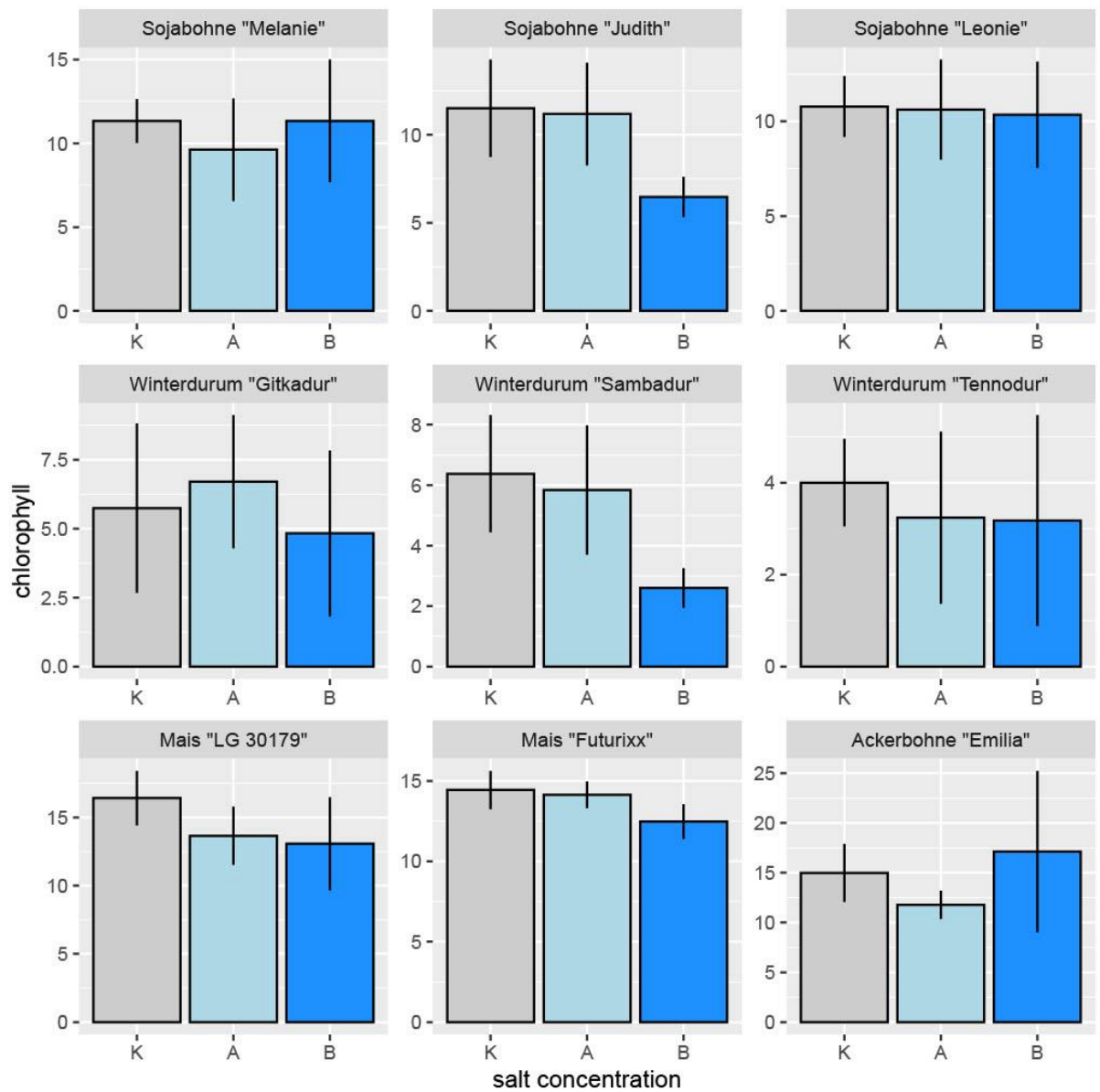


Abbildung 25: Chlorophyllgehalt pro Topf [$\mu\text{mol}/\text{m}^2$], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

Bei der Sojabohne „Leonie“ war der Unterschied im Chlorophyllgehalt sehr gering. Bei der Sorte „Melanie“ sank der Chlorophyllgehalt von 11,34 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ in der Kontrolle auf 9,62 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ in der Gruppe A und stieg in der Gruppe B wieder auf den Ausgangswert von 11,34 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ an. Die Sorte „Judith“ wies in der Kontrolle einen Wert von 11,5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ auf, der in der Gruppe A leicht auf 11,18 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ und in der Gruppe B deutlich auf 6,48 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ sank (siehe Abbildung 25 und Tabelle 20).

Bei der Winterdurumsorte „Gitkadur“ lag der Chlorophyllwert bei 5,74 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, stieg in der Gruppe A auf 6,7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ an und fiel in der Gruppe B auf 4,83 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Bei den beiden anderen Sorten waren die Werte bei höherer Salzkonzentration immer niedriger als bei niedriger Salzkonzentration (siehe Abbildung 25 und Tabelle 20). Die Chlorophyllwerte der Winterdurumsorten „Sambadur“ und „Tennodur“ nahmen mit steigender Salzkonzentration leicht, aber kontinuierlich ab. Bei der Sorte „Futurixx“ betrug der Wert in der Kontrollgruppe 14,44 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, in der Gruppe A 14,14 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ und in der Gruppe B 12,48 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ Chlorophyll (siehe Abbildung 25 und Tabelle 20).

Die Chlorophyllwerte der Ackerbohne „Emilia“ betrugen bei den Kontrollpflanzen 14,98 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. In der Gruppe A war der Wert mit 11,78 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ niedriger, stieg aber in der Gruppe B auf 17,13 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ an und lag damit über dem Wert der Kontrolle (siehe Abbildung 25 und Tabelle 20).

	Sojabohne			Winterdurum		
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur
K	11,34	11,5	10,78	5,74	6,38	4
A	9,62	11,18	10,62	6,7	5,84	3,24
B	11,34	6,48	10,35	4,83	2,6	3,18
	Mais		Ackerbohne			
	LG30179	Futurixx	Emilia			
K	16,42	14,44	14,98			
A	13,66	14,14	11,78			
B	13,08	12,48	17,13			

Tabelle 20: Wertetabelle der Chlorophyllgehalt pro Topf [$\mu\text{mol}/\text{m}^2$], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden

Durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit des sandigen Bodens im HV 2:

Im zweiten Hauptversuch, der auf sandigem Boden durchgeführt wurde, waren die durchschnittlichen elektrischen Leitfähigkeitswerte der Kontrolle und der Konzentration A niedriger als die des lehmigen Versuchsbodens von HV 1, wobei der Kontrollboden einen EC-Wert von 1,05 dS/m erreichte. Der mit der Salzkonzentration A behandelte Boden wies einen Wert von 2,98 dS/m auf, während der mit der Konzentration B behandelte Boden einen höheren EC-Wert von 5,13 dS/m aufwies, der somit über dem Wert lag, der für die gleiche Konzentration im lehmigen Boden ermittelt wurde.

5 Diskussion

Die Literaturquellen (Brod, 1993; Grieve, Grattan, & Maas, 2012; Maas & Grattan, 1999) sowie die Vorversuche bestätigen, dass die im Experiment verwendeten Salzkonzentrationen einen Einfluss auf die ausgewählten Kulturpflanzen hatten. Im Hauptversuch wurde die Wintergerste und der Sommerdurum nicht verwendet, welche als salztolerant gelten (Maas & Grattan, 1999). Dennoch zeigten einige Sommerdurumsorten in den Vorversuchen eine Tendenz zu geringeren Keimraten bei steigenden Salzkonzentrationen. Bei beiden Pflanzenarten wurde in den Vorversuchen bei mehreren Sorten ein Rückgang des Trockengewichts festgestellt. Diese Ergebnisse unterstreichen das Potenzial auch dieser Sorten für weitere Untersuchungen, um landwirtschaftlich relevante Biomasseverluste im Zusammenhang mit Streusalz abschätzen zu können.

