



„Salzwirkung im Boden“

Auswirkungen von Streusalzimmmissionen auf die Bodenfruchtbarkeit entlang von hochrangigen Straßen

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

D-A-CH Kooperation

Verkehrsinfrastrukturforschung 2021

D-A-CH 2021

September 2024



Impressum

Programmerstellung und -finanzierung der D-A-CH Kooperation:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich



Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Papiermühlestrasse 13
3063 Ittigen
Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich



Für den Projektinhalt verantwortlich:

TERRA Umwelttechnik GmbH
Großmarktstraße 7C
1230 Wien
Österreich



AIT – Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 4
1210 Wien
Österreich



„Salzwirkung im Boden“
**Auswirkungen von Streusalzimmmissionen auf die
Bodenfruchtbarkeit entlang von hochrangigen
Straßen**
DACH 2021

Auftragnehmer

TERRA Umwelttechnik GmbH

AIT – Austrian Institute of Technology GmbH

Autorinnen und Autoren

DI Dr. Regine PATEK

Dr. Thomas REICHENAUER

Theres Maria KELZ, BSc

Inhaltsverzeichnis

Impressum.....	2
Anlagen	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Einleitung	9
1 Projektbeschreibung	10
2 Literaturrecherche	11
2.1 Salzempfindlichkeit der am häufigsten auftretenden Nutzpflanzen	11
2.2 Auswirkungen von Streusalz auf bodenphysikalische, - chemische und -biologische Parameter	14
2.3 Faktoren, die die Ausbreitung von Streusalz beeinflussen ..	16
2.4 Technische Umsetzung von Freilandexperimenten zur Salzausbreitung neben Straßen	18
3 Technikumsversuch	20
3.1 Vorversuche zur Auswahl geeigneter Kulturpflanzen	20
3.1.1 Ausgewählte Kulturpflanzen	20
3.1.2 Ableitung der verwendeten Salzkonzentrationen	21
3.1.3 Versuchsdurchführung – Vorversuche	22
3.1.4 Ergebnisse der Vorversuche	22
3.2 Hauptversuche mit lehmigem und sandigem Boden	23
3.2.1 Pflanzen	23
3.2.2 Boden	23
3.2.3 Versuchsdurchführung	24
3.2.4 Ergebnisse der Hauptversuche	25
3.3 Pflanzenwachstumstest mit Material von Standorten	51
4 Freilanduntersuchungen	54
4.1 Allgemeines	54
4.2 Aufbauten	56
4.2.1 Gischtfänger	56
4.2.2 Regenfänger	58
4.2.3 Wetterstation	58
4.2.4 Transferboden	59

4.3	Probennahmen	60
4.3.1	Probenahmestellen.....	60
4.3.2	Boden-Probenahme.....	61
4.3.3	Wasser-Probenahme.....	63
4.3.4	Auslesen der Wetterdaten.....	64
4.4	Versuchsflächen	65
4.4.1	S36 Zeltweg/Aichdorf.....	65
4.4.2	S5 Schmida.....	67
4.4.3	A8 Ried im Innkreis.....	68
4.4.4	S6 Allerheiligen im Mürztal.....	70
5	Messergebnisse aus zwei Untersuchungsperioden	72
5.1	S36 Zeltweg/Aichdorf.....	72
5.2	S5 Schmida.....	83
5.3	A8 Ried im Innkreis.....	84
5.4	S6 Allerheiligen.....	85
5.5	Kationenaustauschkapazität.....	86
6	Erkenntnisse und Interpretation	91
6.1	Wie hoch sind die Tausalzeinträge und wie verändert sich die Bodenqualität entlang hochrangiger Straßen durch streusalzbelastete Verkehrsgischt/Sprühnebel?.....	91
6.2	In welcher Entfernung und in welchem Ausmaß wird der Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen entlang von hochrangigen Straßen durch den Einfluss von streusalzbelasteter Verkehrsgischt/Sprühnebel nachteilig beeinflusst?.....	96
6.3	Welche Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen sind sinnvoll und wie kann eine angemessene Entschädigung aussehen?.....	97
6.4	Fazit.....	98
7	Glossar	99
7.1	Bodenfruchtbarkeit.....	99
7.2	Erheblichkeit.....	99
7.3	Hochrangige Straßen.....	100
8	Abbildungsverzeichnis	101
8	Tabellenverzeichnis	104

9 Literaturverzeichnis 107

Anlagen

Anlage 1: Durchführung der Vorversuche im Technikumsversuch (2 Seiten)

Anlage 2: Ergebnisse der Vorversuche im Technikumsversuch (7 Seiten)

Anlage 3: Bodenphysikalische und -chemische Eigenschaften der verwendeten Versuchsböden für den Hauptversuch im Technikumsversuch (3 Seiten)

Anlage 4: Lagepläne der Versuchsflächen (4 Seiten)

Anlage 5: Probenahmetermine und Dokumentation (10 Seiten)

Anlage 6: Analysenergebnisse der Freilanduntersuchungen (23 Seiten)

Anlage 7: Grafische Auswertungen der Freilanduntersuchungen (AP5) (40 Seiten)

Anlage 8: Schneelage bei Probenahmen (2 Seiten)

Anlage 9: Schnee- und Niederschlagsdaten ZAMG (9 Seiten)

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
EC	electrical conductivity (<i>engl.</i>) = elektrische Leitfähigkeit
EL	elektrische Leitfähigkeit
GF	Gischtfänger (Kapitel 4)
<i>M</i>	Mittelwert
n.b.	nicht bestimmt
PN	Probennahme
RF	Regenfänger (Kapitel 4)
RFB	Richtungsfahrbahn
<i>SD</i>	Standardabweichung (von <i>engl.</i> : Standard Deviation)

Einleitung

Streusalz kann während und nach der Ausbringung in Bereiche neben den betroffenen Straßen verfrachtet werden (z.B. durch Windverfrachtung, Austrag mit Schnee oder Regenwasser etc.) und so in den Boden von direkt angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Flächen gelangen. Eine Erhöhung des Salzgehaltes im Boden kann durch die Erhöhung des negativen osmotischen Wasserpotenzials einen Stressfaktor für das Pflanzenwachstum darstellen. Darüber hinaus kann das Pflanzenwachstum auch indirekt durch Wirkungen des Salzes auf den Boden (z.B. Krümelstruktur und Wasserhaltekapazität, Mikrobiom des Bodens) negativ beeinflusst werden.

In diesem Projekt wurden physikalische und chemische Bodenparameter, die durch Streusalzeinwirkung entlang von Autobahnen und Schnellstraßen beeinflusst werden können, in systematisch aufgebauten Versuchsanlagen gemessen. Auf Basis der gemessenen Daten und durch Kombination mit einer umfassenden Literaturrecherche wurden jene, die für eine mögliche Verminderung der Bodenfruchtbarkeit verantwortlich sein können, quantifiziert. Außerdem wurden Wachstumstest mit relevanten Kulturpflanzen bei verschiedenen Salzkonzentrationen im Glashaus durchgeführt. Die gewonnenen Daten und entwickelten Methoden sollen dazu beitragen in Zukunft an konkreten Standorten eine mögliche Wirkung von Streusalz auf landwirtschaftliche Kulturen leichter bewerten zu können.

Im durchgeführten Freilandversuch wurde an ausgewählten Standorten Versuchsfelder in unterschiedlicher Entfernung vom Straßenrand angelegt und über zwei Winterperioden regelmäßig beprobt. Ergänzend zu diesen Freilanduntersuchungen wurde ein Pflanzenwachstumstest entwickelt, in dem Kulturpflanzenarten mit unterschiedlicher Salzempfindlichkeit zur direkten Testung der Wirkung von salzbelasteten Bodenproben auf das Pflanzenwachstum verwendet werden.

Die klar definierten Nicht-Ziele des Projektes waren Untersuchungen von an Autobahnen und Schnellstraßen angrenzenden Bereiche, die bewaldet sind, wo sich Lärmschutzwände befinden und jene, die sich im Stadtgebiet (Stadtautobahnen) befinden. In diesen drei Streckenabschnittstypen ist die Fragestellung der Wachstumshinderung nicht relevant (für Wälder wäre der Untersuchungszeitraum zu kurz; da Gehölze aber meist in größerer Entfernung zur Fahrbahn stehen, ist hier sehr wahrscheinlich auch nach mehreren Betrachtungsjahren kein signifikantes Ergebnis zu erwarten).

Die Ergebnisse dieses Projektes sollen dazu beitragen eine fundierte und nachvollziehbare Bewertung von Streusalzeinwirkung auf die Bodenfruchtbarkeit entlang von Autobahnen und Schnellstraßen zu ermöglichen.

1 Projektbeschreibung

Das Projekt war in fünf Arbeitspakete (AP) gegliedert. **AP1 „Projektmanagement“** beinhaltet alle Arbeiten, die für einen reibungslosen und zeitgerechten Projektablauf, sowie die effiziente Lösung von auftretenden Problemen, notwendig waren. Dazu gehörte auch die Erarbeitung der Zwischen- und Endberichte, sowie die Ausarbeitung und Präsentation von Zwischenergebnissen. In **AP2 „Literaturrecherche“** wurde die relevante Literatur zusammengetragen um das derzeitige Wissen über den Salzeintrag neben Fahrbahnen, mögliche Wirkungen auf Kulturpflanzen zu erheben und nach möglichen technischen Ansätzen für die Durchführung des Freilandversuches zu suchen. Anschließend wurde in **AP3 „Vorversuche im Technikum“** ein Pflanzentest etabliert, mit dem Wirkungen von erhöhten Salzgehalten im Boden auf das frühe Wachstumsstadium von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen nachgewiesen werden können. Dieser Test wurde auch auf die Böden zweier Standorte des Freilandversuches angewandt. Im **AP4 „Freilanduntersuchungen“** wurden zunächst mehrere Standorte untersucht, von denen schließlich vier für Untersuchungen während zweier Streuperioden (Winter 22/23 und Winter 23/24) ausgewählt wurden. An diesen Standorten wurden jeweils ein Gischtfänger und eine Wetterstation aufgebaut. Während den beiden Streuperioden wurden im Abstand von zwei Wochen Proben vom gesammelten Gischtwasser, von einem Regenfänger, sowie Bodenproben in unterschiedlichen Entfernungen von der Fahrbahn genommen und auf chemisch-physikalische Parameter (elektrische Leitfähigkeit, Chloridgehalt, pH-Wert) untersucht. Außerdem wurden in ausgewählten Proben die Kationenaustauschkapazität und der Natriumgehalt gemessen. Schließlich wurden die gewonnenen Daten im **AP5 „Auswertungen, Analysen, Interpretation“** umfassend ausgewertet, dargestellt und interpretiert. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in diesem Bericht beschrieben.

2 Literaturrecherche

Die durchgeführte Literaturrecherche diente der Entwicklung des Versuchsdesigns für die Freilandexperimente, sowie für die Durchführung der Pflanzenwachstumstests zur Überprüfung der Salzwirkung auf relevante landwirtschaftliche Kulturpflanzen.

2.1 Salzempfindlichkeit der am häufigsten auftretenden Nutzpflanzen

Eine Erhöhung des Salzgehaltes im Boden kann unmittelbar durch eine Erhöhung **der elektrischen Leitfähigkeit (EL) oder (engl.) electric conductivity (EC)** des Bodens, bzw. der Bodenlösung quantifiziert werden. Die elektrische Leitfähigkeit des Bodens wird in der Literatur mit dem relativen Ertrag von Nutzpflanzen in Verbindung gebracht. Die Einteilung der Toleranzbereiche basiert dabei auf verschiedenen Parametern wie Ertrag, Frisch- oder Trockengewicht, wobei die Kriterien je nach Referenz und Untersuchungsmethode variieren. Idealerweise wird ein **Schwellenwert für die elektrische Leitfähigkeit** bzw. electric conductivity des Bodens **EC_(e)** angegeben, ab dem negative Auswirkungen des Salzgehaltes auf die Pflanzen zu erwarten sind. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den relativen Ertrag von Kohl in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens (aus de Vos et al. 2016). In diesem Experiment nahm der Ertrag ab einem Schwellenwert von 4,6 dS/m kontinuierlich ab.

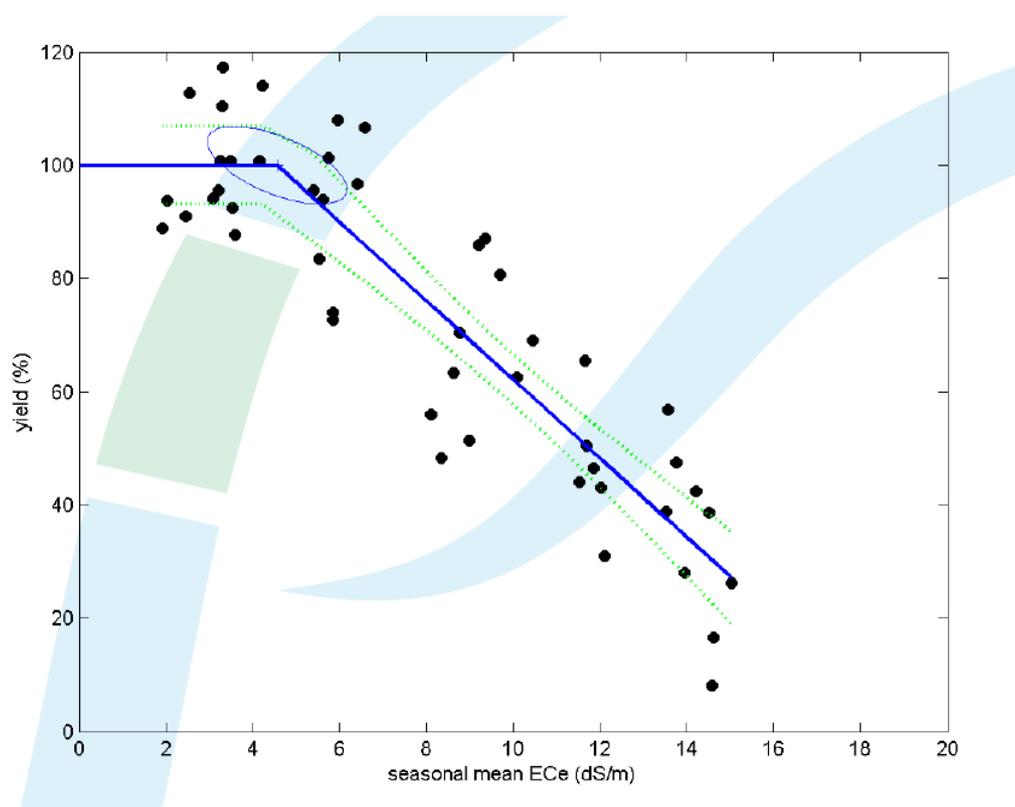


Abbildung 1: Relativer Ertrag von Kohl im Vergleich zur elektrischen Leitfähigkeit des Bodens, Schwellenwert 4,6 dS/m. aus de Vos et al. (2016).

Auf Grund sehr unterschiedlicher Versuchsdesigns und Messmethoden (vor allem für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit) sind die Angaben zu Salzempfindlichkeiten verschiedener Kulturpflanzen, die in der Literatur zu finden sind, sehr variabel. Für die Vorauswahl von Kulturpflanzen für den Technikumsversuch war es aber trotzdem sinnvoll und nützlich auf Daten aus der Literatur zurückzugreifen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Salztoleranz von krautigen Pflanzen laut Literatur (Maas & Grattan, 1999)

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)

Es ist zu beachten, dass in diesen Experimenten die Salzkonzentrationen über einen längeren Zeitraum (idealerweise über die gesamte Vegetationsperiode) konstant gehalten wurden (z.B. durch Bewässerung mit verschiedenen Salzkonzentrationen), da nur so eine Salztoleranz bestimmt werden kann. Insofern können Daten für Salztoleranz aus der Literatur nicht einfach auf die Fragestellung einer möglichen Wirkung einer Streusalzexposition im Winterhalbjahr auf eine mögliche Wirkung in der darauffolgenden Expositionsperiode übertragen werden, da in diesem Fall ja die Exposition mit dem Ende der Streuperiode endet und der Anbau ja abgesehen von Winterfrüchten ja erst danach stattfindet.

2.2 Auswirkungen von Streusalz auf bodenphysikalische, -chemische und -biologische Parameter

Die Eigenschaften eines Bodens werden wesentlich von seinem Salzgehalt beeinflusst. Dieser wird bestimmt durch die gelösten Salze im Wasser und im Boden. Die am häufigsten vorkommenden gelösten Ionen sind die **Anionen Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} und NO_3^-** , sowie die **Kationen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+}** (Walleneder & Tanji, 1996). Die vorkommenden Salze sind vor allem **NaCl , Na_2CO_3 und Na_2SO_4** (Scheffer, et al., 2018). Diese sind im Boden nicht gleichmäßig verteilt und ihr Verbleib bzw. ihre Verortung hängen unter anderem von der Dichte, dem Wassergehalt und der Struktur des Bodens ab (Maas & Grattan, 1999).

Ebenso stabilisieren die Salze den Boden bei Austrocknung, führen also zu einer Verdichtung und im gelösten Zustand wird der **pH-Wert des Bodens** beeinflusst. NaCl , das aus einer starken Base und einer starken Säure besteht, hat in Lösung einen neutralen pH Wert ($\text{pH}=7$). Salze mit einer schwachen Säure, aber einer starken Base wie zum Beispiel Soda (Na_2CO_3) wirken alkalisch ($\text{pH}>7$), und solche mit einer starken Säure, aber nur eine mittelstake Base wie etwa Gips (CaSO_4) wirken in wässriger Lösung schwach sauer ($\text{pH } 5,8$) (Scheffer, et al., 2018).

Salze beeinflussen nicht nur den Boden, sondern der Boden beeinflusst auch umgekehrt die Verlagerung und den Verbleib der Salze. In durchlässigen, sandigen Böden werden die Salze tiefer verfrachtet, als in tonreichen Böden. Dies liegt an der Bodendichte, bzw. der Porenverteilung, da die Salze in Böden mit einem höheren Anteil an großen Poren schneller ausgewaschen werden können als in dichten Böden mit einem höheren Feinporenanteil (Scheffer, et al., 2018). **Dichter Boden** fördert nun nicht nur den Verbleib von Salzen, sondern stellt auch eine **physikalische Wachstumserschweris für Pflanzen** dar. Diese können zu einer Minderung der Keimung und des Pflanzenwachstums führen, wenn die Salztoleranz der am Feld wachsenden Pflanze überschritten wird (Maas & Grattan, 1999).

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 werden 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 Verschlammung, und Dichtlagerung, kurz **Bodenverdichtung**. Dadurch kommt es zu einer Verschlechterung des Gas- und Wasserhaushaltes des Bodens, was in weiterer Folge zu einer **geringeren Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen** führen kann (Scheffer, et al., 2018; Zuber, 2013).

Natrium wirkt sich auch auf die Bodenparameter aus und kann dadurch chemische und physikalische 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 **Chloridüberschuss**. Das über Wurzeln oder den Spross aufgenommene Cl^- führt zu **Chlorosen** (gelbe Flecken) und Nekrosen (braune abgestorbene Bereiche) 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, durch die Chlorid-Ionen nicht maßgeblich verändert (Brod, 1993). Chlor wirkt sich jedoch maßgeblich auf die Osmoregulation im Boden aus. Die Wasseraufnahme der Pflanzen beruht auf der Verdunstung von Wasserdampf über die Blattfläche. Dadurch entsteht ein **negatives Wasserpotenzial**, das zu einem Transport von Wasser über die Wasserleitungsbahnen (Xylem) aus dem Boden über die Wurzeln und den Stamm bis ins Blatt führt. Das Wasser wird sozusagen gegen die Schwerkraft nach oben in die Pflanze gesaugt. Die **Differenz des Wasserpotenzials zwischen Boden und Blatt** treibt somit die Wasseraufnahme der Pflanze an. Durch einen erhöhten Anteil an Cl^- im Boden wird jedoch das osmotische Potenzial des Bodens erhöht, wodurch sich die Potenzialdifferenz zwischen Boden und Blatt verringert.

Dadurch kommt es zu einer Verringerung der Wasseraufnahme für die Pflanzen: Man spricht von „**Osmotischem Stress**“ (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).