Die verwendeten Nutzpflanzen sind in der Literatur hinsichtlich ihrer Salztoleranz unterschiedlich klassifiziert. Winterdurum und Sojabohnen gehören zu den mäßig toleranten Arten, während Mais als mäßig empfindlich und Ackerbohnen als mäßig bis empfindlich eingestuft wurden (siehe Tabelle 21) (Maas & Grattan, 1999). Der Einfluss der Salzempfindlichkeit auf den relativen Ertragsverlust von Nutzpflanzen ist in Abbildung 26 dargestellt, wobei der Zusammenhang zwischen dem relativen Ertragsverlust und dem EC-Wert des Bodens aufgezeigt wird.

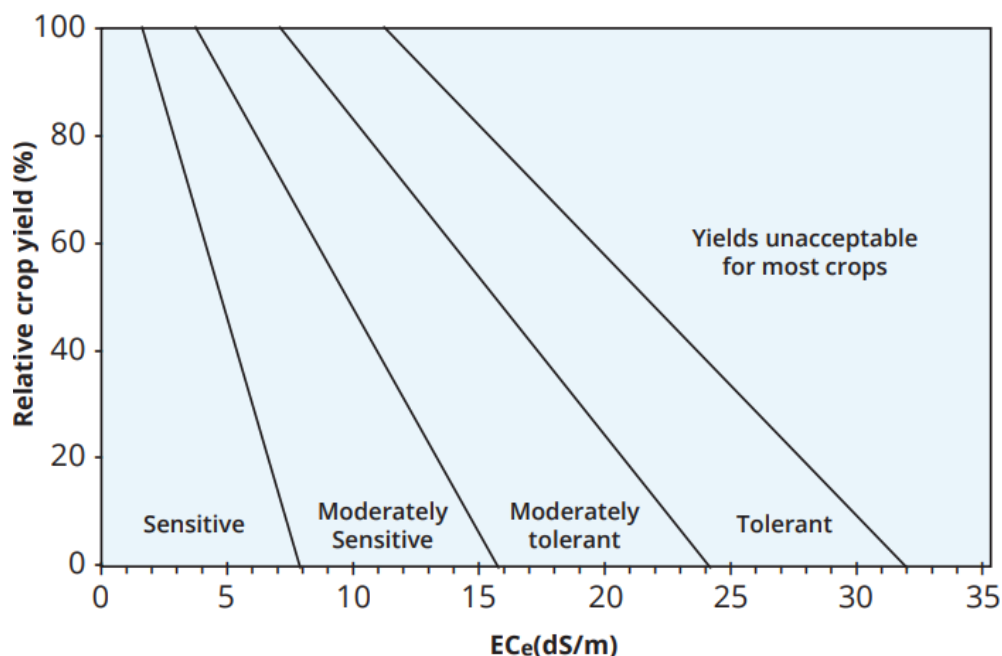


Abbildung 26: EC_e Toleranz, Einteilung der Klassifizierung der Salztoleranz von Nutzpflanzen (Arjen, et al., 2016)

Die elektrische Leitfähigkeit des Bodens wird in der Literatur mit dem relativen Ertrag von Nutzpflanzen in Verbindung gebracht. Die Einteilung der Toleranzbereiche basiert auf verschiedenen Parametern wie Ertrag, Frisch- oder Trockengewicht, wobei die Kriterien je nach Referenz und Untersuchungsmethode variieren (siehe Tabelle 21). Es wird jedoch immer ein Schwellenwert für die elektrische Leitfähigkeit des Bodens $EC_{(e)}$ angegeben, ab dem negative Auswirkungen des Salzgehaltes auf die Pflanzen zu erwarten sind. Abbildung 27 zeigt beispielhaft den relativen Ertrag von Mais in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens. Der Schwellenwert wurde berechnet und mit den erhobenen Daten verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der in dieser Arbeit untersuchte Mais einen Schwellenwert von 3,9 dS/m aufweist und ab diesem der relative Ertrag kontinuierlich abnimmt.

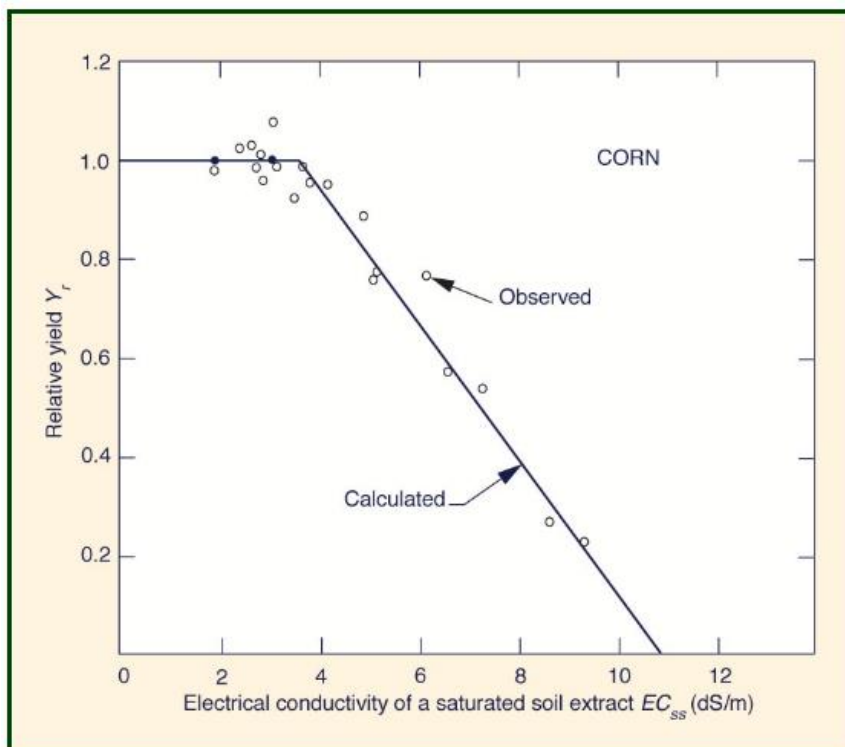


Abbildung 27: Relativer Ertrag von Mais im Vergleich zur elektrischen Leitfähigkeit des Bodens, Schwellenwert 3,9 dS/m, (Ponce, 2024)

Die durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit des Versuchsbodens variierte zwischen 1,05 dS/m für die Kontrollerde und 5,13 dS/m (siehe Tabelle 22) für die höchste Salzkonzentration, was messbare Reaktionen bei empfindlicheren Pflanzen wie Ackerbohnen und möglicherweise auch Mais erwarten ließ. Die Ergebnisse der Vorversuche deuteten jedoch darauf hin, dass auch bei den als toleranter eingestuft Pflanzensorten Veränderungen der Biomasse, der Keimrate und des Längenwachstums beobachtet werden könnten.