2.3 Faktoren, die die Ausbreitung von Streusalz beeinflussen

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 in einer Entfernung von wenigen Zentimetern bis zu 100 Meter neben der Straße deponiert werden. Die **Verfrachtung** 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). Innerhalb der ersten zwei Meter neben der Straße versickert der größte Teil des salzhaltigen Wassers und das ist somit der am meisten belastete Bodenabschnitt. Im anschließenden Spritzwasserbereich bis zu zehn Metern findet man ebenso eine hohe Belastung von Salz (Tegethof, 1998). Aufgrund des Windes und bei einer Trockensalzaufbringung können Salze noch von **60 m bis zu 100 m**, vereinzelt sogar **bis 200 m** neben der Straße verlagert werden (Wresowar & Sieghardt, 2000; Tegethof, 1998). 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 dagegen die Versalzung des Bodens und des Grundwassers mindern (Graf, 2018). Den **am stärksten von Salz belasteten Bereich** bei Straßen findet man in einer Entfernung von **0 m bis 15 m vom Straßenrand**. Hier findet man **bis zu 90 %** des verfrachteten Salzes (Tegethof, 1998; Däumling, 2012; Graf, 2018; Wresowar & Sieghardt, 2000).

Die Streusalzverluste nach der Aufbringung sind somit der Grund für die mögliche Versalzung der Böden neben der Straße. Bei einer Streumenge von 5 g/m² ist der Verlust direkt nach der Aufbringung auf Grund der ungleichmäßigen Aufbringung schwer interpretierbar. Ab einer **Streumenge von 10 g/m²** 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 in der Studie von Hoffmann, Blab & Nutz (2011) haben gezeigt, dass bei eingestellten **Streumengen von 10-30 g/m²** ein **Anfangsverlust** der Streusalzmenge von **ca. 70%** erfolgt. Das bedeutet, dass die **Restsalzmenge** die auf der Straße direkt in der Rollspur verbleibt nur **ca. 30 %** beträgt (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011).

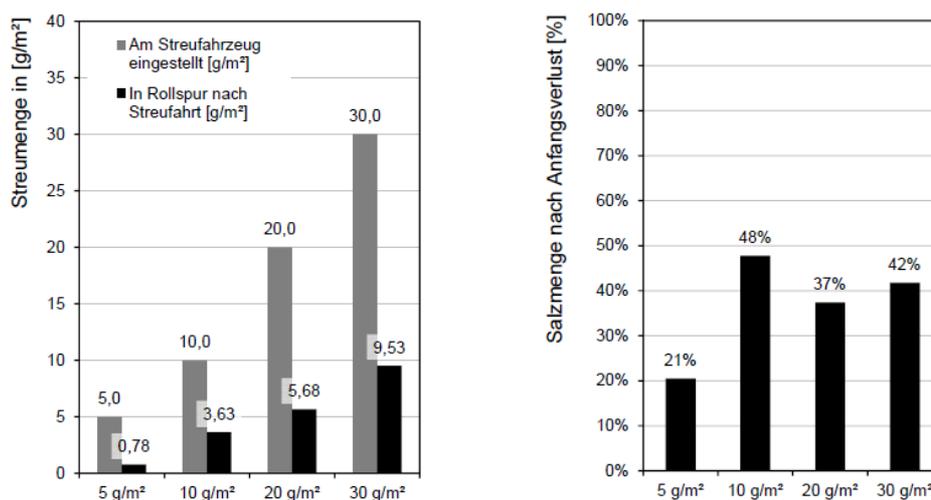


Abbildung 2: „Auswertung der Restsalzmessungen für den Anfangsverlust unmittelbar nach der Ausbringung. Vergleich zur eingestellten Streumenge und relativer Verlust in Prozent (n=47)“ (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011)

Die Streusalzverluste von dem auf der Straße verbliebenen Salz, sind wesentlich geringer als die Anfangsverluste. Im Mittelwert kann man von einem **Verlust von 35 %** nach einer **Überfahrt von 2000-7000 Fahrzeugen** sprechen. Die Messwerte zeigten allerdings eine sehr hohe Bandbreite und deuten deswegen darauf hin, dass noch einige andere Faktoren (wie oben genannt) eine starke Rolle spielen. Sehr hohe Verluste oder keine Restsalzmengen auf der Straße wurden in dieser Studie nur bei nasser Fahrbahn vorgefunden. Bei **feuchten** oder **trockenen Straßen** war der **Verbleib der Salzmenge auf der Straße wesentlich höher** als bei Niederschlag (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011).

2.4 Technische Umsetzung von Freilandexperimenten zur Salzausbreitung neben Straßen

Für die „technische Methodik“ wurde zuerst im Internet eine umfangreiche Recherche durchgeführt. Basierend auf den erfolgreichen Treffern konnte in weiterer Folge gezielt Literatur abgefragt werden. Dabei wurden die Zitatlisten der Publikationen (meist in Form von wissenschaftlichen Arbeiten) abgearbeitet. Zusätzlich erfolgte eine Suche auf weiteren Plattformen, wie z.B. Wissenschaftsverlag Springer, ResearchGate usw.

Die Suche für die technische Methodik von Versuchsansätzen war v.a. in Schweden erfolgreich, weitere Publikationen stammen aus der Schweiz und den USA, weiters wurden auch 2 Projekte in Österreich als betrachtenswert erachtet.

Allerdings finden sich **sehr wenige Studien** bzw. Ansätze, die sich mit **Sammelsystemen UND** unmittelbar mit dem **Boden** selbst beschäftigen. Es wurden hauptsächlich Entnahmen durch das Ziehen von Bodenproben und der anschließenden Analytik durchgeführt. Sammelanlagen finden sich kaum.

Lediglich eine Studie aus Österreich beschäftigt sich mit Versuchen Vor-Ort zu sampeln (Monai, Zraunig, & Pirker, 2020). Es wurde das Gischwasser gesammelt, der Boden selbst blieb dabei aber unbetrachtet. Leider konnte durch die oftmalige Zerstörung der Anlage keine repräsentativen Ergebnisse erzielt werden.

Eine weitere österreichische Studie, die im Zeitraum 2005 bis 2007 stattfand, beschäftigte sich mit Staubbiederschlagsmessungen über das Bergerhoff-Verfahren, wo versucht wurde, den Streusalzeintrag über Ablagerungen zu erfassen (Gregori, et al., 2008).

Studien aus Schweden beschäftigten sich meist mit der Erstellung von **Modellen**, wobei die Messung der Eingangsparameter über unterschiedliche Datensammlung erfolgte. Eine Methode mit direkter Datenerfassung im Untergrund erfolgte über geoelektrische Überwachungssysteme mit fix installierten Elektroden zur Messung des spezifischen Widerstandes. Zur Erfassung natürlicher Schwankungen wurden Vergleichsmessungen an weniger stark befahrenen Straßen & weiter von der Straße entfernten Messpunkten durchgeführt. Das Ziel war die Erstellung eines leistungsfähigen Modells für unterschiedliche Böden und Vegetationstypen. Oftmalig wurden für die Modellerstellung Austragsquoten (Chlorid-Ablagerungen) angenommen, die sich dann bei der Validierung der Modelle in der Natur als ungenau herausstellten.

Die Messungen erfolgten auch hier über spezifischen Widerstand, im Sommer passten die modellierten Werte nicht zu den Feldmessungen. Ein weiteres Modellierungstool betreffend Überwachung und Transport von Streusalz zur Quantifizierung räumlicher und zeitlicher Veränderungen im Boden wurde ebenfalls durch Einzeldatenerhebung (meteorologische Daten, Geologie und Hydrogeologie) kalibriert. Weiters wurde über elektrische Widerstandstomographie (ERT) mittels Tracer die Ausbreitung von Auftausalzen im Grundwasser untersucht. Ebenfalls aus Schweden stammt ein mathematisches Modell, das über direktes Sammeln von Daten aus der Luft erstellt wurde, unterstützt durch klassische Bodenprobenahme mit Chloridgehaltbestimmung sowie Messung des elektrischen Widerstandes in den Proben. (Lundmark, 2008) (Lundmark, 2005) (Lundmark & Jansson, 2008) (Lundmark & Olofsson, 2007).

Zusammenfassend können folgende Sammelmechanismen als Rechercheergebnis angeführt werden:

- GW-Sonden, Leitfähigkeit (LF) im Boden bzw. GW-Pegel aufzeichnen; herkömmliche GW-PN und Analytik
- Private Wetterstationen
- Bergerhoff-Staubsammler
- Kunststoffsammelplanen an der Fahrbahnböschung mit Auffangrinnen und Kübeln....
- Geoelektrische Überwachungssysteme mit fix installierten Elektroden
- Direktes Sammeln von Luftverfrachtungen in Containern

Folgende herkömmliche (Einzel)Daten wurden erhoben:

- PN Oberboden und Cl-Gehalt-Analyse
- PN GW und Cl-Gehalt-Analyse
- Elektr. Widerstandsmessungen direkt im Boden oder in der gezogenen Oberbodenprobe
- Beprobung von Blättern der Begleitvegetation
- ODER: Analyse von Geschwindigkeitsbeschränkungen, Wetter- und Verkehrssituation

Nach Sammlung und Auswertung aller Inputdaten: Erstellung von Modellen, die den Austrag von Streusalz in den Oberboden entweder beschreiben oder berechnen können.

Ein gesamtheitlicher Ansatz für Sammelsysteme UND Auswertung bzw. In-Bezug-Setzen aller Bodenfaktoren konnte nicht ermittelt werden.

3 Technikumsversuch

Das Ziel des Technikumsversuches war es die Salzeempfindlichkeit von im DACH-Raum relevanten Kulturpflanzen in einem frühen Wachstumsstadium zu untersuchen und gleichzeitig einen Test zu entwickeln, der für eventuelle konkrete Fälle angewendet werden kann, bei denen es um eine mögliche Beeinträchtigung durch Streusalz von Kulturen in einem frühen Wachstumsstadium geht. Die Kulturpflanzen für den Technikumsversuch wurden daher entsprechend ihrer erwarteten Salzeempfindlichkeit und ihrer Relevanz für Österreich, Deutschland und die Schweiz ausgewählt.

Zunächst wurden **22 Sorten** ausgewählt (3 Wintergerste, 3 Mais, 3 Winterdurum, 3 Sommerdurum, 4 Raps, 3 Ackerbohne und 3 Soja), mit denen mehrere **Vorversuche** durchgeführt wurden, um die geeignetsten Kulturpflanzen und Sorten für den Pflanzenwachstumstest zu identifizieren.

Auf Basis der Vorversuche wurden je **drei Sorten** von **Winterdurum** und **Sojabohne**, **zwei Sorten** von **Mais** und **eine Sorte** von **Ackerbohne** für den Hauptversuch ausgewählt. Der Hauptversuch wurde mit zwei Bodenarten (schluffig und sandig) und zwei Salzgehalten, die aus Literaturdaten für Salzgehalte neben Autobahnen/Schnellstraßen abgeleitet wurden durchgeführt. Der Pflanzenwachstumstest erfolgte im Glashaus und alle Pflanzen wurden in 5-facher Wiederholung angesetzt. Die Keimungsrate, der Chlorophyllgehalt, sowie die oberirdische und wenn es die Wurzelarchitektur zuließ auch die unterirdische Biomasse wurden bestimmt. Der Test zeigte sowohl unterschiedliche Salzeempfindlichkeiten zwischen den Kulturpflanzen, aber auch zwischen den Sorten innerhalb einer Kulturpflanze. Bei der Sojabohne zeigten alle drei Sorten im schluffigen Boden eine hohe Salzeempfindlichkeit in Bezug auf die oberirdische Biomasse, wogegen die beiden Maissorten hier deutlich geringere Effekt zeigten.

3.1 Vorversuche zur Auswahl geeigneter Kulturpflanzen

3.1.1 Ausgewählte Kulturpflanzen

In den Vorversuchen wurde die Salzeempfindlichkeit von Wintergerste, Mais, Winterdurum, Sommerdurum, Raps, Ackerbohne und Sojabohnen untersucht (*Tabelle 2*). Von allen Kulturpflanzen außer Mais wurden drei Sorten getestet. Bei Mais hatte eine Sorte die Keimprobe nicht bestanden, weshalb nur zwei Sorten untersucht wurden. Die Pflanzen stellen einen Querschnitt von moderat toleranten und moderat sensitiven salzeempfindlichen Nutzpflanzen dar, die in Österreich verhältnismäßig häufig angebaut werden (Maas & Grattan, 1999; Statistik Austria, 2022).

Tabelle 2: Verwendete Feldfrüchte und Sorten für die Vorversuche

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

3.1.2 Ableitung der verwendeten Salzkonzentrationen

Die Salzkonzentrationen für die Technikumsversuche wurden basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche abgeleitet.

Tabelle 3: Salzkonzentrationen im Technikumsversuch

Code für die Konzentration	Salzkonzentration (mg NaCl pro kg Boden)
A	782,1
B	1 564,2
C	2 346,3
D	3 128,4

Bei Bodenmessungen in Österreich, Deutschland und der Schweiz wurden Werte von 0,58 g NaCl/kg bis 0,99 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 g NaCl/kg bis 2,64 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 g und 12,86 g NaCl/kg Boden auf und liegen somit auch über den Konzentrationen C und D (Wentzel, 1973; Brod, 1993).

3.1.3 Versuchsdurchführung – Vorversuche

Die Vorversuche wurden in großen Petrischalen durchgeführt. Der gesiebte Boden wurde befeuchtet und das Salz wurde in verschiedenen Konzentrationen gut eingearbeitet, sodass eine homogene Mischung gegeben war. Nach etwa zwei Wochen zur Equilibrierung des Salzes mit der Bodenlösung 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). Neben der Keimungsrate wurden am Ende des Experimentes die Frisch- und Trockengewicht der Pflanzen erfasst.

3.1.4 Ergebnisse der 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 „LG 30179“ von 97,44 % in der Kontrolle auf 82,05 % bei Salzkonzentration 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 D.

Die meisten Nutzpflanzensorten zeigten allerdings im Vorversuch keine eindeutigen Korrelationen zwischen der Keimrate und der Salzkonzentration.

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 in der Kontrolle 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 „LG 30179“ 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 eine graphische Darstellung der Ergebnisse der Vorversuche sind im Anhang dargestellt.

3.2 Hauptversuche mit lehmigem und sandigem Boden

3.2.1 Pflanzen

Die auf Basis der Vorversuche für die Hauptversuchen ausgewählten 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 4).

Tabelle 4: Verwendete Feldfrüchte und Sorten für die Hauptversuche

Mais	Winterdurum	Ackerbohne	Sojabohne
LG 30179	Gitkadur	Emilia	Melanie
Futurixx	Sambadur		Judith
	Tennodur		Leonie

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 im DACH-Raum von sehr häufig bis selten. Außerdem wurde darauf geachtet, sowohl einkeimblättrige als auch zweikeimblättrige Pflanzen in die Untersuchung einzubeziehen.

Die durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit des Versuchsbodens variierte zwischen 1,05 dS/m für die Kontrollerde und 5,13 dS/m (siehe Tabelle 5) 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 eingestuften Pflanzensorten Veränderungen der Biomasse, der Keimrate und des Längenwachstums beobachtet werden könnten.

3.2.2 Boden

Für die Hauptversuche wurden 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 Anlage 3).

3.2.3 Versuchsdurchführung

Für die Hauptversuche wurden 4,5 kg Erde mit einem Wassergehalt von 13 % in einem Rührgerät mit 500 ml entsalztem Wasser vermengt. 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.

Tabelle 5 zeigt die elektrische Leitfähigkeit der beiden Kontrollböden vor und nach den Salzzugaben.

Tabelle 5: 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

	Kontrolle K	Salzkonzentration A	Salzkonzentration B
	EC _(e) in $\mu\text{S/m}$		
Hauptversuch 1 lehmiger Boden	1 420	3 960	5 780
Hauptversuch 2 sandiger Boden	1 050	2 980	5 130

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 einen Untersetzer gestellt und mit drei Litern Leitungswasser zur Bewässerung versorgt. Um Salzauswaschungen zu verhindern, erfolgte die Bewässerung ausschließlich von unten, indem Wasser direkt in die Untersetzer gegeben wurde, was eine kontinuierliche Feuchtigkeitsversorgung ohne direkten Wasserkontakt mit der Erdoberfläche sicherstellte.

Zu Versuchsbeginn wurden die Pflanzentöpfe in einer Kammer des Glashauses am Standort des AIT in Tulln zufällig angeordnet, wobei innerhalb jedes Untersetzers ausschließlich Töpfe mit identischer Salzkonzentration platziert wurden. Diese Anordnung wurde durch Abdecken der Töpfe für einen Tag ergänzt, um die Keimung zu verbessern. Zu mehreren Zeitpunkten wurden die Keimrate und die Sprosslänge aller Pflanzen eines Topfes ermittelt. Die Position der Untersetzter 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 erfolgte nach 26 Tagen, jene von Soja- und Ackerbohnen nach 27 Tagen.

Bei der Ernte wurden die Pflanzen durch Spülen mit Wasser von der Erde getrennt, ähnlich wie bei den Vorversuchen. Die feinen Wurzeln von Winterdurum und die Beschaffenheit der lehmigen Erde erschwerten das Waschen der Wurzeln, wodurch hier keine verlässlichen Werte für die Wurzelbiomasse gewonnen werden konnten. Die Wurzeln und oberirdischen Teile wurden separat gewogen und die Blattfläche wurde bestimmt. Nach der Messung kamen die Pflanzen in den Trockenschrank, um nach vollständiger Trocknung 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 Bestimmung der Wurzelbiomasse 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 Sprosslänge und der Blattoberfläche, sowie die Trocknung der Pflanzen im Trockenschrank zur Bestimmung des Trockengewichts.

3.2.4 Ergebnisse der Hauptversuche

Die Hauptversuche konzentrierten sich auf die Auswirkungen der Salzkonzentrationen von 728,1 mg/kg NaCl und 1564,2 mg/kg NaCl auf ausgewählte Kulturpflanzen. Alle Ansätze wurden mit fünf Replikaten durchgeführt.

3.2.4.1 Keimraten auf lehmigem Boden

Im lehmigen Boden 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 % bei der Salzkonzentration A und weiter auf 40 % bei der Konzentration B sank. Sojabohne zeigte im Vergleich zu den anderen untersuchten Kulturpflanzen auf lehmigem Boden in Bezug auf die Keimrate die höchste Empfindlichkeit (Abbildung 3 und Tabelle 6).

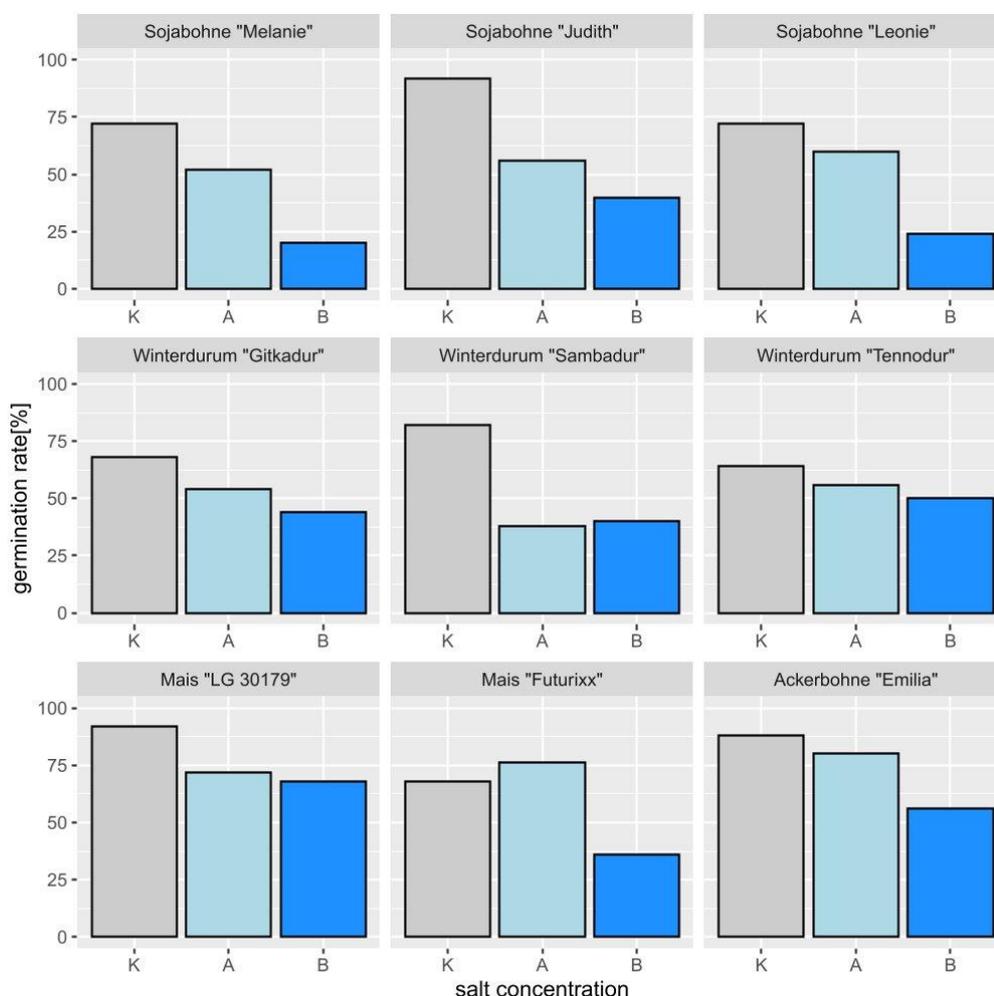


Abbildung 3: **Keimraten** (gekeimte Samen in Prozent der gesäten Samen: 10 Stk. bei Durum Sorten und je 5 Stk. bei Sojabohne, Mais und Ackerbohnen Sorten), K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Anzahl der Wiederholungen jeweils 5; lehmiger Boden

Tabelle 6: Keimraten in [%], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
K	72	92	72	68	82	64	92	68	88
A	52	60	60	54	38	56	72	76	80
B	20	24	24	44	40	50	68	36	56

Bei Winterdurum zeigten die Sorten „Gitkadur“ und „Tennodur“ die geringsten Abnahmen in den Keimraten mit steigender Salzkonzentration. 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.