Nutzpflanze	Toleranz (Literatur)	Toleranz basierend auf	EC _(e) Schwellenwert [dS/m] (Literatur)	Referenzen
Sojabohne	moderat tolerant	Saatgutertrag	5	Abel & McKenzie (1964) Bernstein et al. (1955)
Durum/ Futterdurum	Tolerant/ moderat tolerant	Getreideertrag/ Trockengewicht	5,9/ 2,1	Francois et al. (1986)
Mais	moderat sensitiv	Frischgewicht	1,7	Bernstein & Ayers (1949) Kaddah & Ghowail (1964)
Ackerbohne	Moderat sensitiv/ sensitiv	Saatgutertrag	1,0	Bernstein & Ayers (1951) Hoffmann & Rawlins (1970)

Tabelle 21: Salztoleranz von krautigen Pflanzen laut Literatur (Maas & Grattan, 1999)

		EC _(e) Kontrolle [dS/m]	EC _(e) Salzkonzentration A [dS/m]	EC _(e) Salzkonzentration B [dS/m]
Hauptversuch lehmiger Boden	1	1,42	3,96	5,78
Hauptversuch sandiger Boden	2	1,05	2,98	5,13

Tabelle 22: Durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden, Hauptversuch 2 sandiger Boden

Auswirkung auf die ausgewählten Nutzpflanzen

Im ersten Hauptversuch wurde bei fast allen Nutzpflanzen eine Abnahme der Keimrate mit steigender Salzkonzentration festgestellt, mit Ausnahme der Maissorte „Futurixx“, bei der die Keimrate in der Gruppe A zunächst leicht anstieg und dann in der Gruppe B signifikant unter den Wert der Kontrolle fiel. Bei der Wintersorte „Sambadur“ blieb die Keimrate in den Gruppen A und B im Vergleich zur Kontrolle nahezu gleich niedrig. Im zweiten Hauptversuch zeigten nur die Sojabohnensorte „Melanie“ und die Ackerbohnenensorte „Emilia“ ähnliche Trends in der Keimrate. Es wird vermutet, dass die Auswirkungen des Salzes auf die strukturelle Integrität des Bodens zurückzuführen sind (siehe 2.2), was zu einer Verdichtung des Bodens führen kann. Diese Bodenverdichtung ist wahrscheinlicher in lehmigen Böden, in denen das Salz aufgrund schlechterer Auswaschung verbleibt, während sandige Böden aufgrund ihrer lockeren Struktur weniger betroffen sind (siehe 2.2) (Walleneder & Tanji, 1996; Maas & Grattan, 1999). In Hauptversuch 2, in dem sandigen Boden verwendet wurde, war der Effekt weniger ausgeprägt,

da dieser Boden lockerer als lehmiger Boden ist. Es ist zu beobachten, dass die Keimrate bei fast allen Sorten bereits bei diesen niedrigen Salzkonzentrationen deutlich niedriger ist als bei der Kontrolle. Dennoch hat die erhöhte Salzkonzentration bodenunabhängig einen osmotischen Druck auf die Pflanzen ausgeübt (siehe 2.3.1).

In den Hauptversuchen wurde festgestellt, dass nur die Sojabohne in HV 1 und die Winterdurum- und Maissorten in HV 2 mit zunehmender Salzkonzentration eine Abnahme des Frischgewichtes aufwiesen. Bei den anderen Nutzpflanzen war dieser Trend nicht erkennbar. Auffällig war, dass in der HV 2 mit sandigem Boden alle Sorten mit Ausnahme der Ackerbohne „Emilia“ und der Sojabohne „Judith“ einen Rückgang im Frischgewicht aufwiesen, wobei der Gewichtsunterschied bei den Sojabohnen im HV 1 weniger ausgeprägt war. Beim Trockengewicht zeigten alle Sorten ähnliche Tendenzen, mit Ausnahme von Winterdurum „Gitkadur“, der mit zunehmender Salzkonzentration bereits einen deutlichen Gewichtsverlust aufwies. Die prozentualen Unterschiede zwischen den Gruppen waren beim Trockengewicht ausgeprägter, wie z. B. bei der Sojabohne „Leonie“ in HV 1, die einen deutlicheren Unterschied als beim Frischgewicht zeigte. Vermutlich ist dieser Umstand auf die Erntemethode zurückzuführen. Um das Substrat effektiv von den Wurzeln zu trennen, wurden die Töpfe in Wasser gestellt, sodass die Erde aufweichen konnte. Diese Maßnahme erleichterte das Lösen der Wurzeln und verminderte den Verlust der anhaftenden Biomasse. Ein variabler Faktor war jedoch die unterschiedlich lange Verweildauer der Töpfe im Wasserbad. Dies führte dazu, dass einige Pflanzen länger im Wasser standen als andere, was wahrscheinlich zu den Gewichtsunterschieden zwischen den Gruppen beitrug und arbeitsbedingt nicht zu vermeiden war.

Beim Trockengewicht im ersten Hauptversuch wiesen insbesondere die Sojabohnensorten „Judith“ und „Melanie“ sowie der Winterdurum „Gitkadur“ einen kontinuierlichen Biomasseverlust bei steigenden Salzkonzentrationen und die Ackerbohne „Emilia“ einen leichten auf. Die anderen Winterdurumsorten und der Mais zeigten dagegen keinen deutlichen Biomasseverlust bei zunehmender Salzbelastung. Im zweiten Hauptversuch hingegen wurde bei den Mais- und Winterdurumsorten ein tendenzieller Biomasseverlust beobachtet, der jedoch geringer ausfiel als bei den Sojabohnen im HV 1.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass einige Pflanzen trotz reduzierter Keimraten aufgrund der Salzkonzentration nicht notwendigerweise eine geringere Biomasse der gekeimten Pflanzen aufwiesen, während dies bei anderen Pflanzen der Fall war. Insbesondere die Bodenbedingungen, beeinflusst durch Faktoren wie den osmotischen Druck (siehe Abschnitt 2.3.1), hatten einen deutlicheren Einfluss auf die Biomasse der Sojabohnen und der

Winterdurumsorte „Gitkadur“ im HV 1 auf lehmigem Boden. Im Gegensatz dazu zeigten im HV 2 auf sandigem Boden alle Sorten mit Ausnahme der Sojabohne „Leonie“ und der Ackerbohne „Emilia“ eine Reaktion auf die Salzkonzentration, wobei die Unterschiede in der Biomasse deutlich weniger ausgeprägt waren.

Das Längenwachstum der Sprossachse und die Größe der Blattfläche korrelierten bei fast allen untersuchten Nutzpflanzen mit der Biomasse. Das bedeutet, dass Pflanzen mit geringerer Biomasse tendenziell auch kürzere Sprossachsen und kleinere Blattflächen aufwiesen. Eine Ausnahme bildeten die Blattflächen der Winterdurumsorten „Gitkadur“ und „Tennodur“ im ersten Hauptversuch (HV1), wobei „Tennodur“ eine Zunahme der Blattfläche mit steigender Salzkonzentration zeigte. Bei „Gitkadur“ war die Blattfläche in der Salzkonzentrationsgruppe A sogar größer als in der Kontrollgruppe. Ähnliche Beobachtungen wurden im zweiten Hauptversuch (HV2) gemacht, wo die Blattfläche der Pflanzen in der Salzkonzentrationsgruppe A ähnliche Tendenzen aufwies wie bei „Gitkadur“ im HV1.

Es wird deutlich, dass sich der Biomasseverlust der Sprossachse gleichermaßen auf das Längenwachstum der Pflanze und auf die Größe der Blattfläche auswirkt. Das bedeutet, dass der Einfluss des Biomasseverlustes auf die beiden Parameter Sprossachsenwachstum und Blattflächenentwicklung gleichmäßig verteilt ist, ohne dass einer der beiden Aspekte stärker betroffen ist als der andere. Die Stresswirkung beschränkt sich hier auf das von Anfang an im Boden vorhandene Salz. Da während der Wachstumsphase kein neuer Salzeintrag erfolgt, werden die vorhandenen Pflanzenteile nicht direkt durch das Salz geschädigt. Dies ist anders als bei mehrjährigen Pflanzen, bei denen es zum Beispiel zu Blattnekrosen durch anhaltende Salzbelastung kommen kann (Brod, 1993; Däumling, 2012).