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" keine Verringerung der Keimrate bei Salzkonzentration A, jedoch einen deutlichen Rückgang auf 36 % bei Salzkonzentration B.

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 (siehe Abbildung 3 und Tabelle 6).

3.2.4.2 Frischgewicht auf lehmigem Boden

Die Sojabohne zeigte auch bei der Biomasse die stärkste Abnahme mit steigender Salzkonzentration gegenüber der Kontrolle. Bei allen drei Sojabohnensorten wurde eine Abnahme des Frischgewichtes sowohl der Wurzel als auch der Sprossachse mit zunehmender Salzkonzentration festgestellt. Bei den drei Sorten lagen die Sprossbiomassen bei Salzkonzentration A nur noch zwischen 58% und 61% der Kontrolle und bei Salzkonzentration B zwischen 39% und 42% der Kontrolle. Bei der Wurzelbiomasse zeigte sich ein sehr ähnliches Muster. Bei Winterdurum wurde nur das Gewicht der Sprossachse gemessen. Im Gegensatz zu den Sojabohnen zeigte sich nur bei einer Sorte bei Salzkonzentration B eine Abnahme gegenüber der Kontrolle. Die Winterdurum-Sorten „Sambadur“ und „Tennodur“ sogar eine tendenzielle Gewichtszunahme, die aber vermutlich auf die Variabilität der biologischen Replikate zurückzuführen ist. (Abbildung 4, Tabelle 7 und Tabelle 8).

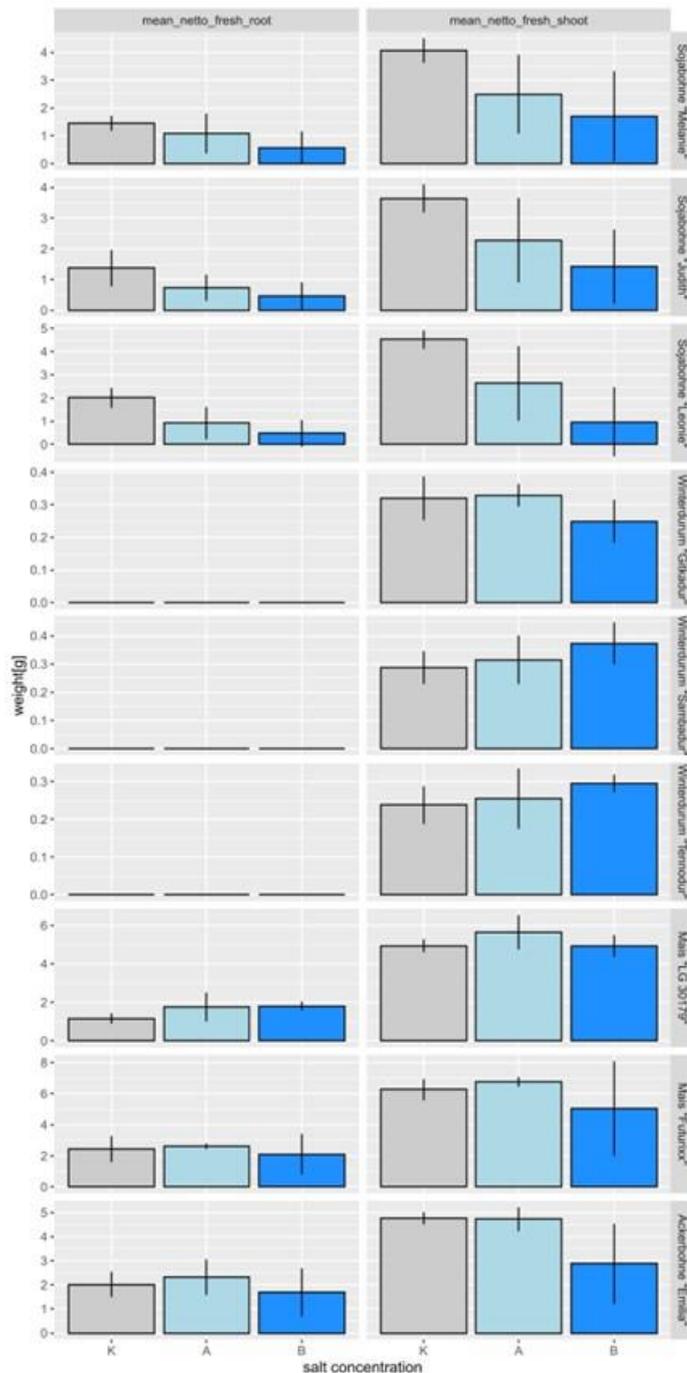


Abbildung 4: **Frischgewicht der Wurzeln und der Sprossachse in [g], K** ■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden.

Tabelle 7: Frischgewicht der Sprossbiomasse als Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	
A	61	63	58	103	107	108	114	108	99
B	42	39	21	78	128	125	100	88	61

Tabelle 8: Frischgewicht der Wurzelbiomasse als Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	
A	74	54	46	n.b.	n.b.	n.b.	151	107	115
B	38	33	23	n.b.	n.b.	n.b.	156	86	84

n.b. = nicht bestimmt, da eine quantitative Beprobung auf Grund der feinen Wurzeln nicht möglich war

Bei den Maissorten wurde sowohl das Wurzel- als auch das Sprossachsengewicht durch die Erhöhung der Salzkonzentration unterschiedlich beeinflusst. Während bei der Sorte „Futurixx“ die Biomasse von Spross und Wurzel erst bei der Salzkonzentration B abnahmen, zeigte sich bei LG 30179 sogar eine tendenzielle Zunahme der Biomasse bei beiden Salzkonzentrationen.

Die Ackerbohnsorte „Emilia“ reagierte ähnlich wie die Maissorte Futurixx mit einer Abnahme der Biomasse erst bei der höheren Salzkonzentration B.

3.2.4.3 Trockengewicht auf lehmigem Boden

Die Ergebnisse des Trockengewichts der ober- und unterirdischen Biomasse waren vergleichbar jenen der Frischmasse. Auch hier zeigten die Sojabohnen die stärkste Abnahme mit steigender Salzkonzentration (siehe Abbildung 5 Tabelle 9 und Tabelle 10).

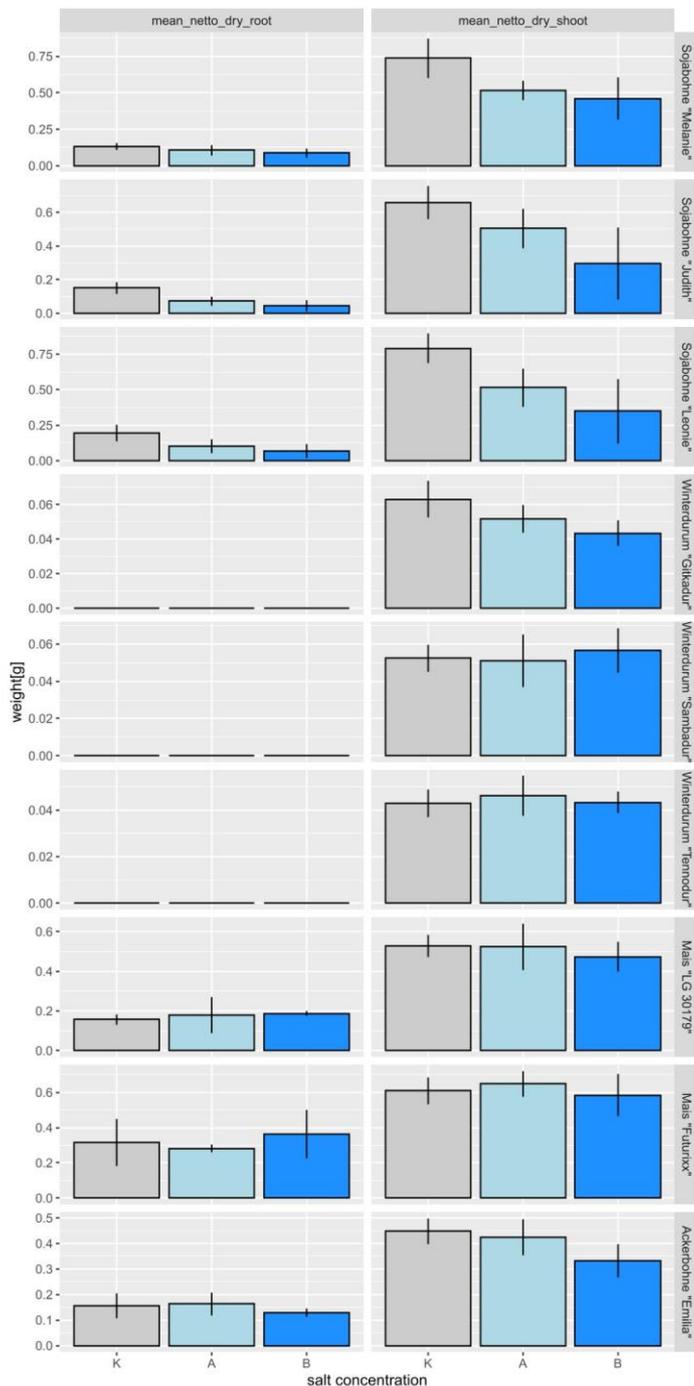


Abbildung 5: **Trockengewicht der Wurzeln und der Sprossachse**, K_█ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_█ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_█ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden.

Tabelle 9: Trockengewicht der Wurzeln in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
A	70	76	65	83	100	125	100	107	96
B	62	45	44	67	120	100	89	95	73

Tabelle 10: Trockengewicht der Wurzeln in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
A	85	47	53	n.b.	n.b.	n.b.	113	88	100
B	69	33	37	n.b.	n.b.	n.b.	119	113	81

n.b. = nicht bestimmt, da eine quantitative Beprobung auf Grund der feinen Wurzeln nicht möglich war

3.2.4.4 Sprosslängen auf lehmigem Boden

Die durchschnittlichen Sprosslängen spiegelten die Salzeempfindlichkeiten bezüglich Biomasse wider. Auch hier zeigten die drei Sorten der Sojabohne eine stetige Abnahme mit steigender Salzkonzentration. Eine Abnahme war auch bei der Ackerbohne zu erkennen, wogegen bei Winterdurum und Mais keine eindeutige Wirkung der erhöhten Salzkonzentration auf die Sprosslänge erkennbar war (Abbildung 6 und Tabelle 11).

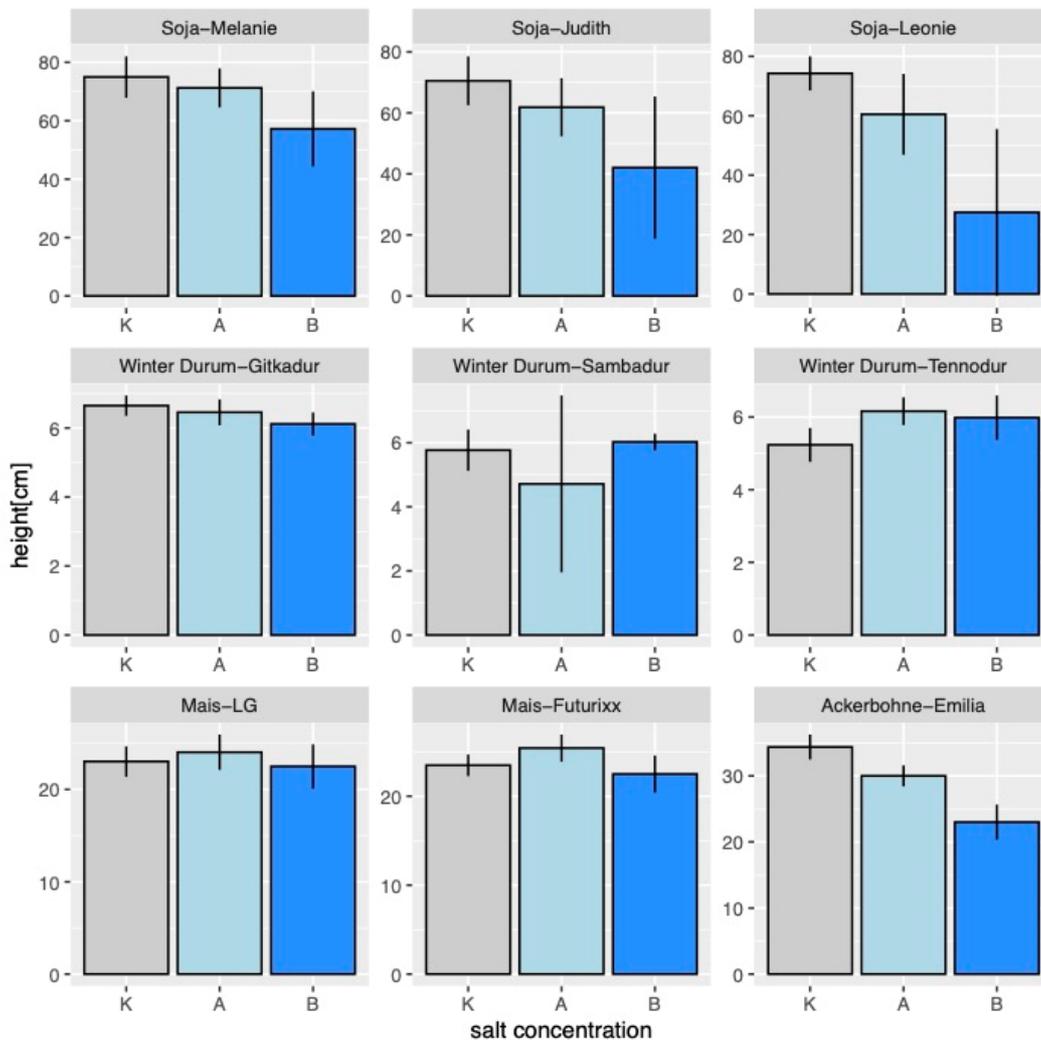


Abbildung 6: Durchschnittliche **Höhe der Sprossachsen**, K_ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden

Tabelle 11: Durchschnittlichen **Höhe der Sprossachsen** in [Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Girkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
A	95	88	82	98	81	119	104	108	87
B	76	60	37	94	103	115	98	96	67

3.2.4.5 Blattflächen auf lehmigem Boden

Auch die Blattflächen zeigten auf lehmigem Boden ein ähnliches Muster wie die Biomassen und die Sprosslängen mit einer klaren Abnahme mit steigender Salzkonzentration bei Sojabohne und Ackerbohne (Abbildung 7 und Tabelle 12).

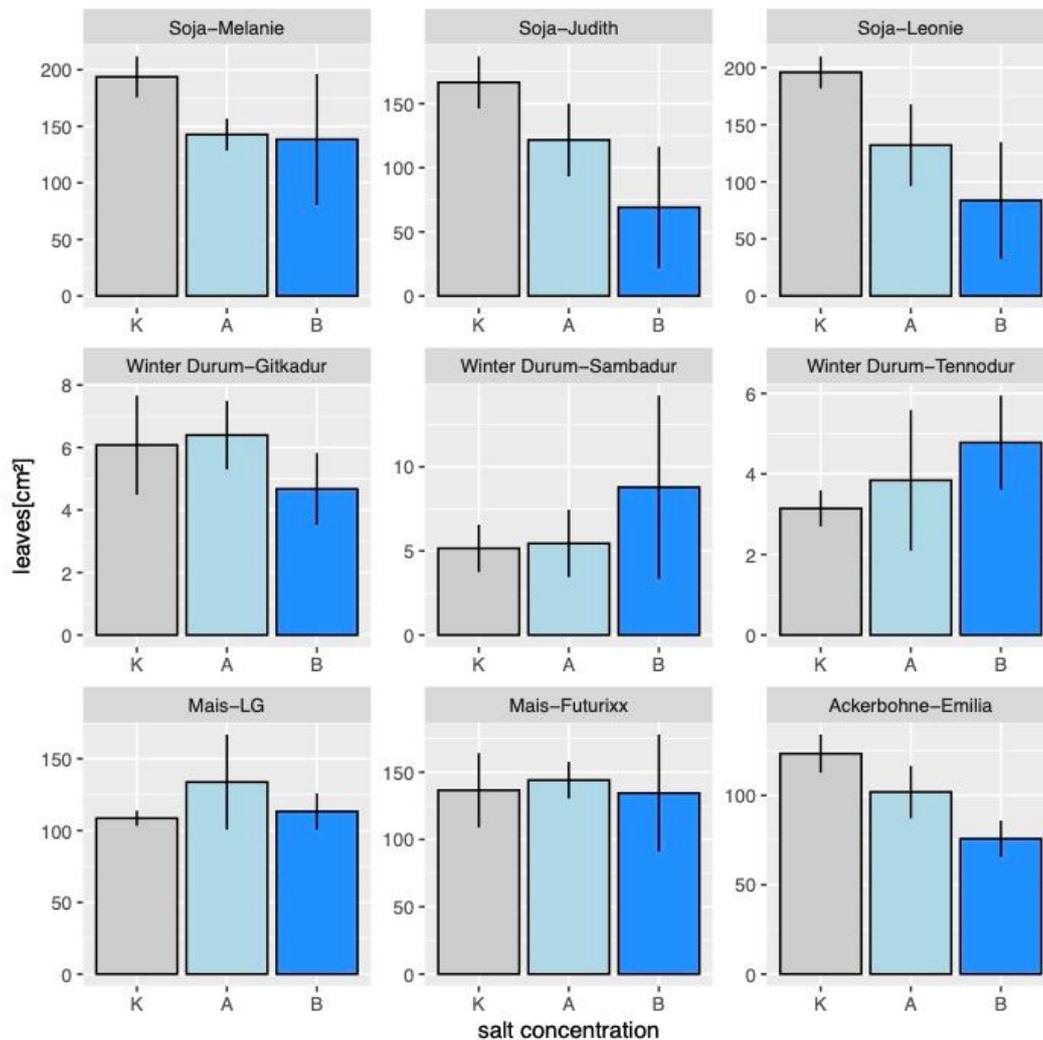


Abbildung 7: **Blattfläche** pro Topf in cm^2 , K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden.

Tabelle 12: **Blattfläche** pro Topf in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Girkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	
A	74	73	67	105	104	123	123	105	83
B	72	42	43	77	169	155	104	98	61

3.2.4.6 Chlorophyllgehalt auf lehmigem Boden

Die Werte für den Chlorophyllgehalt zeigten insgesamt eine sehr große Streuung. Am ehesten kann hier auch wieder bei den drei Sorten der Sojabohne eine Abnahme mit steigenden Salzkonzentrationen abgeleitet werden. (Abbildung 8 und Tabelle 13).