Im ersten Hauptversuch wurde bei den Sojasorten „Melanie“ und „Leonie“ sowie bei der Winterdurumsorte „Tennodur“ eine geringe Abnahme des Chlorophyllgehaltes mit steigender Salzkonzentration beobachtet. Im zweiten Hauptversuch wurde diese Reaktion neben „Tennodur“ auch bei der Winterdurumsorte „Sambadur“ und den beiden Maissorten beobachtet, die eine leichte Abnahme des Chlorophyllgehaltes zeigten. Diese Veränderungen stimmen nicht mit dem Verlust an Blattfläche überein. Aufgrund der großen Variabilität und der geringen Unterschiede der Messergebnisse kann jedoch keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, ob es sich bei der Abnahme des Chlorophyllgehaltes tatsächlich um einen konsistenten Effekt handelt. Somit ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Chlorophyllgehalt und erhöhter Salzkonzentration im Boden erkennbar. Hier wären weitere Versuche notwendig, um mögliche Effekte genauer zu bestimmen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die ausgewählten Nutzpflanzen auf die erhöhte Salzkonzentration reagierten, und zwar auch solche, die laut Literatur bei dieser geringen Salzkonzentration keine Effekte zeigen sollten (Grieve, Grattan, & Maas, 2012; Maas & Grattan, 1999). Es ist jedoch zu beachten, dass die Salzempfindlichkeit in der Literatur immer als relativer Ertrag, Saatgutertrag, Frischgewicht oder Spross-Trockengewicht angegeben wird und die Pflanzen in diesen Versuchen nicht bis zur Erntereife herangewachsen sind. Die hier beobachteten Effekte gelten daher nur für die ersten Wachstumsstadien und geben keine Kenntnisse über mögliche Veränderungen bei einer längeren Wachstumsperiode.

In der Studie von Ayers und Hayward (1949) wurde das Frühstadium von Nutzpflanzen wie Luzerne, Zuckerrübe, Gerste, Mais und Bohnen untersucht. Dabei konzentrierten sie sich ausschließlich auf die Keimungsrate, ohne weitere Parameter zu erheben. Im Gegensatz dazu untersuchten Zhao, Ma und Ren (2007) die frühe Wachstumsphase verschiedener Hafersorten und berücksichtigten neben der Keimrate auch das Wachstum, den Gasaustausch, die Chlorophyllfluoreszenz und den Ionengehalt. Sie konnten eine stetige Abnahme der Keimrate sowie eine Abnahme der Blattfläche mit steigender Salzkonzentration nachweisen. Diese Untersuchung ist jedoch nur bedingt mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar, da das Salz erst nach 14 Tagen in die Versuchsgefäße gegeben wurde, während in dieser Arbeit die Salzbelastung von Anfang an gegeben war. Für genauere Untersuchungen müssten weitere Versuche auch mit längeren Zeiträumen sowie Feldversuche durchgeführt werden. Eindeutig und auch durch eine längere Vegetationsperiode nicht umkehrbar ist jedoch der Rückgang der Keimrate. Dieser war im ersten Hauptversuch deutlich ausgeprägter als im Zweiten. Der Grund dafür könnte der lehmige Boden sein. Dieser sorgt dafür, dass das Salz eine geringere Transportkapazität hat als in sandigen Böden (Scheffer, et al., 2018; Walleneder & Tanji, 1996) und somit schlechter ausgewaschen werden kann. In der Realität in Österreich befinden sich die meisten Felder auf eher lehmigen Böden und somit ist der erste Hauptversuch realitätsnäher als der zweite. Es muss auch berücksichtigt werden, dass in den Versuchen keine Bewässerung von oben erfolgte, wodurch die Bedingungen weniger realistisch sind als unter Feldbedingungen, wo regelmäßige Niederschläge die Salzkonzentration im Boden auf natürliche Weise verdünnen würden.

Salzeintrag

Die in den Versuchen simulierte Salzbelastung stellt einen einmaligen Eintrag dar, der der Salzmenge entspricht, die während einer Wintersaison durch Streusalz anfällt. Dieser Wert wurde anhand von Daten über Streumengen und -verluste ermittelt. Aus der Literatur ist bekannt, dass etwa 10 % des ausgebrachten Streusalzes in den ersten 10 m neben der Fahrbahn anfällt (Brod, 1995; Leonardi, 1985). In einer anderen Studie wurden jedoch durchschnittliche

Streusalzverluste von 30% ermittelt (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011). Für die Berechnung der Salzkonzentration wurden Streudaten der Asfinag und ein angenommener Streuverlust von 10 % verwendet, was eine eher moderate Salzmenge darstellt (Lindner, Vollhofer, Atanasoff-Kardjalieff, Stundner, & Wolfram, 2019).

Die in den Versuchen ermittelten Salzkonzentrationen wurden durch Bodenmessdaten für Chlorid und Natrium bestätigt. Dabei lagen die realen Bodenwerte zum Teil deutlich über den in den Versuchen angesetzten Werten von 0,782 g/kg für die Konzentration A und 1,564 g/kg für die Konzentration B. Die gemessenen Werte lagen zwischen 2,36 g/kg und 2,64 g/kg und erreichten stellenweise sogar 10,88 g/kg bzw. 12,86 g/kg NaCl (Brod, 1993). Dies unterstreicht, dass die tatsächlichen Veränderungen im Boden durch Streusalz noch gravierender sein könnten. Zwar wird das Salz durch regelmäßige Niederschläge teilweise ausgewaschen, aber durch die winterliche Streuung kommt es zu einem kontinuierlichen Neueintrag. Besonders betroffen sind die ersten 10 m neben Straßen, die auch an Äcker grenzen können, mit deutlichen Auswirkungen auf Nutzpflanzen (siehe 2.2.1) (Brod, 1995; Däumling, 2012; Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011; Leonardi, 1985).

Diese Arbeit hat gezeigt, dass bereits geringe Salzeinträge negative Auswirkungen auf die untersuchten Nutzpflanzen haben. Sie repräsentiert jedoch nicht vollständig die tatsächlichen Auswirkungen von Auftausalz unter Freilandbedingungen. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, könnte der Versuch mit einer kleineren Auswahl an Pflanzenarten und einer höheren Wiederholungsrate wiederholt werden. Außerdem wäre es sinnvoll, den Versuch mit bereits vorbelastetem Boden zu wiederholen, um realistischere Bedingungen zu schaffen. Schließlich wäre es empfehlenswert, einen Freilandversuch auf Feldern neben Straßen durchzuführen, die regelmäßig einer Salzbelastung ausgesetzt sind. Dadurch könnten die Ergebnisse aus dem Gewächshaus mit denen aus dem Freiland verglichen und fundiertere Schlussfolgerungen gezogen werden.

6 Conclusio

Die Arbeit zeigt, dass aus Literaturdaten abgeleitete realistische Mengen von Streusalz im Boden signifikante Auswirkungen auf die Keimrate und frühe Wachstumsphase von Kulturpflanzen haben können. Die Ergebnisse sind insbesondere für Felder in der Nähe von Straßen, auf denen regelmäßig Salz gestreut wird, relevant. Die Keimraten und die frühe Biomasseproduktion der Pflanzen können durch den Salzeintrag beeinträchtigt werden, was nicht nur von der Salztoleranz der einzelnen Pflanzenarten, sondern auch von den spezifischen Standortbedingungen abhängt. Besonders betroffen sind die ersten 10 m neben der Straße, wo

das meiste Salz in den Boden gelangt. Schutzmaßnahmen wie Seitenstreifen, Drainagen und Lärmschutzwände können die negativen Auswirkungen des Salzeintrags jedoch mindern. Die Gefahr der Bodenversalzung ist vor allem auf Autobahnen und Landstraßen gegeben, wobei die Geländeneigung und auch andere Faktoren eine Rolle spielen. Durch die tatsächlichen Streusalzverluste (zwischen 10 % und 30 %) gelangt eine erhebliche Menge Streusalz in die umliegenden Böden, vermutlich im größeren Umfang als in diesen Versuch simuliert.