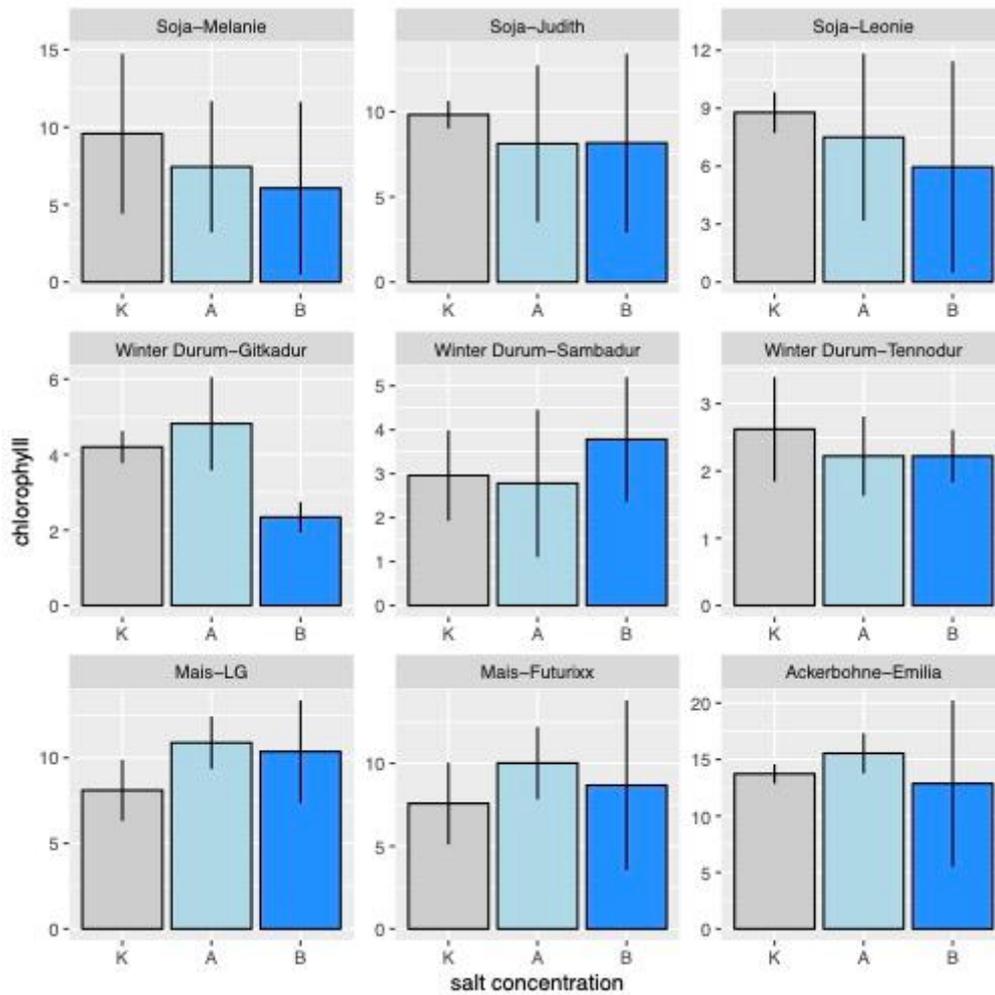


Abbildung 8: **Chlorophyllgehalt** pro Topf [$\mu\text{mol/m}^2$], K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden

Tabelle 13: **Chlorophyllgehalt** pro Topf in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Girkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
A	78	83	85	115	94	85	134	132	113
B	63	83	68	56	128	85	128	115	94

3.2.4.7 Keimraten auf sandigem Boden

Im Hauptversuch mit sandigem Boden zeigen ebenfalls Sojabohne und Ackerbohne die stärksten Abnahmen mit steigender Salzkonzentration, wobei bei der Sojabohnensorte „Judith“ bereits die Kontrolle eine sehr geringe Keimrate zeigte und eine relative Abnahme daher nicht gezeigt werden konnte (Abbildung 9 und Tabelle 14).

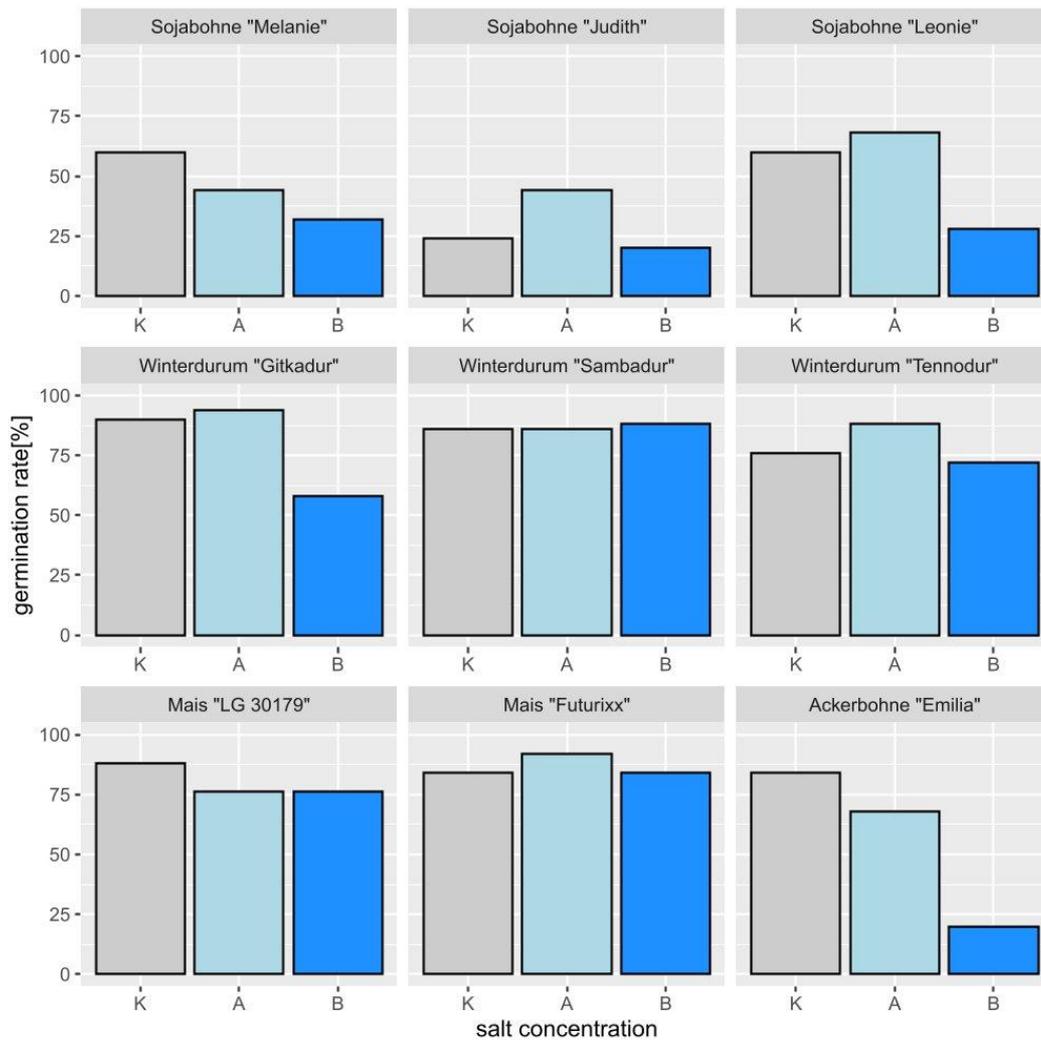


Abbildung 9: **Keimraten** (gekeimte Samen in Prozent der gesäten Samen: 10 Stk. bei Durum Sorten und je 5 Stk bei Sojabohne, Mais und Ackerbohnen Sorten), K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Anzahl der Wiederholungen jeweils 5; sandiger Boden.

Tabelle 14: **Keimraten** in [%], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
K	60	24	60	90	86	76	88	84	84
A	44	44	68	94	86	88	76	92	68
B	32	20	28	58	88	72	76	84	20

Bei der Winterdurumsorte „Gitkadur“ und der Maissorte „LG30179“ war jeweils bei der höheren Salzkonzentration eine leichte Abnahme der Keimrate feststellbar. Die übrigen Winterdurum- und Maissorten zeigten dagegen keine negativen Effekte der Salzkonzentrationen auf die Keimraten.

3.2.4.8 Frischgewicht auf sandigem Boden

Im Gegensatz zum lehmigen Boden zeigten die drei Sorten der Sojabohne und die getestete Ackerbohne in Bezug auf die oberirdische Biomasse in sandigem Boden eine geringere Empfindlichkeit als Winterdurum und Mais (Abbildung 10, Tabelle 15 und Tabelle 16).

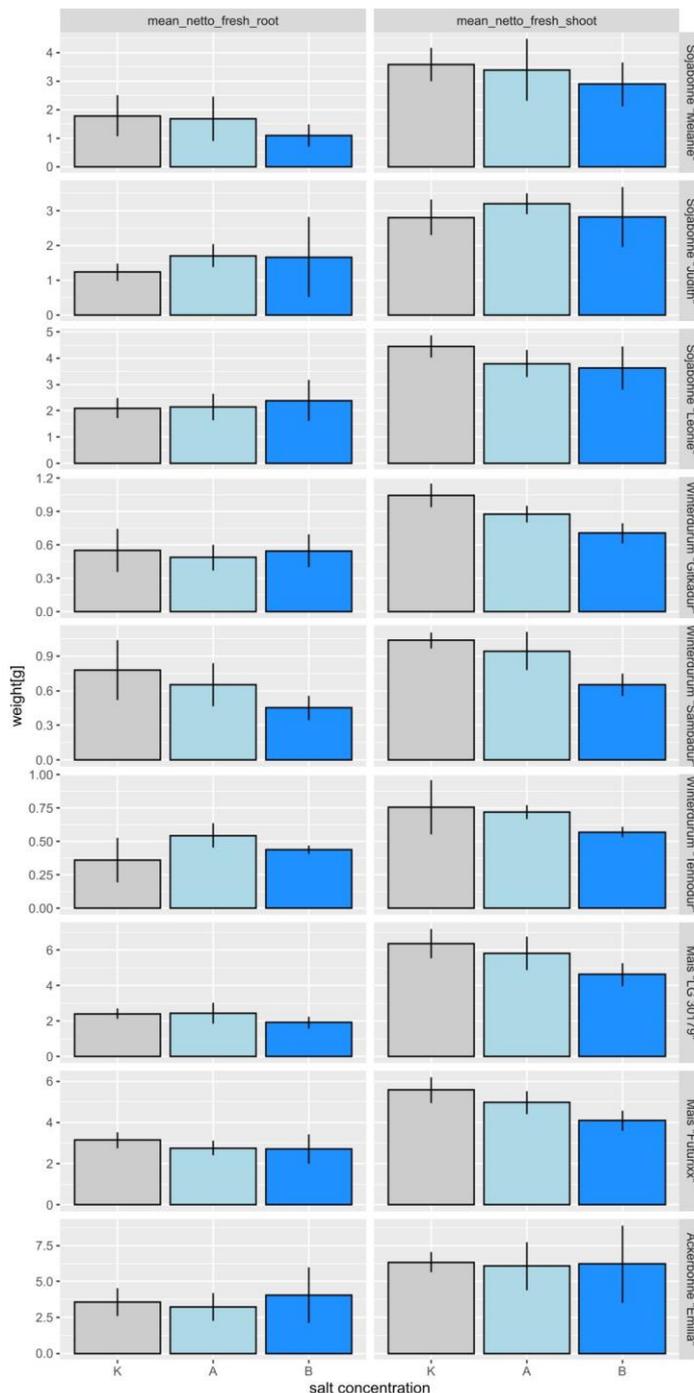


Abbildung 10: **Frischgewicht der Wurzeln und der Sprossachse** in [g], K_ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.

Tabelle 15: Frischgewicht der Sprossachse in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	
A	95	114	86	84	90	95	91	89	96
B	80	101	82	68	63	75	73	73	98

Tabelle 16: Frischgewicht der Wurzeln Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	
A	93	138	102	89	83	153	100	88	91
B	61	136	114	100	58	122	79	87	114

Die Änderungen in den Wurzelbiomassen waren allerdings nicht immer positiv korreliert mit den Sprossbiomassen. So zeigte sich etwa bei den Winterdurumsorten „Gitkadur“ und „Tennodur“ keine abnehmenden Wurzelbiomassen mit steigender Salzkonzentration.

3.2.4.9 Trockengewicht auf sandigem Boden

Das Trockengewicht der Sprossachse nahm bei allen untersuchten Sorten mit steigender Salzkonzentration in einem ähnlichen Ausmaß ab. Eine Ausnahme war hier die Sojabohnensorte „Judith“, die erst bei der höheren Salzkonzentration im Vergleich zur Kontrolle eine Abnahme zeigte. Ebenso wie bei der Frischmasse zeigte die Wurzeltrockenmasse in den meisten sorten keine direkte Korrelation mit der Sprosstrockenmasse (Abbildung 11, Tabelle 17 und Tabelle 18).

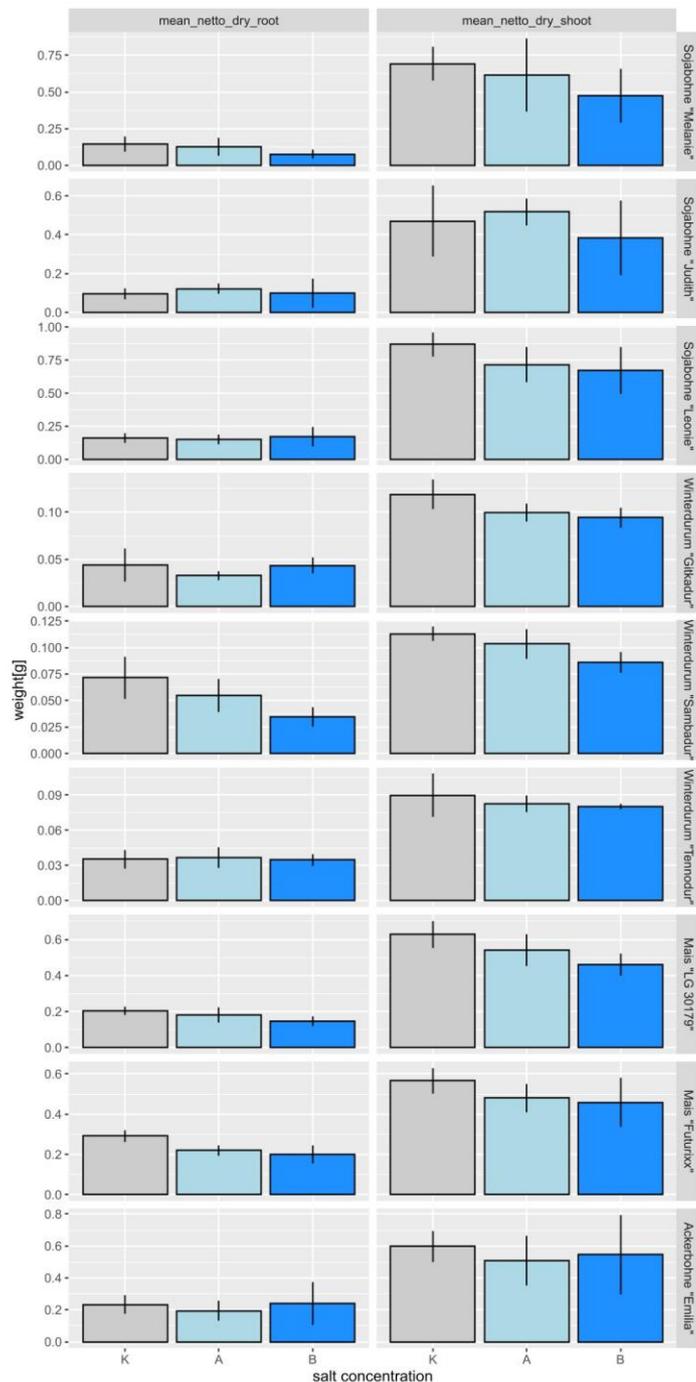


Abbildung 11: **Trockengewicht der Wurzeln und der Sprossachse**, K_█ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_█ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_█ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.

Tabelle 17: Trockengewicht der Sprossachse in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
A	90	111	83	83	91	89	86	84	85
B	70	81	77	75	82	89	73	81	92

Tabelle 18: Trockengewicht der Wurzeln in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
A	27	120	94	75	86	100	86	76	83
B	17	100	106	100	57	100	71	69	104

3.2.4.10 Sprosslängen auf sandigem Boden

Die mittlere Höhe der Sprossachse zeigte bei allen untersuchten Kulturpflanzen eine ähnliche Reaktion auf steigende Salzkonzentrationen (Abbildung 12 und Tabelle 19).

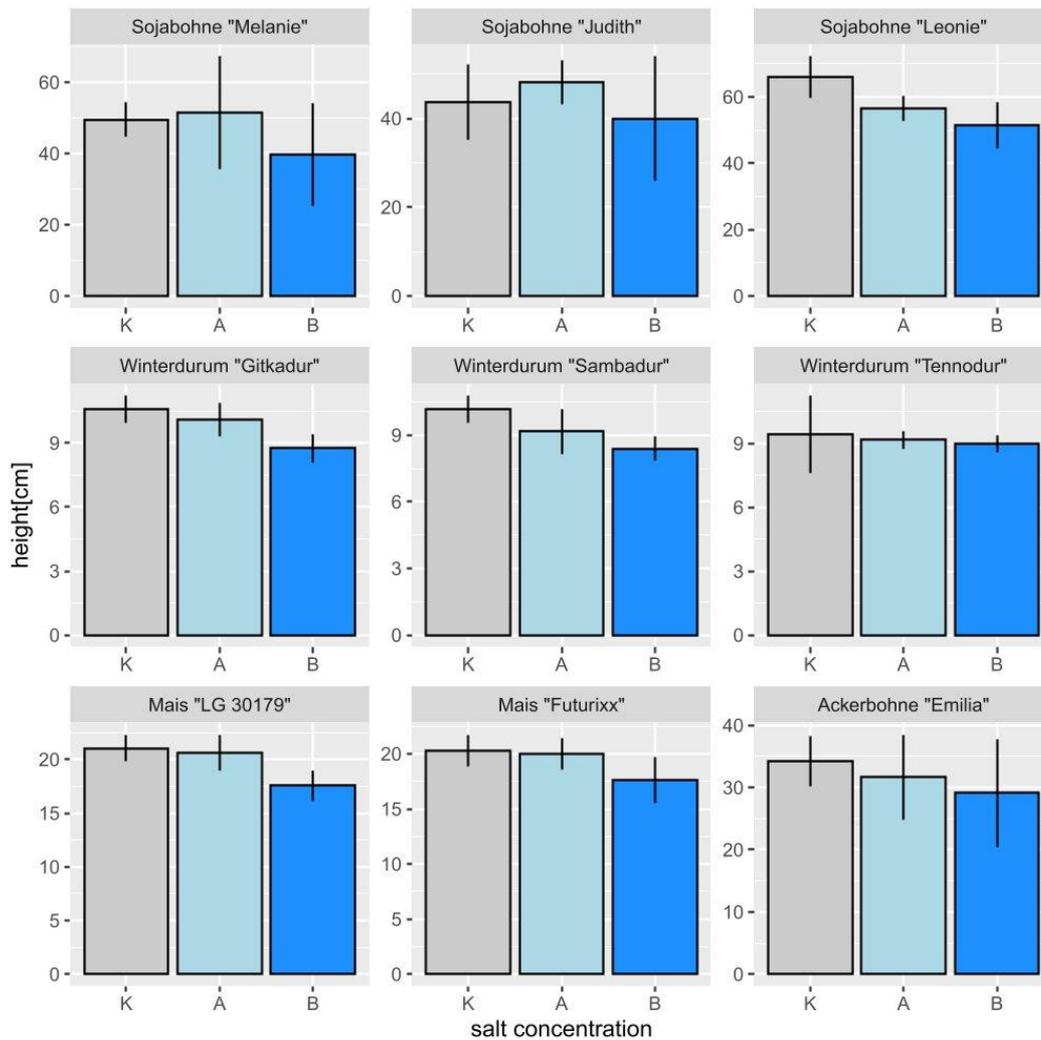


Abbildung 12: Durchschnittliche **Höhe der Sprossachse**, K_ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.

*Tabelle 19: Durchschnittlichen **Höhe der Sprossachse** in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.*

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
A	104	110	86	95	90	90	98	99	92
B	80	91	78	82	82	88	83	87	85

3.2.4.11 Blattflächen auf sandigem Boden

Bei Blattfläche zeigten die beiden Winterdurumsorten „Gitkadur“ und „Sambadur“ die stärkste Abnahme. Im Gegensatz zum lehmigen Boden war im sandigen Boden in allen Kulturpflanzen eine Verringerung der Blattfläche mit zunehmender Salzkonzentration feststellbar (Abbildung 13 und Tabelle 20).

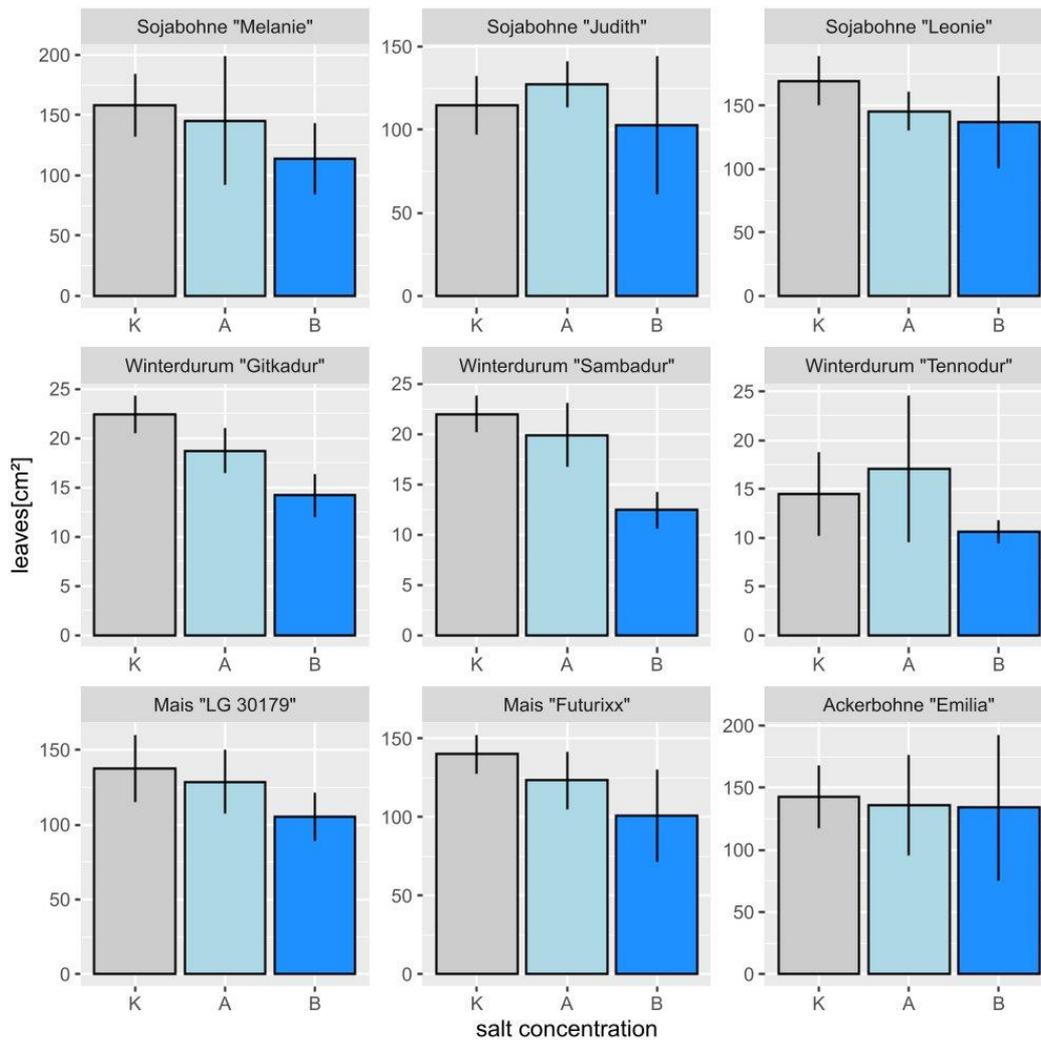


Abbildung 13: **Blattfläche** pro Topf in cm^2 , K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.

Tabelle 20: **Blattfläche** pro Topf in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Gitkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	
A	92	111	86	83	90	118	93	88	95
B	72	90	81	63	56	73	77	72	94

3.2.4.12 Chlorophyllgehalte auf sandigem Boden

Im Experiment mit sandigem Boden wiesen die Werte der Chlorophyllgehalte eine geringere Streuung auf, als im Experiment mit lehmigem Boden. Eine Abnahme des Chlorophyllgehaltes mit steigendem Salzgehalt im Boden war hier bei den Winterdurum- und Maissorten, sowie bei der Sojabohnensorte „Judith“ (nur bei der höheren Salzkonzentration) erkennbar (Abbildung 14 und Tabelle 21).

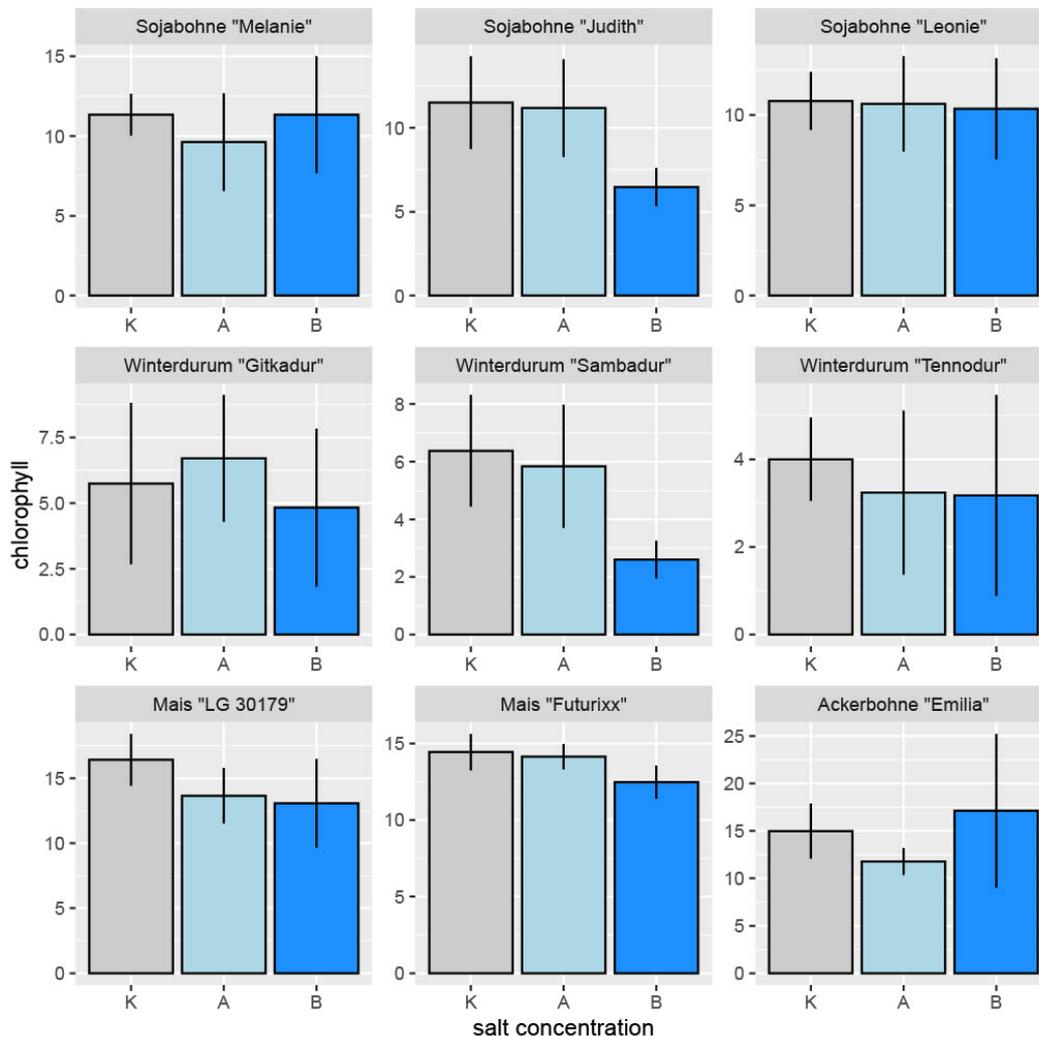


Abbildung 14: **Chlorophyllgehalt** pro Topf [$\mu\text{mol/m}^2$], K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.

Tabelle 21: **Chlorophyllgehalt pro Topf** in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.

Behandlung	Sojabohne			Winterdurum			Mais		Ackerbohne
	Melanie	Judith	Leonie	Girkadur	Sambadur	Tennodur	LG 30179	Futurixx	Emilia
A	85	97	99	117	92	81	83	98	79
B	100	56	96	84	41	80	80	86	114

3.3 Pflanzenwachstumstest mit Material von Standorten

Nach Etablierung der Pflanzenwachstumstests mit salzdotierten Böden wurde dieser mit Böden von realen Standorten durchgeführt. Hierzu wurden im 19. März 2024 vier Proben in der Tiefenstufe 0-20 cm genommen (Tabelle 22).

Tabelle 22: Proben für Pflanzenwachstumstest

Standort	Position	Distanz vom Fahrbahnrand
S36 Aichdorf	Böschungfuß, Höhe Gischtfänger	11 m
S36 Aichdorf	Kontrollpunkt im Feld	~50 m
A8 Ried im Innkreis	Höhe Gischtfänger	12,7 m
A8 Ried im Innkreis	Kontrollpunkt im Feld	~50 m

Die Tests wurden nach der gleichen Methode durchgeführt, wie die Wachstumsversuche mit salzdotierten Böden. Abbildung 15 zeigt die Pflanzen während der Versuchsdurchführung im Glashaus. Als Testpflanzen wurden Mais, Sojabohne und Ackerbohne verwendet.



Abbildung 15: Pflanzen im Glashaus während des Wachstumsversuches mit Bodenmaterial der Standorte S6 und S36.

Weder in der Keimungsrate (Abbildung 16), noch in der Biomasse von Spross und Wurzel (Abbildung 17) zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen dem Boden, der nahe an der Straße (im Bereich der Gischtfänger) genommen wurde und dem Boden vom Kontrollpunkt in rund 50 m Entfernung von der Straße.

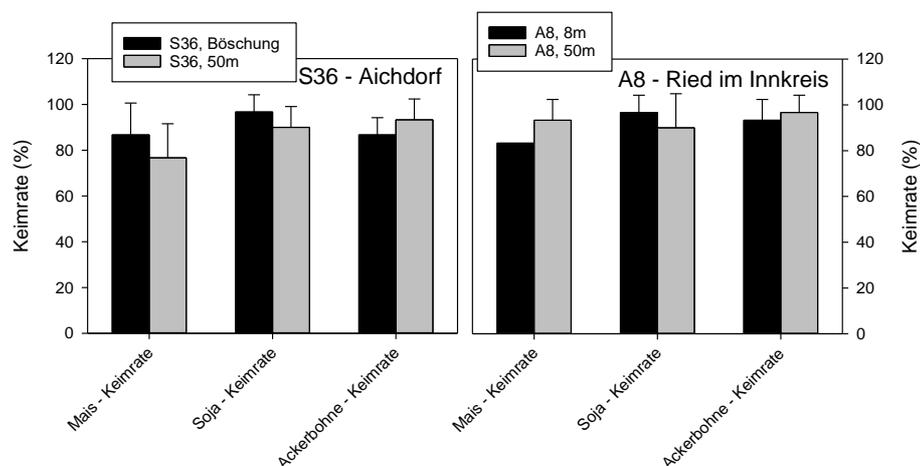


Abbildung 16: Keimraten im Pflanzenwachstumstest mit Bodenmaterial (0-20 cm) von den beiden Versuchsstandorten S36 und A8.

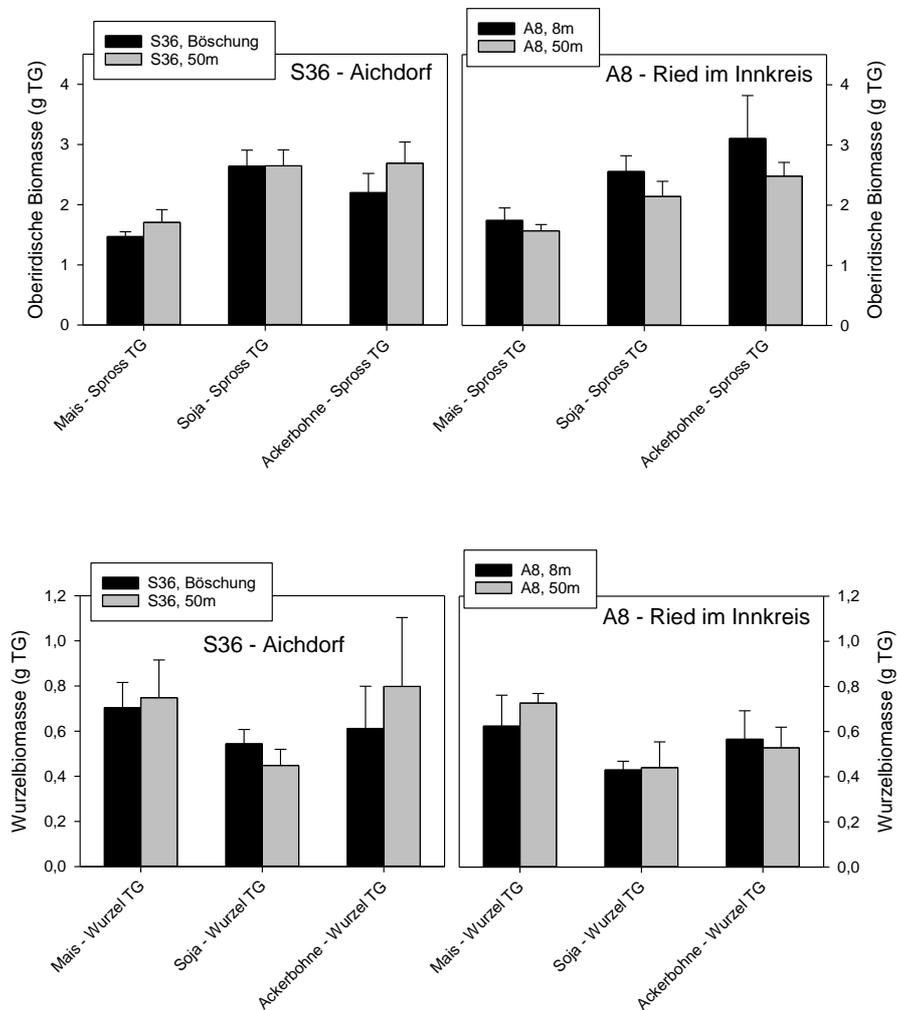


Abbildung 17: Biomassen von Sprossen und Wurzeln (in Gramm Trockengewicht) im Pflanzenwachstumstest mit Bodenmaterial (0-20 cm) von den beiden Versuchsstandorten S36 und A8.

4 Freilanduntersuchungen

4.1 Allgemeines

Dieses Arbeitspaket (AP) bildet das zentrale Element des Projekts. Für die darin enthaltenen Freilanduntersuchungen wurden vier landwirtschaftlich genutzte Versuchsflächen in unmittelbarer Nähe zu Autobahnen und Schnellstraßen ausgewählt.

Konkret handelt es sich dabei um folgende Abschnitte:

- S6 – Allerheiligen im Müritzal (RFB Wien; km 67,6)
- S36 – Zeltweg/Aichdorf (RFB Zeltweg; km 30,6)
- A8 – Ried im Innkreis/Dietarding (RFB Wels; km 56,1)
- S5 – Schmida (RFB Tulln; km 4,75)

Über zwei Winterperioden (1. Winter: 2022/23; 2. Winter 2023/24) und jeweils zur Erlangung von Vergleichsdaten in den darauffolgenden Sommern wurde auf diesen Flächen der Einfluss von Streusalz auf den Boden untersucht, das auf den angrenzenden Hochrangigen Straßen ausgebracht wurde.

Dies erfolgte durch die Entnahme von Bodenproben in verschiedenen Abständen zur Straße (3-4 Entfernungsstufen pro Fläche) und aus unterschiedlichen Tiefenstufen (0 – 20 cm und 20 – 40 cm).

Im ersten Winter wurde zusätzlich ein sogenannter „Transferboden“ untersucht, ein ursprünglich unbeeinflusster Boden aus 50 m Entfernung, der in unmittelbarer Nähe zur Straße versetzt wurde, um seine mögliche Veränderung durch Salzeinwirkung in einer Winterperiode zu erfassen.

Neben der Bodenanalysen wurde auch die Ausbreitung des Salzes durch Gischt, die im Winter von vorbeifahrenden Fahrzeugen auf die Felder spritzt, erfasst. Eine eigens dafür gebaute Konstruktion ermöglichte das Auffangen und in weiterer Folge das Sammeln des Gischtwassers, woraus in regelmäßigen Abständen Wasserproben entnommen wurden. Ab dem zweiten Winter wurde zusätzlich gesammeltes Regenwasser beprobt.

Das Probenahmeintervall betrug in beiden Winterperioden etwa zwei Wochen, wobei die genauen Termine in Abhängigkeit von den Wetterverhältnissen (z.B. nach Schneefall oder Regen) und gegen Ende der Winterperiode durch die Grundeigentümer festgelegt wurden.

Die gesammelten Boden- und Wasserproben wurden anschließend im Labor auf die ausgewählte Parameter Leitfähigkeit, pH-Wert, Chlorid-Konzentration und Wassergehalt untersucht, um Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Streusalz und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Boden treffen zu können (Auswertung siehe Kapitel 5).

Um detaillierte Informationen über die Wetterbedingungen an den Versuchsstandorten zu erhalten, wurden Wetterstationen aufgestellt, die in beiden Wintern die standortspezifischen Daten Niederschlag, Temperatur und Wind elektronisch aufzeichneten. Diese Daten wurden in der Folge in Relation mit den chemischen Daten gesetzt (siehe auch dazu Kapitel 5).

Die Arbeiten der Freilanduntersuchungen, die im Rahmen von AP4 durchgeführt wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Jahr 1:

- Aufbau: Dezember 2022, Abbau Ende März/Anfang April 2023
- Bauteile: 4x Gischtfänger, 2x Bodentransfer, 4x Wetterstation

In der ersten Periode (Winter 2022/23 inkl. Sommer/Herbst 2023) wurden insgesamt 282 Proben gezogen, darunter 29 Wasserproben aus den Gischt- und Regenfängern.

Jahr 2:

- Aufbau: Anfang Dezember 2023, Abbau Ende März/Anfang April 2024
- Bauteile: 4x Gischtfänger, kein Bodentransfer, 4x Wetterstation

In der zweiten Periode (Winter 2023/24 inkl. Sommer 2024) wurden insgesamt 328 Proben entnommen, darunter 61 Wasserproben aus den Gischt- und Regenfängern. Zusätzlich wurden zwei Schneeproben am direkten Fahrbahnrand entnommen, die nach dem Schmelzen wie eine Wasserprobe gehandhabt und analysiert wurden.

Der Abbau der Aufbauten erfolgte in beiden Jahren zwischen März und Anfang April, wobei die genauen Termine in Absprache mit den Landwirten und der Bewirtschaftung der Felder festgelegt wurden.

4.2 Aufbauten

Wie erwähnt wurden im Dezember 2022 bzw. Dezember 2023 die Versuchsfelder für die jeweiligen Untersuchungsperioden vorbereitet. Dazu zählte der Aufbau und das Befestigen der Gischtfänger, die Inbetriebnahme und Umzäunung der Wetterstationen, an welche auch Regenfänger angebracht wurden, sowie das Auspflocken der Probenahmestellen. Im Folgenden werden die einzelnen Bauteile der Versuchsfelder näher beschrieben:

4.2.1 Gischtfänger

Der Gischtfänger ist eine eigens für dieses Projekt konzipierte Installation, die darauf ausgelegt ist, auf einer bestimmten Fläche das von der Straße auf die Versuchsfläche geschleuderte Gischtwasser aufzufangen und zu sammeln. An jedem Standort wurde eine etwa 1,5 m² große Kunststoffplatte mit einer Neigung von ca. 40 Grad (projizierte Bodenfläche durch Neigungswinkel ca. 1,3 m²) mit Gewindestangen, die zuvor in Beton eingelassen wurden, verschraubt und rund 40 cm tief im Boden verankert. Um die Dichtheit der Löcher, die für die Befestigung der Gewindestangen in die Platte gebohrt wurden, sicherzustellen, wurde ein spezieller Klebstoff aufgetragen, um Verluste vorzubeugen. Die Auffangplatte ist am unteren Ende gebogen und zu einer Rinne geformt, um das gesammelte Gischtwasser in eine Auffangbox zu leiten, die neben der Platte im Boden platziert ist. Bei der Auffangbox handelte es sich ursprünglich um eine herkömmliche Kunststoffbox, deren Fassungsvermögen bereits im Laufe der ersten Untersuchungsperiode von 8 Liter auf 32 Liter erhöht werden musste. So sollte ein Überlaufen der Box innerhalb des zweiwöchigen Probenahmeintervalls verhindert werden.

Im zweiten Winter wurden dehnbare Körbe (aus Silikon) mit einem Fassungsvermögen von ca. 30 Litern verwendet, die besser in der Lage waren, die Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren aufzunehmen, ohne Risse zu bilden. Unter dem Auffanggefäß wurde noch eine weitere Box platziert, die die Probenahme bei kälteren Temperaturen erleichtern sollte und durch ihre Perforation das Versickern von überschüssigem Wasser ermöglichte.



Abbildung 18: Aufbau des Gischtfängers: Vergraben der Gewindestangen (links) und Auffangplatte (rechts)



Abbildung 19: fertig aufgebauter Gischtfänger 1. Winter (links) und fertig aufgebauter Gischtfänger 2. Winter (rechts)

4.2.2 Regenfänger

Um Aussagen über die chemische Zusammensetzung des örtlichen Regenwassers treffen und mit den Analytikergebnissen der Gischt vergleichen zu können, wurde am Ende des ersten Winters bzw. zu Beginn des zweiten Winters ein Regenfänger installiert. Im ersten Jahr bestand dieser aus einer einfachen Kunststoffbox, die innerhalb der Umzäunung der Wetterstation aufgestellt wurde. Im zweiten Winter wurden aus Silikon bestehende 10-Liter-Kübel verwendet, die – ähnlich wie die Auffangbehälter des Gischtfängers – der Ausdehnung beim Gefrieren standhalten sollten. Diese Kübel wurden am Zaun der Wetterstation befestigt (siehe Abbildung 20).