7 Literaturverzeichnis

- Abel, G. H., & McKenzie, A. J. (1964). Salt tolerance of soybean varieties (*Glycine max* L. Merrill) during germination and later growth. *Crop Sci.* 4, 157-161.
- Albert, R., & Frühwirth, E. (1987). *Schadstoffbelastung entlang von Autobahnen. Blei-, Cadmium- und Streusalzkontamination von Böden und Pflanzen im Nahbereich der Autobahn.* Wien: Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheit.
- Arjen, d. V., Bas, B., Gerrit, v. S., Roland, O., Jelte, R., & Peter, v. B. (2016). *Crop salt tolerance, under controlled field conditions in The Netherlands, based on trials conducted by Salt Farm Texel.* Salt Farm Texel.
- ASPB Plant Science today, insights and perspectives on plant science. (26. April 2024). Von <https://blog.aspb.org/from-chemistry-to-current-events-the-six-macronutrients-that-make-up-a-plant-n-p-k-mg-s-ca/> abgerufen
- Ayers, A. D., & Hayward, H. E. (1949). *A method for measuring the effects of soil salinity on seed germination with observations on several crop plants.*
- Bergmann, W. (1993). *Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen: Entstehung, visuelle und analytische Diagnose ; 128 Tabellen.* Jena: Fischer.
- Bernstein, L., & Ayers, A. D. (1949). *Salt tolerance of sweet corn.* Riverside: US Salinity Lab.
- Bernstein, L., Ayers, A. D., & Wadleigh, C. H. (1951). The salt tolerance of white rose potatoes. *Am. Soc. Hot. Sci.* 57, 231-236.
- Bernstein, L., J., M. A., & Krantz, B. A. (1955). *Salt tolerance of field crops - soybeans.* Riverside, CA: US Salinity Lab.
- Blomqvist, G. (1998). *Impact of De-icing Salt on Roadside Vegetation. A Literature Review.* Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute.
- Blomqvist, G., & Johansson, E.-L. (1999). *Airborne spreading and deposition of de-icing salt. A case study.* Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute.
- Boller, M., & Andri, B. (2011/2016). *Eawag: Häufig gestellte Fragen zur Strassensalzung.* Dübendorf: Eawag: Das Wassergorshungsinstitut des ETH-Bereichs.
- Brod, H.-G. (1993). *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V2: Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt.* Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Brod, H.-G. (1995). *Risiko-Abschätzung für den Einsatz von Tausalzen, Folgen für die Umweltmedien unter Berücksichtigung neuester Tendenzen.* Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissensschaft GmbH.
- Däumling, T. (2012). *Streusalzmonitoring 2007-2011 Bericht.* Hamburg: Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU).
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral Nurition of Plants: Principles and Perspectives.* Sunderland, MA USA: Sinauer Associates.
- Feige, W., Gruhm, M., Baumgärtner, S., & Herbert, J. (1985). *Untersuchungen über Bodenveränderungen im Böschungsbereich der Triesdorfer Linden- und Platanenallee*

(alte B 13) infolge langjähriger Streusalzanwendung. Triesdorf: Fachhochschule Weihenstephan, Lehrgebiet Boden und Pflanzenernährung für den Bezirk Mittelfranken.

Francois, L. E., Maas, E. V., Donovan, T. J., & Youngs, V. L. (1986). Effect of salinity on grain yield and quality, vegetative growth, and germination of semi-dwarf and durum wheat. *Argon. J.* 78, 1053-1058.

Graf, K. (2018). *Umweltverträglichkeitsprüfung Teilgutachten Nr.:05a*. Guntramsdorf: Technisches Büro für Landschaftsplanung.

Grattan, S. R. (February 2016). Drought Tip; Water Quality Guidelines for Vegetable and Row Crops. *University of California Agriculture and Natural Resources; ANR Publication 8558*.

Grieve, C. M., Grattan, S. R., & Maas, E. V. (2012). Plant salt tolerance. *Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition)*, 405-459.

Hoffmann, G. J., & Rawlins, S. L. (1970). Design and performance of sunlit climamte chambers. *Trans. ASAE* 13, 656-660.

Hoffmann, G., W., S., & Trenkle, A. (1989). *Schadstoffbelastung von Böden durch den Kraftfahrzeugverkehr*. Stuttgart: Ulmer Verlag.

Hoffmann, M., Blab, R., & Nutz, P. (2011). *Forschungsbericht. Optimierung der Feuchtsalzstreuung*. Wien: TU Wien- Institut für Verkehrswissenschaften.

Kaddah, M. T., & S., G. (1964). Salinity effects on the growth of corn at different stages of development. *Agron. J.* 56, 214 - 217.

Kargas, G., Chatzigiakoumis, I., Kollias, A., Spiliotis, D., Massas, I., & Kerkides, P. (2018). Soil Salinity Assessment Using Saturated Paste and Mass Soil:Water 1:1 and 1:5 Ratios Extracts. *Water MDPI*.

Larcher, W. (1980). *Ökologie der Pflanzen*. Stuttgart: Eugen Ulmer.

Leonardi, S. (1985). *Streusalz = Seine Verfrachtung durch die Verkehrsgischt, sowie seine Auswirkungen auf die Vitalitaet und Physiologie von Gehoelzpflanzen*. Universität Basel: Dissertation.

Lewandowski, J., Leitschuh, S., & Koß, V. (1997). *Schadstoffe im Boden: Eine Einführung in Analytik und Bewertung - mit Versuchanleitung-*. Berlin: Springerverlag.

Lindner, B., Vollhofer, O., Atanasoff-Kardjalieff, K., Stundner, W., & Wolfram, G. (2019). *Leitfaden. Einleitung chloridbelasteter Straßenwässer in Fließgewässer*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

Maas, E., & Grattan, S. (1999). *Crop Yields as Affected by Salinity*. In: *Agricultural Drainage*. Madison Wisc.: Agronomy Monograph Nr.38.

macmillan learning. (26. April 2024). Von https://www.macmillanhighered.com/BrainHoney/Resource/6716/digital_first_content/trunk/test/hillis2e/hillis2e_ch25_4.html abgerufen

Markl, J., Sadava, D., Hillis, D., Heller, H. C., & Hacker, S. (2019). *Transport in Pflanzen*. In: Markl J. (eds) *Purves Biologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. USA: Elsevier Ltd.
- Peer, T., & Podlesak, K. (1991). *Auswirkungen von chloridhaltigen Auftaumitteln auf Wasser und Boden im Bereich von Autobahnen und Schnellstraßen*. Österreichische Wasserwirtschaft .
- Ponce, V. M. (26. Mai 2024). *ponce.sdsu.edu*. Von https://ponce.sdsu.edu/estimation_of_the_leaching_fraction_in_irrigated_agriculture.html abgerufen
- Quack, D., Möller, M., & Gartiser, S. (2004). *Kommunaler Winterdienst - von der ökologischen Seite betrachtet*.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., . . . Wilke, B.-M. (2018). *Lehrbuch der Bodenkunde*. 17., überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Verlag.
- Schmidt, S., Raven, J. A., & Paungfoo-Lonhienne, C. (2013). The mixotrophic nature of photosynthetic plants. *Functional Plant Biology*, 425-438.
- Slavich, P., & Lugg, G. (January 1993). Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1:5 soil:water suspensions and texture. *Australian Journal of Soil Research* , S. 73-81.
- (2016). *Standardherstellung für die Überprüfung der Leitfähigkeit*. Tulln: Austrian Institute of Technology.
- Standards, A. (2007). *Önorm L 1099, Chemische Bodenuntersuchung - Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit*. Wien: Austrian Standards International.
- Statistik Austria. (22. Februar 2022). Von <https://www.statistik.at/statistiken/land-und-forstwirtschaft/pflanzenbau/ackerbau-dauergruenland> abgerufen
- Sticher, H. (1993). *Allegemeine Bodenkunde (Skript)*. Zürich: Institut für Terrestrische Ökologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. Sinauer Associates.
- Tegethof, U. (1998). *Straßenseitige Belastung des Grundwassers. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bergisch Gladbach: Verkehrstechnik Heft V60 bast.
- Turner, N. C., & Passioura, J. B. (1986). *Plant Growth, Drought and Salinity*. Melbourne: Csiro.
- Walleneder, W., & Tanji, K. (1996). *Agricultural salinity assesement and management*. Jodhpur (India): United Book Prints.
- Wanner, G. (2010). *Mikroskopisch-botanisches Praktikum*. Stuttgart New York: Georg Thieme Verlag KG.
- Wentzel, K. F. (1973). Salzstaub- und Salzspritzwasserschäden an Straßenränder. *Forst- und Holzwirt*, 28, S. 445-449.
- Wresowar, M., & Sieghardt, M. (2000). *Studie über die Auswirkung von stickstoffhaltiger Auftaumittel. Auswirkungen auf Boden und Bewuchs. Vergleich mit herkömmlichen Auftaumittel*. Wien: Universität BOKU .