4.2.3 Wetterstation

Für den Aufbau der Wetterstation (Vantage Vue Sensor Suite & Konsole – Davis©) wurde ein 3 Meter langes Eisenrohr mit einem Durchmesser von 33 mm etwa 1 Meter tief in den Boden geschlagen und zusätzlich mit einem Bauzaunfuß stabilisiert. Als Umzäunung kam ein herkömmlicher Bauzaun zum Einsatz, der mit Eisenschellen versperrt wurde. Um Diebstahl und Vandalismus zu verhindern, wurden an den Zaunsegmenten Warnhinweise und Betretungsverbotsschilder angebracht.

Die Konsole der Wetterstation wurde zu Beginn des ersten Winters in einer Metallbox innerhalb des Bauzauns gelagert, die mit einem Zahlenschloss gesichert war. Um die Stromversorgung der Wetterstationskonsole unabhängig von den eingebauten Batterien zu gewährleisten, wurden noch im ersten Winter Solarpaneele (Davis Solar Power Kit 6614) installiert, die gleichzeitig als Aufbewahrungsort für die Konsole dienten. Im Winter 2023/2024 wurden alle vier Wetterstationen bereits von Beginn an mit Sonnenenergie betrieben.

Als Intervall, in welchem die Wetterdaten aufgezeichnet werden sollten, wurden 10 min gewählt. Ein Auslesen der dementsprechend großen Datenmenge war im Rahmen der Probenahmen aufgrund der begrenzten Speicherkapazität des Datenloggers notwendig.



Abbildung 20: Wetterstation 1. Winter (links) und Wetterstation inkl. Solarpaneel und Regenfänger vom 2. Winter (rechts)

4.2.4 Transferboden

Im Dezember 2022 wurden mithilfe eines speziell angefertigten Stechzylinders (Durchmesser 30–40 cm) Bodenmonolithen aus einem etwa 40–50 Meter vom Straßenrand entfernten Bereich –als salzunbeeinflusst angenommen – entnommen und in den Einflussbereich der Straße verbracht. Eine fortlaufende Beprobung sollte mögliche Veränderungen durch das Salz im Zeitverlauf aufzeigen. Aufgrund der in Kapitel 5 angeführten Gründe wurde die Untersuchung des Transferbodens im zweiten Winter nicht fortgesetzt.

4.3 Probennahmen

4.3.1 Probenahmestellen

Für jede Fläche wurden Bodenproben aus drei bis vier unterschiedlichen Entfernungsstufen zur Fahrbahn entnommen. Dabei verteilten sich die ersten drei Entfernungsstufen bei allen Flächen auf einen Bereich von maximal 11 Meter ab dem Ende der asphaltieren Straße (inkl. Standstreifen) bzw. auf maximal rund 14 Meter vom Ende der Fahrbahn. Die Referenzproben, die den als salzunbeeinflusst angenommenen Boden repräsentierten, wurden bei allen Flächen im Feld rund 50 Meter von der Straße entfernt, entnommen. Daraus ergeben sich, zusammengefasst für alle Flächen, folgende Bereiche:

Tabelle 23: Entfernungsbereiche, aus denen Bodenproben gezogen wurden

	Entfernung zum Pannstreifen ¹ [m]	Entfernung zum Fahrbahnrand ² [m]
1.Entfernungsbereich	3 – 4	5 – 8
2.Entfernungsbereich	7 – 8	10 – 11
3.Entfernungsbereich	9 – 11	13 – 14
Referenz	~ 50	

¹ \triangleq Ende der asphaltieren Fläche

² \triangleq durchgezogene Linie zur Begrenzung der Fahrbahn

Die genauen Positionen der Probenahmestellen wurden zu Beginn der ersten Periode unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten wie Böschungen, Gräben und Umzäunungen für jede Fläche einzeln festgelegt. Daraus resultieren flächenspezifische Entfernungsstufen, deren exakte Meterangaben in Kapitel 4 angeführt.

Die Koordinaten der Probenahmestellen wurden mithilfe eines GPS-Geräts erfasst. Dies ermöglichte eine präzise Lokalisierung der Probenahmestellen in der zweiten Untersuchungsperiode, wodurch man, abgesehen von kleineren Anpassungen (z.B. Einführung einer zusätzlichen Entfernungsstufe bei der A8), an den gleichen Positionen des Vorjahres die Proben ziehen konnte, um die Werte exakt in Bezug bringen zu können. Die PN-Stellen wurden zu Beginn jedes Winters mit beschrifteten Holzpflocken markiert.



Abbildung 21: Bereiche, aus denen bereits Proben entnommen wurden, begrenzt durch beschriftete Holzpflocke

So wurde nicht nur die Entnahme bei immer gleicher Entfernung zur Autobahn garantiert, sondern Mehrfachbeprobung des exakt gleichen (und bereits umgegrabenen) Materials verhindert. Bei jeder Entfernungsstufe wurde die bereits untersuchte Stelle rechts und links mit je einem Pflock eingegrenzt. Nach jeder Probenahme, die entweder links oder rechts außerhalb dieser Begrenzungen stattfand, erweiterte sich der beprobte Bereich und die Markierungen wurden entsprechend nachgesetzt.

Als Summenparameter für die Salzbelastung wurde am Ende jedes Winters eine zusätzliche Probe unter der Auffangbox des Gischtfängers entnommen. Diese Proben repräsentieren die überschüssige Gischt, die nicht ins Labor zur Analytik mitgenommen wurde (tw. zu große Wassermengen): das Wasser wurde unter der Auffangbox ausgeleert und versickert.

Zusätzlich wurden noch die absoluten Höhen der Probenahmebereiche mittels Nivellement vermessen, um die Lage der Probenahmestellen im höhenmäßigen Vergleich zur Fahrbahn zu bestimmen. Die Positionen und Höhenverteilung (Schnitte) der Probenahmestellen sind für jede Fläche in einem Lageplan dokumentiert (siehe Anlage 4).

4.3.2 Boden-Probenahme

Wie bereits erläutert, wurde bei jeder Probenahme Material außerhalb der mit Holzpflocken markierten Probenahmestellen entnommen.

Ein Bodenvolumen von 20 x 20 cm mit einer Tiefe von 20 cm wurde mit einem Spaten ausgehoben und in einen vorbereiteten blauen Kübel transferiert. In diesem wurde das Material gründlich gemischt, bevor eine Teilmenge in weiße, mit Etiketten beschriftete und verschließbare 2l-Kunststoffkübel gefüllt wurde, die zur Analyse ins Labor gebracht wurden. Nachdem die obersten 20 cm Boden beprobt waren (Überprüfung bei jeder Probenahme mit einem Maßband, fotografisch festgehalten), wurde auf ein anderes Bodenentnahmegerät gewechselt, dessen Gewinde sich durch manuelles Drehen in die tiefere Bodenschicht bohrte. Eine Markierung am Gerät indizierte das Erreichen der gewünschten Tiefe von 40 cm an, woraufhin das Gewinde durch Gegendrehen wieder herausgenommen wurde. Die im Gewinde angesammelte Erde wurde über einem bereitgestellten roten Kübel gelöst. Auch diese Tiefenstufe (20 – 40 cm) wurde nach dem Mischen für den Transport ins Labor in beschriftete Gefäße überführt.

Durch die Festlegung der Farben der Kübel (Blau und Rot) auf die jeweilige Tiefenstufe konnte bei der Fülle an Arbeiten im Feld ein Vertauschen der Tiefenstufen verhindert werden.

Die Bodenentnahme, einschließlich der verwendeten Geräte, ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Probenahme galt als abgeschlossen, sobald die

Materialentnahme durch Fotos bzw. Probenahmeprotokolle dokumentiert und der ursprüngliche Zustand des Feldes oder der Wiese möglichst wiederhergestellt war. Dazu wurde das Loch mit übrig gebliebener Erde zugeschüttet, wobei bei Grünland-Probenahmestellen darauf geachtet wurde, dass die Grasnarbe als oberste Schicht wieder aufgesetzt wurde.

In der beschriebenen Art und Weise wurde bei allen drei bzw. vier Entfernungsstufen pro Fläche verfahren. Am Ende jedes Winters wurde wie bereits erwähnt auch eine Bodenprobe unter der Gischt-Auffangbox für die Analyse entnommen. Hier erfolgte die Beprobung nur in der Tiefenstufe bis 20 cm unter der Box, da diese ja bereits abgesenkt war.



Abbildung 22: Darstellung der Bodenprobenahme. Aushub des ersten Bodenhorizontes (0 – 20 cm) mittels Spaten und Transfer in blauen Kübel (oben links); Fortsetzung ab einer Tiefe von 20 cm mit händischem Drillgerät und rotem Kübel für Boden von 20 – 40 cm (oben rechts); entnommenes Material in Probenahmegebünde (unten)



Abbildung 23: Übersicht aller im Rahmen eines Probenahmetermins benötigten Equipment

4.3.3 Wasser-Probenahme

Die vom Gischtfänger aufgefangene und durch etwaiges Niederschlagswasser verdünnte Gischte sammelte sich im zweiwöchigen Probenahmeintervall in der neben dem Gischtfänger installierten Auffangbox. War der Inhalt flüssig, konnte das Wasser gemischt, mit einem Gefäß entnommen und durch ein Sieb, das partikuläre Verunreinigungen abtrennte, mithilfe eines Trichters in beschriftete Glasflaschen gefüllt werden. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt musste das Eis in der Box mit einem Hammer zerkleinert werden, bevor es nach dem Schmelzen bzw. unter der Eisschicht in Flaschen transferiert wurde. Die überschüssigen Anteile, sowohl von flüssigem Wasser als auch von Eis, wurden in der Mulde neben bzw.



Abbildung 24: Regenfänger mit sichtbaren Verunreinigungen

unter dem Gischtfänger versickert, in der zum Schluss wieder die entleerte Auffangbox platziert und fixiert wurde.

Im Laufe des ersten Winters kam zur Gischtfänger-Probenahme noch jene des Regenfängers hinzu, bei der im Prinzip gleich vorgegangen wurde wie beim Gischtfänger. Auch dieser wurde nach der Entnahme der Probe entleert.

Der Füllstand des Gischte- sowie Regenfängers beim Eintreffen auf der Fläche sowie teilweise sichtbarer Eintrag von organischem Material (siehe Abbildung 24) wurden schriftlich in Probenahmeprotokollen und in Form von Fotos festgehalten. Gemeinsam mit anderen als relevant erachteten Auffälligkeiten werden diese

Informationen für die einzelnen Probenahmen in Tabellenform in Anlage 5 gelistet.



Abbildung 25: Durchmischung des Inhalts der Gischtfänger-Auffangbox (links) und Transfer über Trichter in Sieb in etikettierte Probeflasche (rechts)

4.3.4 Auslesen der Wetterdaten

Im Zuge jedes Probenahmetermins wurden weiters die in der Konsole der Wetterstation vorübergehend gespeicherten Daten der letzten beiden Wochen auf einen mitgebrachten Laptop übertragen. Die Konsole wurde dafür aus dem Gehäuse des Solarpaneels genommen und die Werte mithilfe der zugehörigen Software WeatherLink (Version 6.0.5) ausgelesen.



Abbildung 26: Solarpaneel und Aufbewahrungsort der Konsole von innen (links) und Vor-Ort-Auslesen der Wetterdaten (rechts)

4.4 Versuchsflächen

Im folgenden Kapitel werden die vier ausgewählten Versuchsflächen und deren spezifische Charakteristika genauer beschrieben. Eine Übersicht über die lokalen Gegebenheiten bieten auch die für alle Flächen angefertigten Lagepläne (siehe Anlage 4). Tabellen mit den einzelnen Probenahmeterminen für beide Winter sind im Anhang zu finden (siehe Anlage 5).

4.4.1 S36 Zeltweg/Aichdorf

Eine der beiden in der Obersteiermark ausgewählten Flächen liegt, nur durch eine Böschung von der S36 Murtal Schnellstraße getrennt, neben dem Fahrbahnabschnitt Richtung Zeltweg bzw. Wien bei Kilometer 30,6. Die nächstgelegene Ortschaft ist Aichdorf (PLZ: 8753), nur wenige Autominuten von Zeltweg entfernt.

Eckdaten der Versuchsfläche:

- Koordinaten (GK M34):
 - o Rechtswert: - 122949,203
 - o Hochwert: 229123,314
- Böschungshöhe: ~ 1,9 m
- Bodenbeschaffenheit: locker, humos, Braunerde
- Nutzung: Futterwiese (in den letzten Jahren)
- Beobachtungen des Landwirtes: Schneeschmelze im Bereich des Zaunes
- Wühlmäuse verursachten Auflockerung des Bodens, insbesondere an der Böschung

Da der Bereich zwischen Zaun und Fahrbahn nur während der ersten Untersuchungsperiode zugänglich war, wurde die 1. Entfernungsstufe im zweiten Winter auf den vom Zaun feldseitigen Teil der Böschung verschoben.

Tabelle 24: Entfernungsstufen S36

	Entfernung vom Pannestreifen ¹ [m]		Entfernung vom Fahrbahnrand ² [m]		Breite Pannestreifen [m]	Anmerkung
	1. Winter	2. Winter	1. Winter	2. Winter		
1. Entfernungsstufe	3	4	7	8	≈ 4 ³	Böschung
2. Entfernungsstufe	7	7	11	11		Böschungsfuß, Höhe Gischtfänger
3. Entfernungsstufe	-	-	-	-		-
Referenz	~ 50					

¹ ≙ Ende der asphaltierten Fläche

² ≙ durchgezogene Linie zur Begrenzung der Fahrbahn

³ laut GIS-Steiermark



Abbildung 27: Übersichtsfoto S36 Zeltweg, aufgenommen im Dezember 2023 (50-Meter-PN-Stelle nicht sichtbar)

4.4.2 S5 Schmida

Bei dieser Versuchsfläche handelt es sich um ein ackerbaulich vielfältig genutztes Feld, das sich in unmittelbarer Nähe der S5 Stockerauer Schnellstraße bei Kilometer 4,75 m in Richtung Tulln befindet. Die Fläche befindet sich im Gemeindegebiet von Schmida (PLZ: 3464) in Niederösterreich, rund 40 Kilometer von Wien entfernt.

Eckdaten der Versuchsfläche:

- Koordinaten (GK M34):
 - o Rechtswert: -15780,512
 - o Hochwert: 359256,278
- Böschungshöhe: ~ 1,3 m
- Bodenbeschaffenheit: Braunerde, geringer humoser Anteil (3-5%), kaum Steine/Kies
- Nutzung: Zuckerrüben (Sommer 2024), Mais (Sommer 2023); davor Knoblauch & Winterweizen

Die Proben wurden hier in beiden Untersuchungsperioden an den exakt gleichen Stellen gezogen. Einzige Ausnahme war der Sommer 2024, hier wurden die Proben teilweise nicht im Feld, sondern seitlich davon entnommen, um die zu dem Zeitpunkt vorhandenen Zuckerrüben nicht zu beschädigen.

Tabelle 25: Entfernungsstufen S5

	Entfernung vom Pannestreifen ¹ [m]		Entfernung vom Fahrbahnrand ² [m]		Breite Pannestreifen [m]	Anmerkung
	1. Winter	2. Winter	1. Winter	2. Winter		
1. Entfernungsstufe	4,25	4,25	7	7	2,75	beim Zaun feldseitig
2. Entfernungsstufe	7,25	7,25	10	10		Höhe Gischtfänger
3. Entfernungsstufe	-	-	-	-		-
Referenz	~ 50					

¹ ≙ Ende der asphaltierten Fläche

² ≙ durchgezogene Linie zur Begrenzung der Fahrbahn



Abbildung 28: Übersichtsfoto Fläche S5 (50-Meter-PN-Stelle nicht sichtbar), aufgenommen im März 2024

4.4.3 A8 Ried im Innkreis

Neben dem Autobahnabschnitt der A8 Inntal Autobahn liegt bei Kilometer 56,1 (Richtungsfahrbahn Wels) die einzige Versuchsfläche in Oberösterreich. Das Grundstück liegt auf dem Gemeindegebiet Utzenaich zwischen den Orten Dietarding und Steingreß. Die nächstgrößere Stadt, Ried im Innkreis, ist rund zehn Autominuten entfernt.

Eckdaten der Versuchsfläche:

- Koordinaten (GK M34):
 - o Rechtswert: -210296,075
 - o Hochwert: 351539,565
- Graben zwischen Autobahn und Feld
- Gefälle in Richtung Straße
- Bodenbeschaffenheit: Anschüttung (bei PN-Stelle zwischen Fahrbahn und Zaun); sonst Braunerde, leicht schluffig, oft Wasseransammlungen im Feld im Bereich des Zaunes, die aufgrund des bereits gesättigten Bodens und/oder Verdichtungen nicht mehr versickern konnten
- Nutzung: Hafer (Sommer 2024), Mais (Sommer 2023); davor Wintergerste + Begrünung im Herbst

Zwischen den beiden Wintersaisons wurden Bauarbeiten an diesem Autobahnabschnitt vorgenommen, im Zuge derer es zu einer Verbreiterung des Pannestreifens kam. Im zweiten Winter wurde eine weitere Beprobung des Drainagegrabens feldseitig des Zaunes als zusätzliche Entfernungsstufe mitaufgenommen.

Tabelle 26: Entfernungsstufen A8

	Entfernung vom Pannestreifen ¹ [m]		Entfernung vom Fahrbahnrand ² [m]		Breite Pannestreifen [m]		Anmerkung
	1. Winter	2. Winter	1. Winter	2. Winter	1. Winter	2. Winter	
1. Entfernungsstufe	2,9	2,7	5,6	6,6	2,7	3,9	Graben zwischen Straße und Feld
2. Entfernungsstufe	-	7,5	-	11,4			Drainagegraben Feld
3. Entfernungsstufe	10,9	8,8	13,6	12,7			Höhe Gischtfänger
Referenz	~ 50						

¹ ≙ Ende der asphaltierten Fläche

² ≙ durchgezogene Linie zur Begrenzung der Fahrbahn



Abbildung 29: Übersichtsfoto A8, aufgenommen im April 2024

4.4.4 S6 Allerheiligen im Mürztal

In Allerheiligen im Mürztal befindet sich eine weitere Fläche in der Obersteiermark. Diese liegt südlich der S6 Semmering Schnellstraße bei Kilometer 67,6.

Eckdaten der Versuchsfläche:

- Koordinaten (GK M34):
 - o Rechtswert: - 71105,48
 - o Hochwert: 259610,23
- Graben zwischen Straße und Fläche
- Bodenbeschaffenheit: Anschüttung (Grobkies) bei Probenahmestelle zwischen Fahrbahn und Zaun; sonst Humus, Braunerde
- Nutzung: Mais (Sommer 2024), Futterwiese (die Jahre davor)

Die Entfernungsstufen blieben bei beiden Untersuchungsperioden unverändert.

Tabelle 27: Entfernungsstufen S6

	Entfernung vom Pannestreifen ¹ [m]		Entfernung vom Fahrbahnrand ² [m]		Breite Pannestreifen [m]	Anmerkung
	1. Winter	2. Winter	1. Winter	2. Winter		
1. Entfernungsstufe	2,6	3,5	5,1	6	≈ 2,5 ³	Graben zwischen Straße und Wiese
2. Entfernungsstufe	6,75	6,75	9,25	9,25		feldseitig beim Zaun
3. Entfernungsstufe	10	10	12,5	12,5		Höhe Gischtfänger
Referenz	~ 50					

¹ ≙ Ende der asphaltierten Fläche

² ≙ durchgezogene Linie zur Begrenzung der Fahrbahn

³ laut GIS-Steiermark



Abbildung 30: Übersichtfoto S6, aufgenommen im März 2024

5 Messergebnisse aus zwei Untersuchungsperioden

Alle Messergebnisse sind sowohl in grafischer als auch in tabellarischer Form im Anhang zu finden (siehe Anlage 6 und Anlage 7). In diesem Kapitel werden aus den Verlaufsdiagrammen der gemessenen Parameter allgemeine Trends aus dem zweijährigen Untersuchungszeitraum abgeleitet und auf flächenspezifisch auffällige Werte wird näher eingegangen. Die Ergebnisse der Parameter zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit wie Leitfähigkeit und Chlorid-Gehalt werden in Zusammenhang mit den Streuereignissen und Witterungsverhältnissen gebracht.

Die ausführliche Beschreibung der beobachteten Effekte wird nachfolgend beispielhaft mit der Fläche neben der S36 durchgeführt.

5.1 S36 Zeltweg/Aichdorf

Der Boden der Fläche neben der S36 wies in beiden Versuchsperioden die höchste Leitfähigkeit der vier untersuchten Standorte auf.

Mit einem Maximalwert von 1900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im ersten Winter (5. Probenahme), lag die elektrische Leitfähigkeit hier kurzfristig in einem Bereich, der für bestimmte Pflanzenarten als problematisch anzusehen ist (siehe Schwellenwerte in Kapitel 1), wobei dieser Wert in der vegetationsfreien Zeit auftrat. Im weniger streuintensiven zweiten Winter lag der höchste Messwert bei 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Beide Proben stammen aus dem Boden am Hang der Böschung, der sieben Meter von der Fahrbahn entfernt ist (erste, beprobte Entfernungsstufe) und somit am äußeren Rand des Feldes liegt. Dass die 1900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im ersten Winter in der tieferen, beprobten Schicht von 20 – 40 cm nachgewiesen wurden, deutet auf eine rasche vertikale Verlagerung des Salzes hin.

Entscheidend für die Beurteilung der tatsächlichen Auswirkung des Streusalzes auf das Pflanzenwachstum in der Anbauperiode ist jedoch, dass die Verlaufsdiagramme der Leitfähigkeit klar zeigen, dass die Salzbelastung in den untersuchten Bodenschichten bereits bei der zwei Wochen späteren Probenahme nicht mehr in diesem Ausmaß nachzuweisen war (siehe Abbildung 31). Eine andauernde Erhöhung der Leitfähigkeit des Bodens konnte nicht beobachtet werden. Dies wird auch durch die Chlorid-Daten bestätigt (siehe Abbildung 32). In Abbildung 33 ist die Korrelation zwischen den Leitfähigkeits- und Chlorid-Konzentrationswerten für alle Entfernungsstufen der S36 dargestellt. Die Grafiken zeigen vor allem bei der ersten beiden Entfernungsstufen einen linearen Zusammenhang, wobei dieser mit zunehmender Entfernung (Referenz) abnimmt.

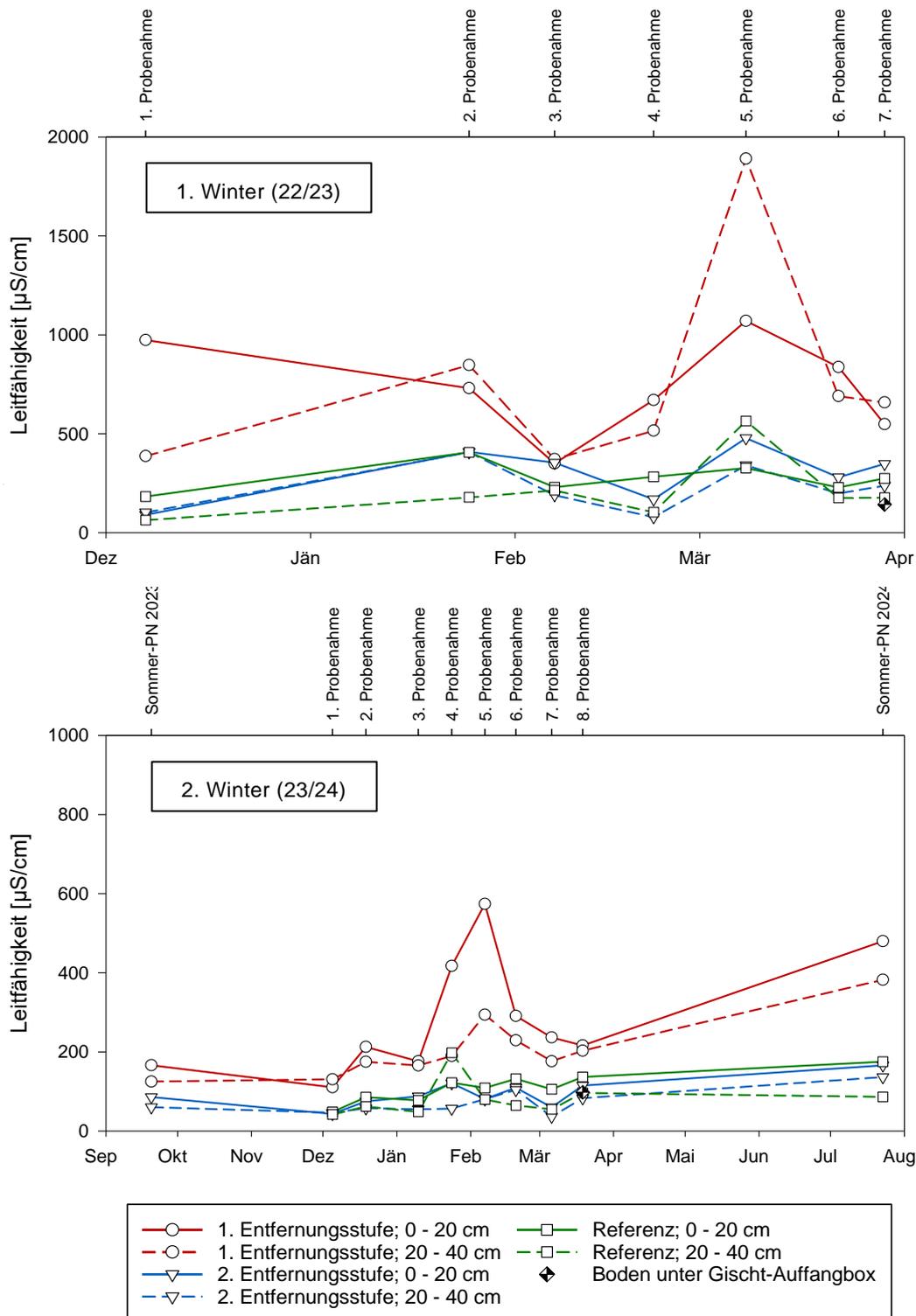


Abbildung 31: Leitfähigkeitsverlauf S36

Bei den Chlorid-Messungen sind die einzelnen Peaks der 1. untersuchten Entfernungsstufe und der kurzfristige Effekt noch klarer zu erkennen als bei der Leitfähigkeit. Am Ende der beiden Winter (März/April) waren die Chlorid-Konzentrationen bereits wieder fast auf die Ausgangswerte gesunken: Während bei der 5. Probenahme am 08.03.2023 (1. Winter) rund 520 mg Chlorid pro Kilogramm nachgewiesen wurden (1. Entfernungsstufe; 20-40 cm), reduzierte sich der Wert für denselben PN-Bereich innerhalb der drei Wochen bis zur 7. und letzten Probenahmen des ersten Winters auf 1/6 (84 mg/L). Im oberen Bodenhorizont derselben Entfernungsstufe verringerte sich im gleichen Zeitraum der Chlorid-Gehalt von 170 mg/L auf rund ein Viertel (45 mg/L). Bei der Sommer-Probenahme im September 2023 zwischen erstem und zweitem Winter lagen beide beprobten Tiefenstufen bei 5-6 mg Chlorid pro Liter.

Die Beobachtungen aus der ersten Versuchsperiode werden durch die 2. bestätigt. Hier wurden in den ersten 20 cm der 1. Entfernungsstufe maximal 108 mg/L nachgewiesen. Bei Probenahme sechs Wochen später im März betrug der Messwert nur mehr ca. 10% davon (12 mg/L). Beim unteren Bodenhorizont wurden am Ende des Winters im Vergleich zum Höchstwert im Februar (5. PN) ca. 40% des Chlorids gefunden (9 mg/L).

Bis zum eigentlichen Feld, das ab der 2. Entfernungsstufe (5 Meter nach Ende des Pannestreifens) beginnt, scheint das Salz bei der S36 in weitaus geringerem Ausmaß transportiert worden zu sein. Die 2. Entfernungsstufe bewegt sich im ersten Winter in einem Bereich von 4 bis 25 mg/L, wobei der Maximalwert in Übereinstimmung mit den Peaks der 1. Entfernungsstufe bei der 5. Probenahme gemessen wurde (0-20 cm). Drei Wochen später Ende März wies diese Probe einen rd. 30% geringeren Gehalt von 17 mg/L auf. In der zweiten Periode wurden beim 2. Distanzbereich maximal 16 mg/L detektiert (7. Probenahme Anfang März; 0-20 cm). Bei der letzten und 8. Probenahme wurden sogar nur 3-4 mg Chlorid pro Liter in dieser Entfernungsstufe nachgewiesen, was den Werten der Probenahme im Sommer zuvor entspricht.

Der 50 Meter von der Fahrbahn entfernte Referenzbereich schwankte nur wenig mit einem Maximalwert von 13 mg/L (0-20 cm), der sich am Ende des ersten Winters auf 6 mg/L einpendelte. Die Werte der zweiten Untersuchungsperiode befanden sich bis auf wenige Ausnahmen (14 mg/L am 24.01.24; 19 mg/L am 06.03.) im Bereich von 3-6 mg/L.

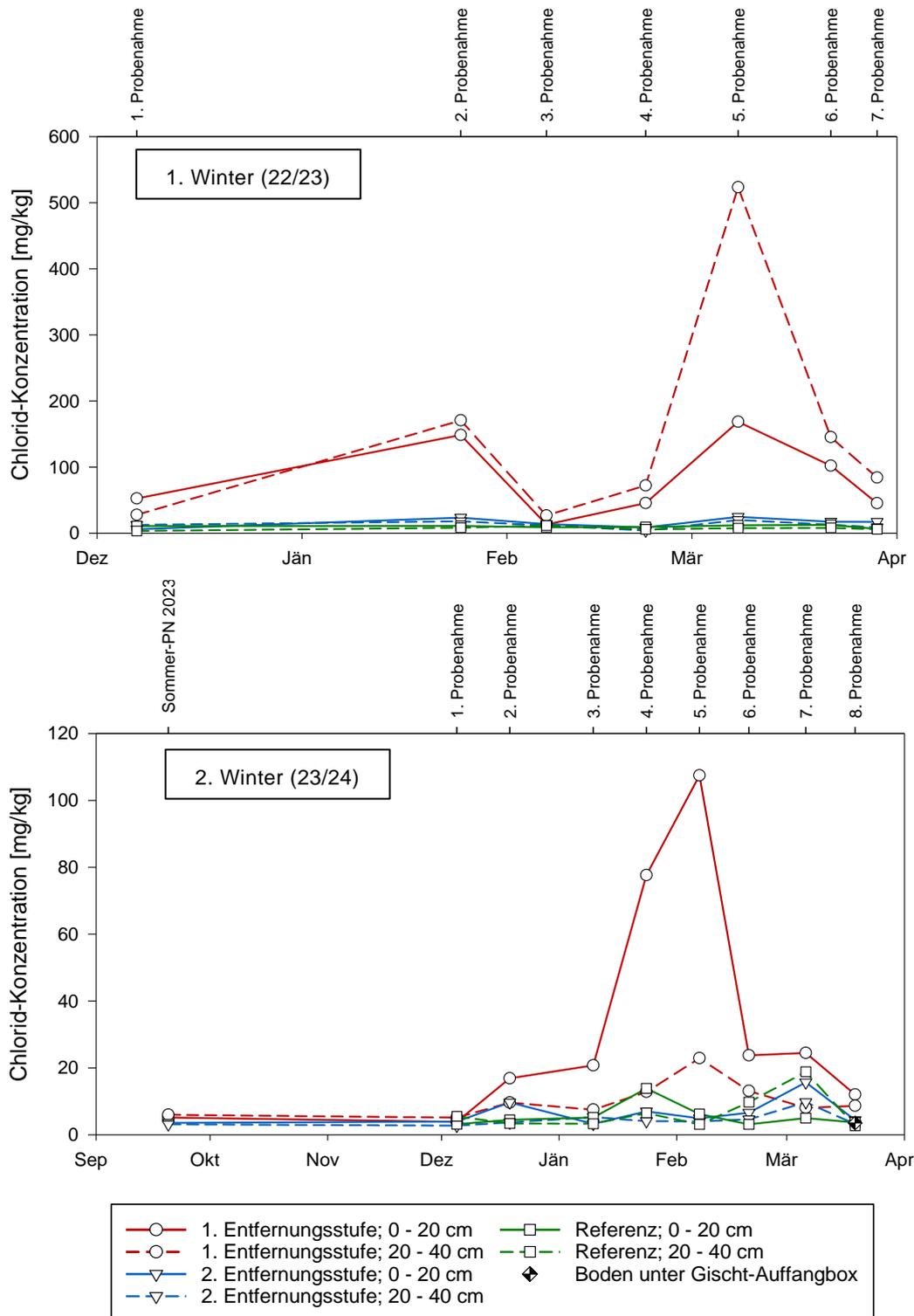


Abbildung 32: Verlauf Chlorid-Konzentration S36

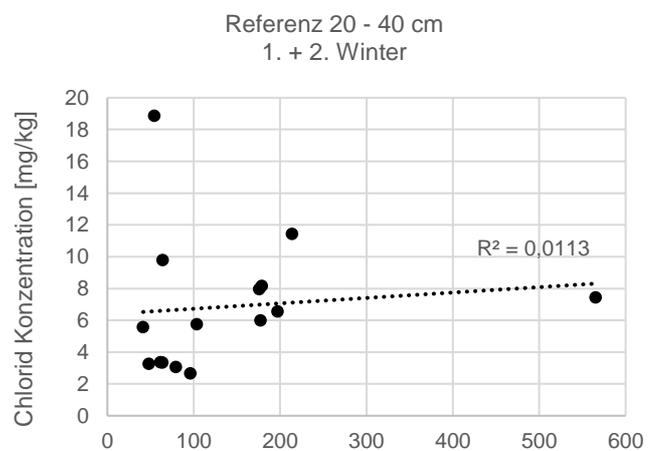
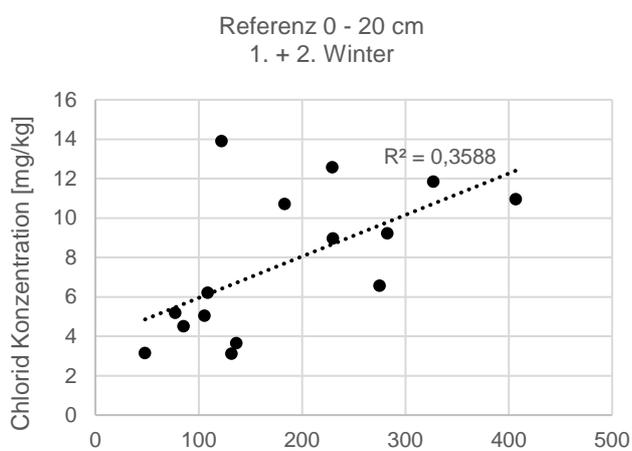
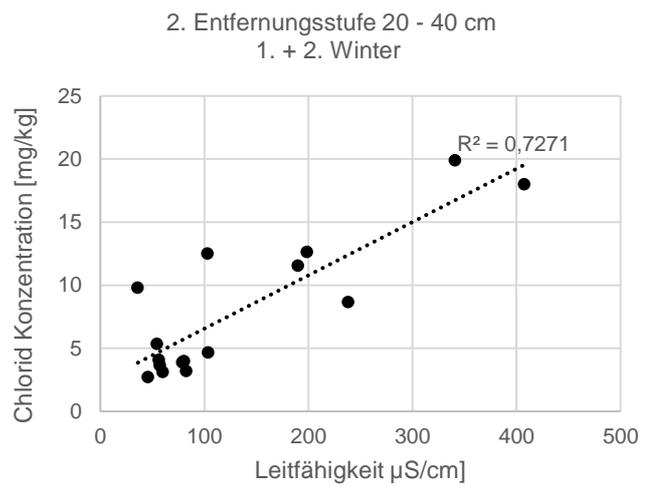
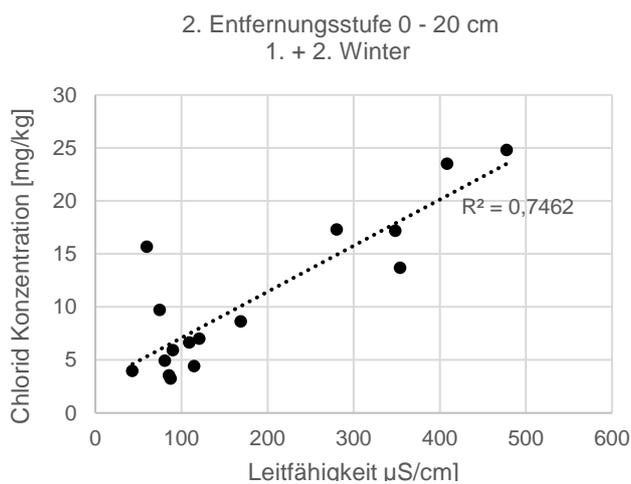
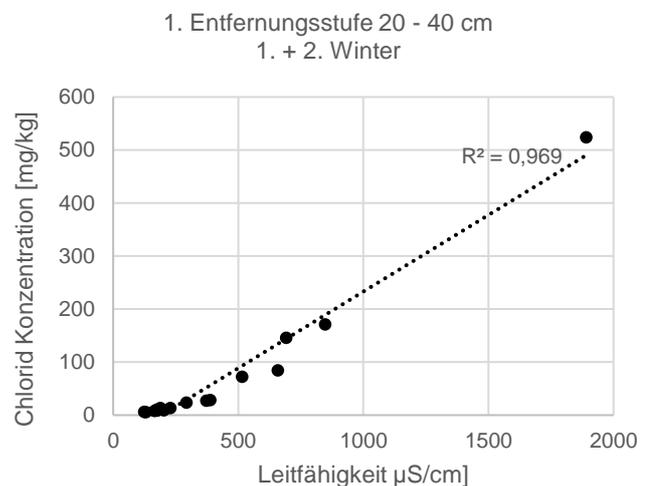
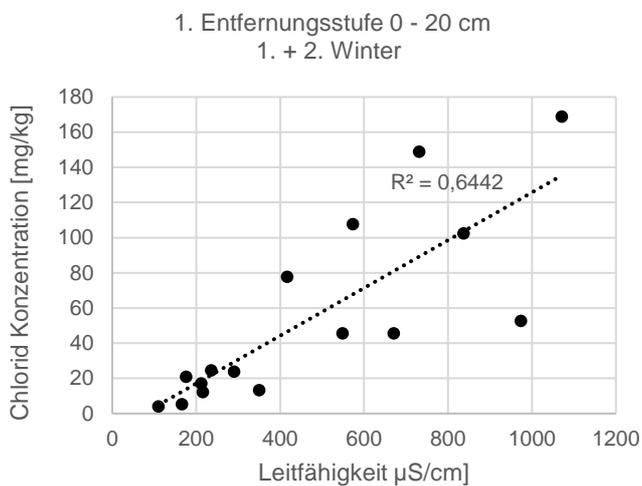


Abbildung 33: Korrelation zwischen Leitfähigkeits- und Chloridwerten für alle Entfernungsstufen der S36

Die Ergebnisse besonders auffälliger Probenahmezeitpunkte werden nachfolgend unter gleichzeitiger Betrachtung der Leitfähigkeit und des Chlorid-Gehaltes in Zusammenhang mit den Streudaten und den Witterungsverhältnissen gebracht.

Bei der S36 ist dies im ersten Winter die bereits erwähnte 5. Probenahme. Der dort gemessene Höchstwert der Leitfähigkeit und des Chlorid-Gehalts spiegelt nicht direkt das Ausmaß der Streuung im vorangegangenen 2-Wochen-Intervall wider, das, im Vergleich zu anderen Zeitpunkten im Winter, eher gering war (siehe Abbildung 34). Allerdings wurden die erhöhten Werte in der Tiefenstufe von 20 – 40 cm gefunden, was auf eine Verlagerung des Salzes von früheren Streueignissen in diesem Winter in die tiefere Bodenschicht hinweist. Auch im zweiten Winter traten die Peaks der Leitfähigkeit und des Chlorid-Gehaltes (1. Entfernungsstufe) bei der 5. Probenahme gegen Ende des Winters auf. Hier wurden die erhöhten Werte in der Tiefenstufe 0-20 cm gemessen. Im Zeitraum zwischen 4. und 5. Probenahme wurde allerdings bei dem Streckenabschnitt der S36 von der ASFINAG keine Streuung aufgezeichnet. Die erhöhten Werte konnten somit keinem unmittelbar davor liegenden Streueignis zugeordnet werden.

Die deutliche Absenkung der Leitfähigkeitswerte und der Chloridkonzentrationen gegen Ende der Winter bzw. vor der Aussaat kann durch eine Auswaschung auf Grund der aufgetretenen Regenereignisse erklärt werden (siehe Abbildung 35).