- Zhao, G. Q., Ma, B. L., & Ren, C. Z. (2007). Growth, gas exchange, chlorophyll fluorescence, and ion content of naked oat in response to salinity. *Crop science*, 47(1), 123-131.
- Zorn, W., Marks, G., Heß, H., & Bergmann, W. (2016). *Handbuch zur visuellen Diagnose von Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen*. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- Zuber, R. (1979). *Versuch Winterdienst ohne Taumittel*. Baudirektion des Kantons Zürich, Tiefbauamt. Zürich: Eigenverlag des Kantons Zürich.
- Zuber, R. (2013). *Streusalz: Auswirkungen auf die Stadtbäume und Gegenmaßnahmen*. Chur: Vereinigung Schweizerischer Stadtgärtnerinnen und Gartenbauämter (VSSG).

7.1 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis:

Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung der Rhizosphäre (Epstein & Bloom, 2005).....	6
Abbildung 2: Streusalzverbleib in der Rollspur nach dem Anfangsstreuverlust (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011)	9
Abbildung 3: Nährstoffaufnahme, -assimilation und -verwertung (ASPB Plant Science today, insights and perspectives on plant science, 2024).....	12
Abbildung 4: Stoffweg in das Wurzelsystem (macmillan learning, 2024).....	13
Abbildung 5: Feldfruchtproduktion in Österreich 1975 bis 2021, Grafik basierend auf Daten der Statistik Austria (Statistik Austria, 2022).....	15
Abbildung 6: Sand, Schluff und Ton Anteil (in %) in den lehmigen und sandigen Versuchsböden	17
Abbildung 7: pH-Wert der lehmigen und sandigen Versuchsböden.....	17
Abbildung 8: Nährstoffanteil von Phosphor, Kalium, Eisen, Mangan, Kupfer und Zink in lehmigen und sandigen Versuchsböden	17
Abbildung 9: C/N Verhältnis in lehmigen und sandigen Versuchsböden	18
Abbildung 10: TOC, Humus und Stickstoffanteil (in %) in den lehmigen und sandigen Versuchsböden.....	18
Abbildung 11: Calcium und Kationenaustauschkapazität cmolc/kg in den lehmigen und sandigen Versuchsböden	18
Abbildung 12: Neu-Kalibration EC Messgerät	21
Abbildung 13: li -Petrishalen im Glashaus; re - Pflanzen bei Ernte und Messung.....	23
Abbildung 14: Keimrate der gekeimten Samen im Vergleich zu gesäten Samen (10 Stk. bei Durum Sorten und je 5 Stk bei Sojabohne, Mais und Ackerbohnen Sorten), K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Anzahl der Wiederholungen jeweils 5; Hauptversuch 1 lehmiger Boden.....	27
Abbildung 15: Frischgewicht der Wurzeln und der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	29
Abbildung 16: Trockengewicht der Wurzeln und der Sprossachse, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	31
Abbildung 17: Durchschnittliche Höhe der Sprossachsen, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	33

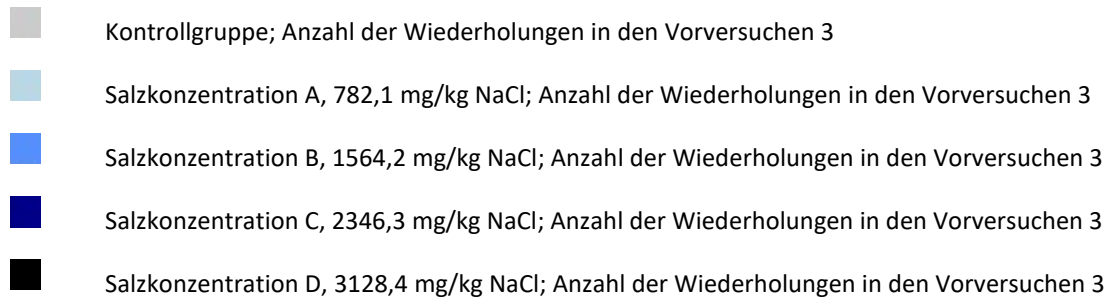
Abbildung 18: Blattfläche pro Topf in [cm ²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	35
Abbildung 19: Chlorophyllgehalt pro Topf [μmol/m ²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	37
Abbildung 20: Keimrate der gekeimte Samen im Vergleich zu gesäten Samen (10 Stk. bei Durum Sorten und je 5 Stk bei Sojabohne, Mais und Ackerbohnen Sorten), K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Anzahl der Wiederholungen jeweils 5; Hauptversuch 2 sandiger Boden	39
Abbildung 21: Frischgewicht der Wurzeln und der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	41
Abbildung 22: Trockengewicht der Wurzeln und der Sprossachse, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	43
Abbildung 23: Durchschnittliche Höhe der Sprossachse, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	45
Abbildung 24: Blattfläche pro Topf in [cm ²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	47
Abbildung 25: Chlorophyllgehalt pro Topf [μmol/m ²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	49
Abbildung 26: ECe Toleranz, Einteilung der Klassifizierung der Salztoleranz von Nutzpflanzen (Arjen, et al., 2016)	51
Abbildung 27: Relativer Ertrag von Mais im Vergleich zur elektrischen Leitfähigkeit des Bodens, Schwellenwert 3,9 dS/m, (Ponce, 2024)	52

Tabelle 1: „Jährlicher Salzverbrauch in 1.000 Tonnen für den Winterdienst in Österreich. Quelle: FSV-Ausschuss Winterdienst 2011“ (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011)	10
Tabelle 2: Verwendete Feldfrüchte und Sorten für die Vorversuche	16
Tabelle 3: Verwendete Feldfrüchte und Sorten für die Hauptversuche	16
Tabelle 4: Standardherstellung für die Überprüfung der Leitfähigkeit (Standardherstellung für die Überprüfung der Leitfähigkeit, 2016)	21
Tabelle 5: Wertetabelle der Keimrate in [%], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	28
Tabelle 6: Wertetabelle des Frischgewichts der Wurzeln in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	30
Tabelle 7: Wertetabelle des Frischgewichts der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	30
Tabelle 8: Wertetabelle des Trockengewichts der Wurzeln in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	32

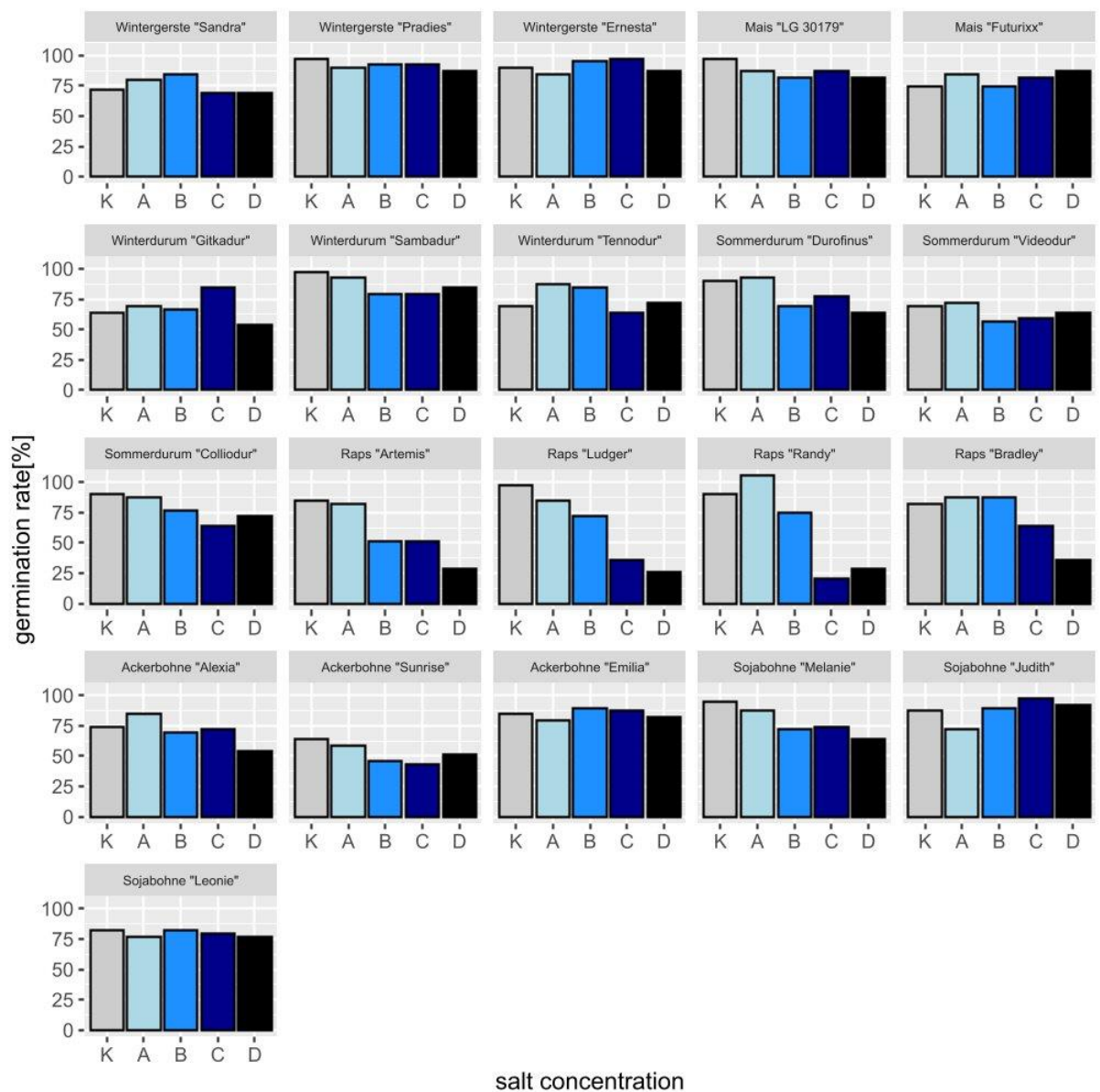
Tabelle 9: Wertetabelle des Trockengewichts der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	32
Tabelle 10: Wertetabelle der durchschnittlichen Höhe der Sprossachsen in [cm], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	34
Tabelle 11: Wertetabelle der Blattfläche pro Topf in [cm ²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	36
Tabelle 12: Wertetabelle des Chlorophyllgehalts pro Topf [μmol/m ²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden	38
Tabelle 13: Wertetabelle der Keimrate in [%], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	40
Tabelle 14: Wertetabelle des Frischgewichts der Wurzeln in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	42
Tabelle 15: Wertetabelle des Frischgewichts der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	42
Tabelle 16: Wertetabelle des Trockengewichts der Wurzeln in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	44
Tabelle 17: Wertetabelle des Trockengewichts der Sprossachse in [g], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	44
Tabelle 18: Wertetabelle der durchschnittlichen Höhe der Sprossachse in [cm], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	46
Tabelle 19: Wertetabelle der Blattfläche pro Topf in [cm ²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	48
Tabelle 20: Wertetabelle der Chlorophyllgehalt pro Topf [μmol/m ²], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 2 sandiger Boden	50
Tabelle 21: Salztoleranz von krautigen Pflanzen laut Literatur (Maas & Grattan, 1999).....	53
Tabelle 22: Durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit, K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden, Hauptversuch 2 sandiger Boden	53

7.2 Anhang:

Legende:

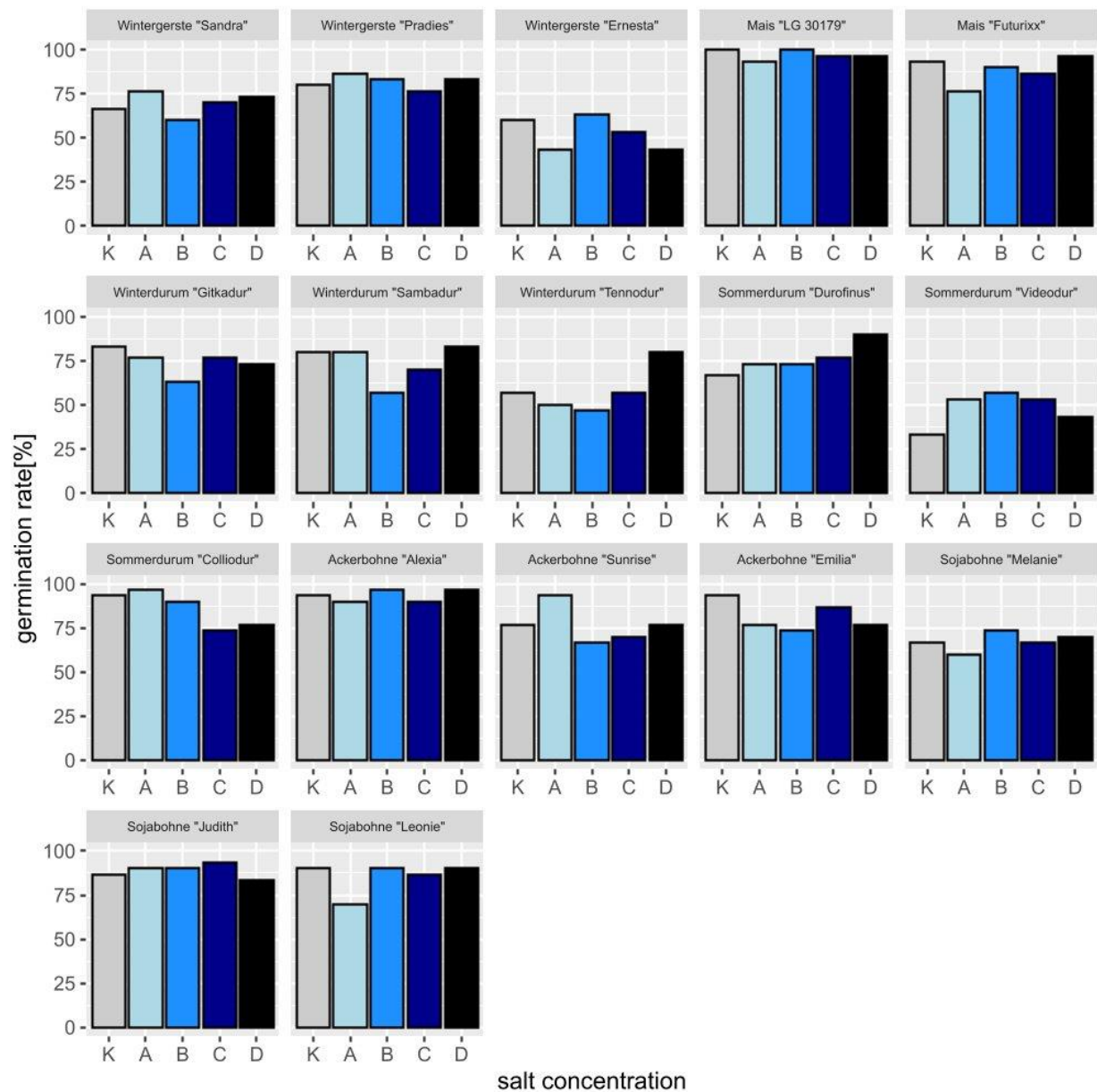


Vorversuch 1:

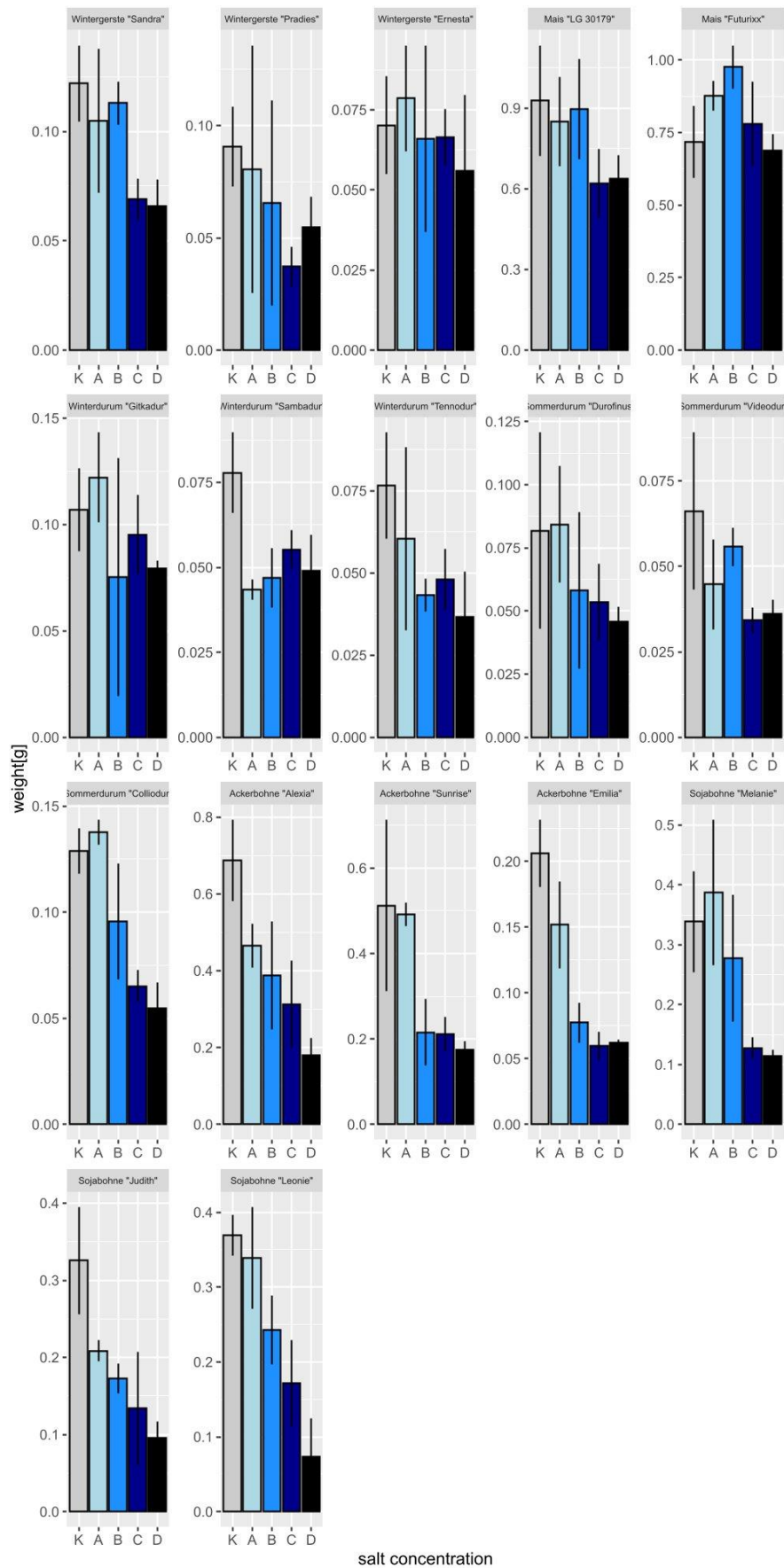


Keimrate VV1

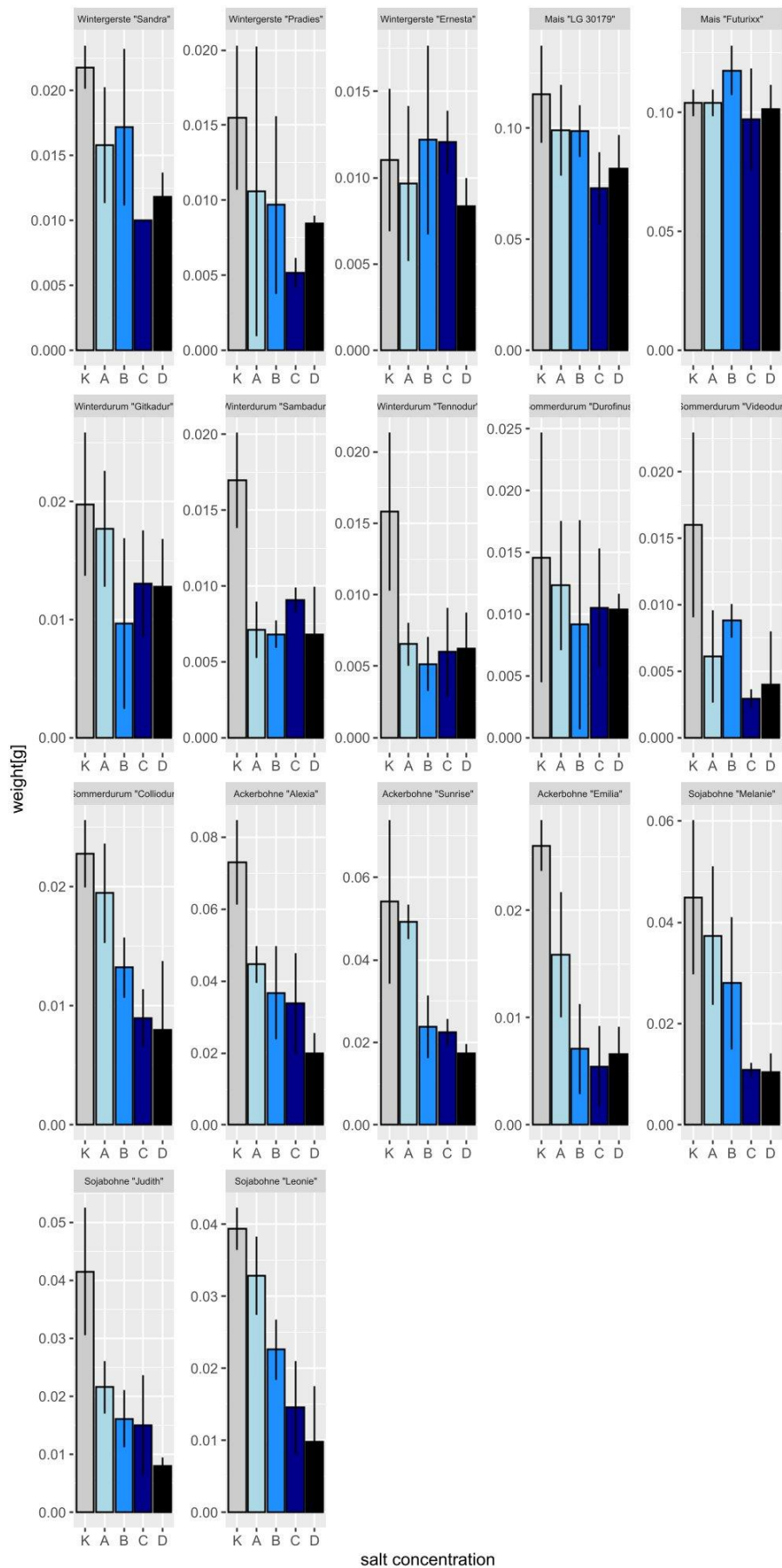
Vorversuch 2:



Keimrate VV2



Frischgewicht VV2



Trockengewicht VV2