Auffällig ist auch, dass die Leitfähigkeit bei der Sommer-Probenahme 2024 bei der 1. Entfernungsstufe (Böschung) im Vergleich zum Ende des zweiten Winters um mehr als das Doppelte erhöht war. Nach Auskunft des Landwirtes wurde wenige Tage vor der Probenahme eine Düngung mit Gülle durchgeführt, was eine plausible Erklärung für die gemessenen Werte darstellt.

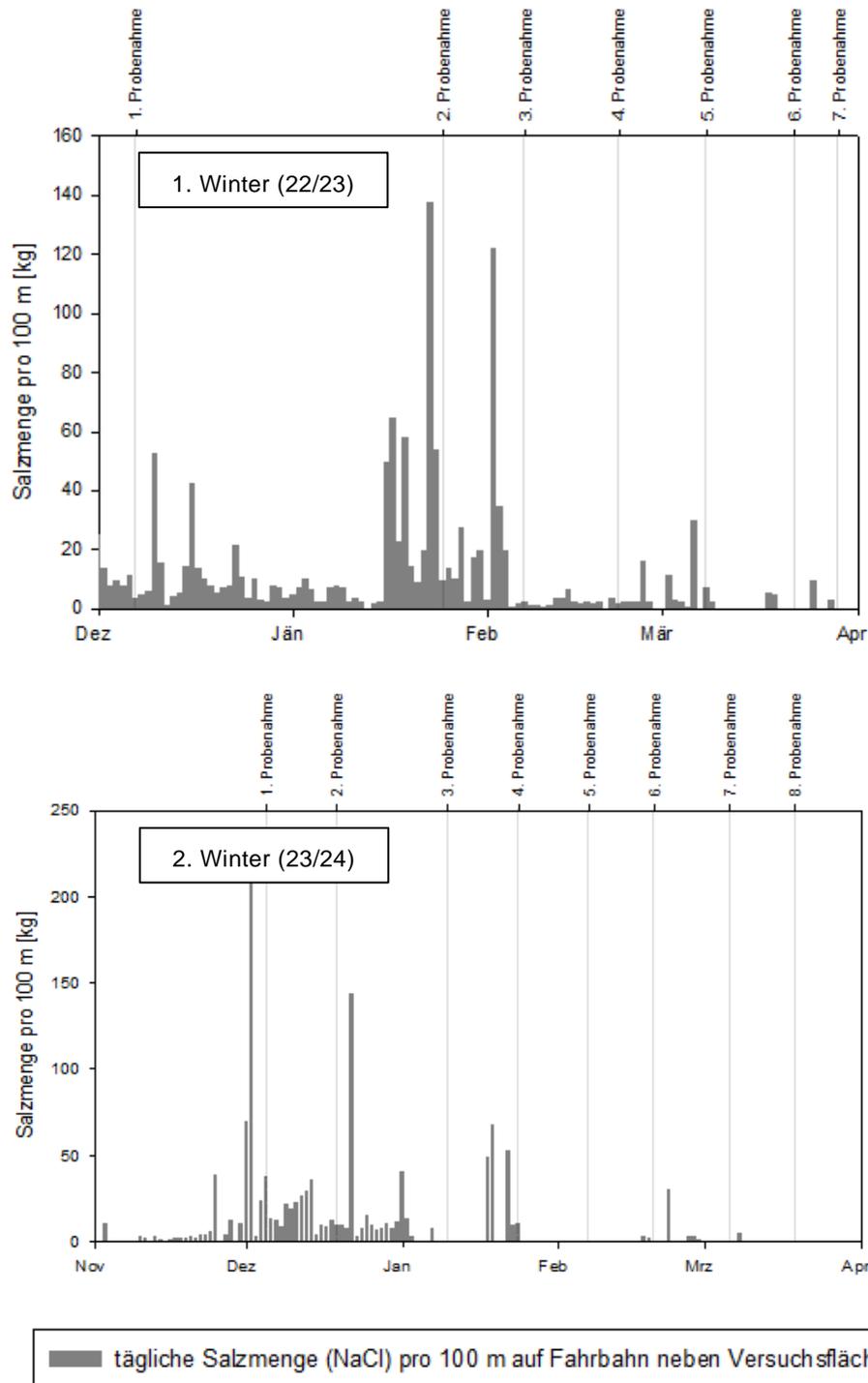


Abbildung 34: Streuereignisse auf der S36

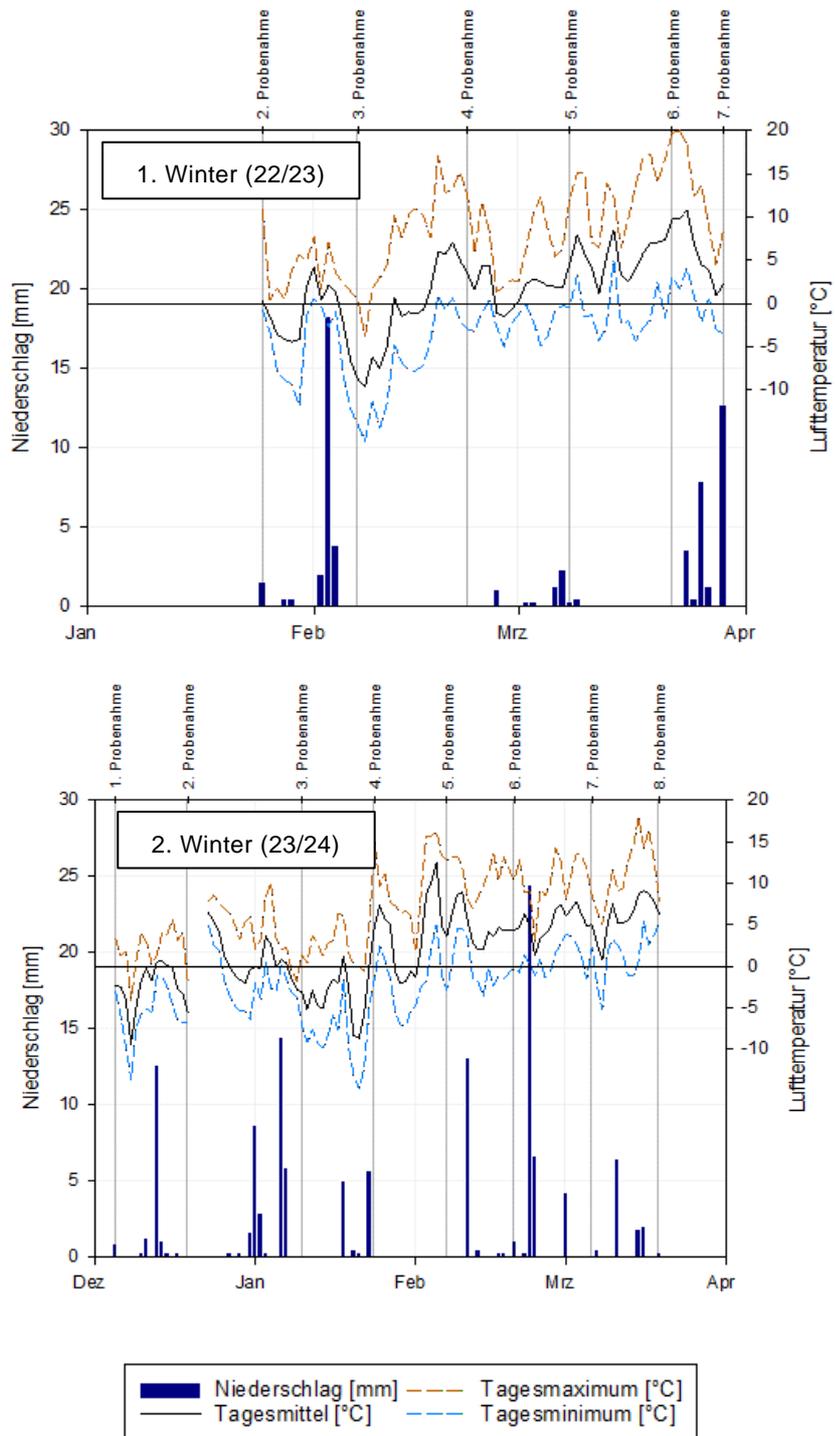


Abbildung 35: Wetter S36

Die Leitfähigkeit und der Chlorid-Gehalt wurde auch im aufgefangenen Gischtwasser und ab dem zweiten Winter auch regelmäßig im Regenwasser gemessen. Die Verlaufsdiagramme beider Winter zeigen eindeutige Peaks und der Verlauf der Chlorid-Konzentration entspricht zum Großteil jenem der Leitfähigkeit (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38). Abbildung 36 bestätigt dies. Wie hoch die Werte bei den einzelnen Probenahmen sind, hängt sehr stark von der Verdünnung der in einem Behälter gesammelten Gischt durch Niederschlag ab. So wurden im ersten Winter über 1000 mg Chlorid pro Liter bei der 4. Probenahme detektiert, obwohl das Ausmaß der Streuung im Intervall davor verhältnismäßig gering war. Allerdings war das Intervall zwischen 3. und 4. Probenahme das einzige, in dem gar kein Niederschlag aufgezeichnet wurde, der die Gischt verdünnt haben könnte. Bei der 5. Probenahme, die sich bei den Bodenproben als auffällig erwies, war das Wasser in der 32 Liter-Box derart verdünnt, dass es in Leitfähigkeit und Chlorid-Konzentration den Werten des Regenwassers entsprach. Die im zweiten Winter erhaltenen Daten zeigten eine bessere Korrelation der Leitfähigkeit des aufgefangenen Gischtwassers mit jener des Bodens. Auch hier hatte es in den zwei Wochen davor nicht geregnet, allerdings, wie schon erwähnt, wurde laut den Streuprotokollen auch kein Salz ausgebracht. Leitfähigkeit und Chlorid im Regenfänger schwankten bis auf die 8. Probenahme im März 2024 wenig. Das Wasser aus den Gischtfängern hob sich bis Mitte Februar deutlich vom Regenwasser ab.

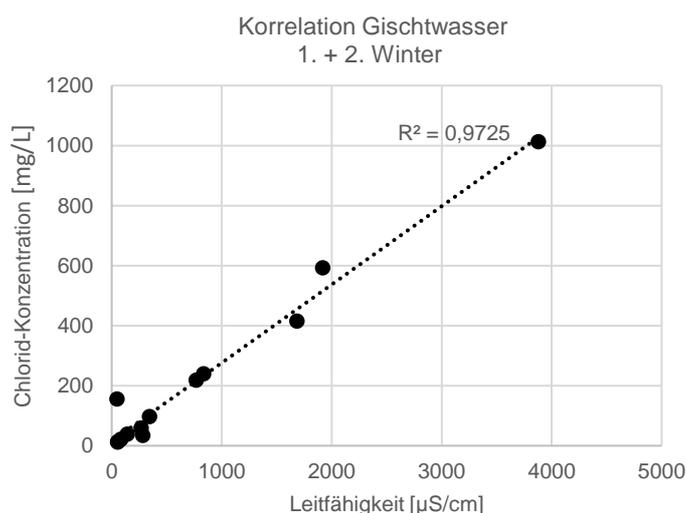


Abbildung 36: Korrelation zwischen Leitfähigkeits- und Chlorid-Konzentrationswerten im aufgefangenen Gischtwasser von beiden Versuchsperioden

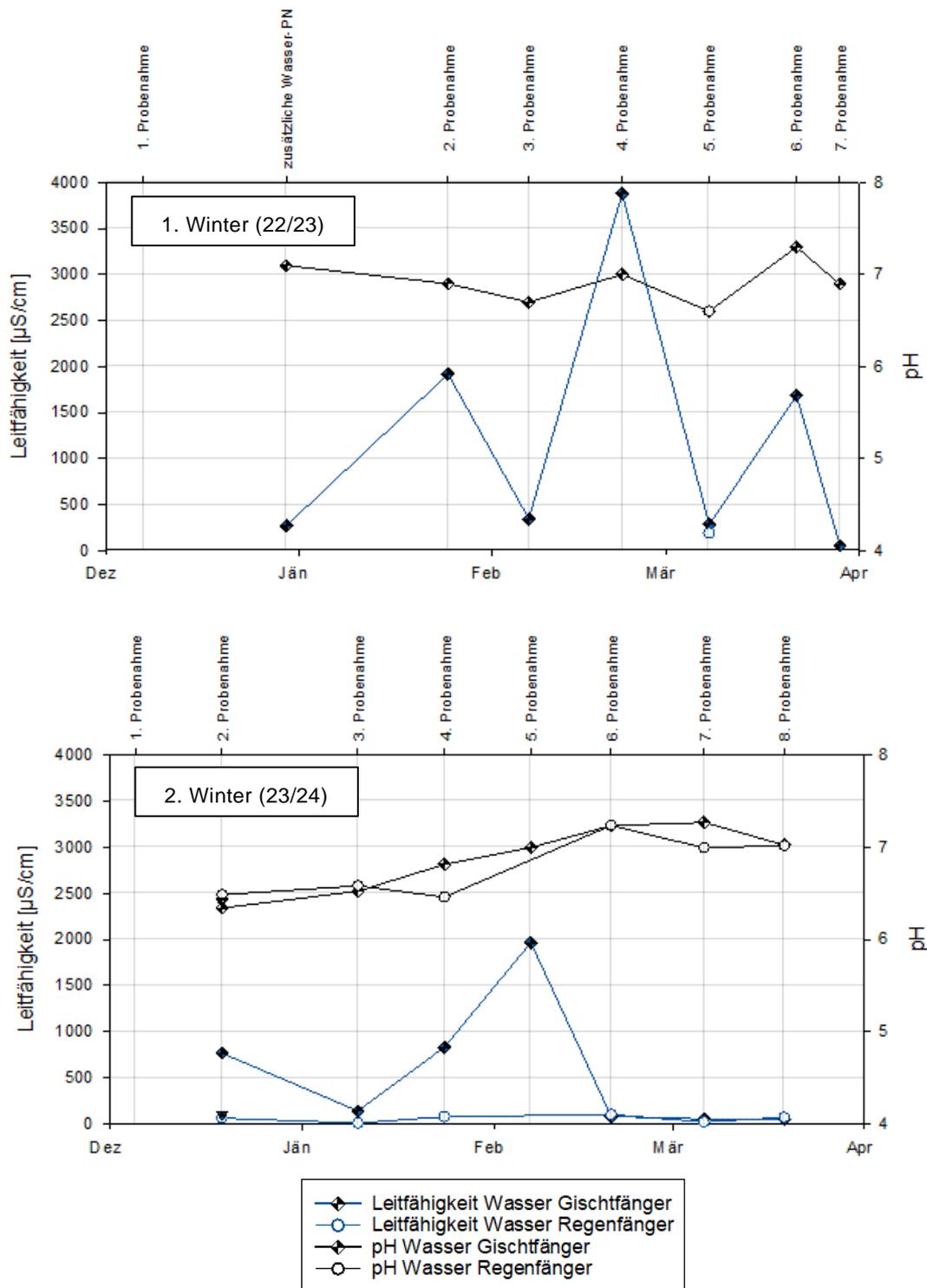


Abbildung 37: Verlauf Leitfähigkeit und pH-Werte Gischt- bzw. Regenwasser

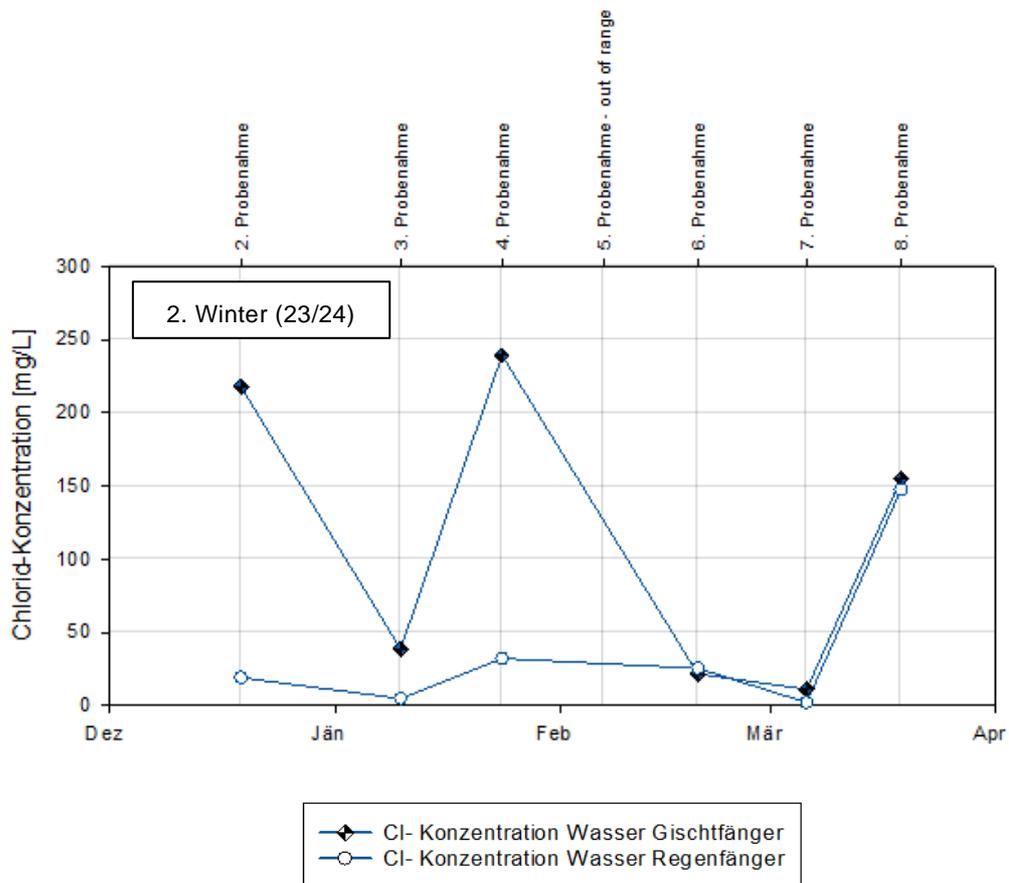
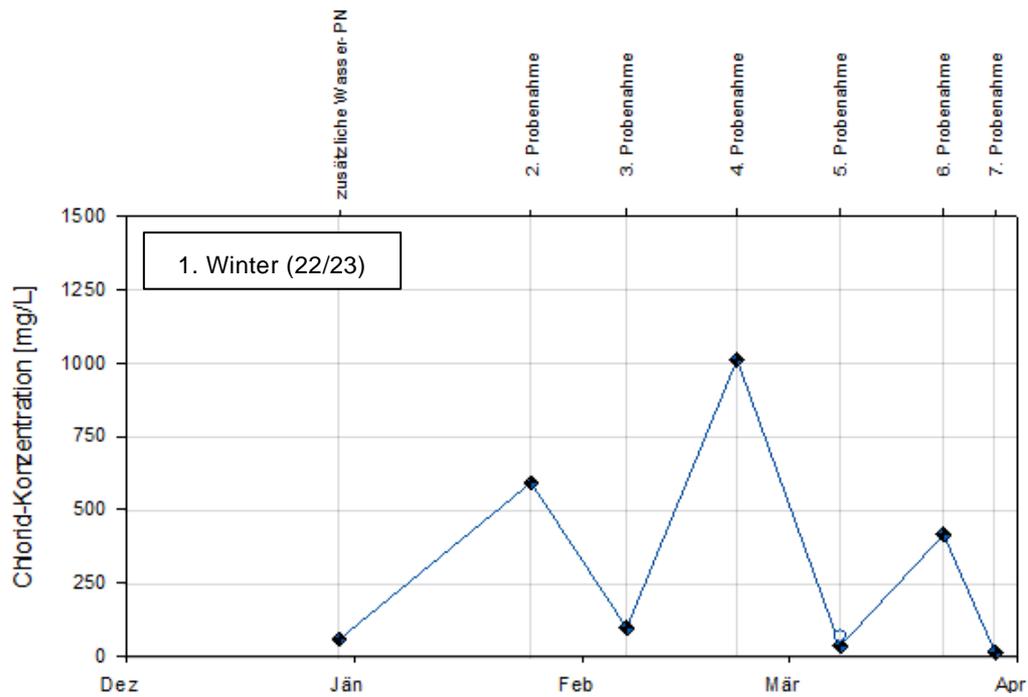


Abbildung 38: Verlauf Leitfähigkeit und pH-Werte Gischt- bzw. Regenwasser

Die Fläche neben der S36 war auch einer der zwei Versuchsstandorte, bei dem im ersten Winter der Transferboden-Versuch durchgeführt wurde. Da sich aus dem Vergleich mit den Leitfähigkeitswerten der 50-Meter-Referenz keine klaren Schlüsse ziehen ließen, wurde beschlossen diesen Versuch in der zweiten Versuchsperiode nicht zu wiederholen (in Abstimmung mit Projektbeirat).

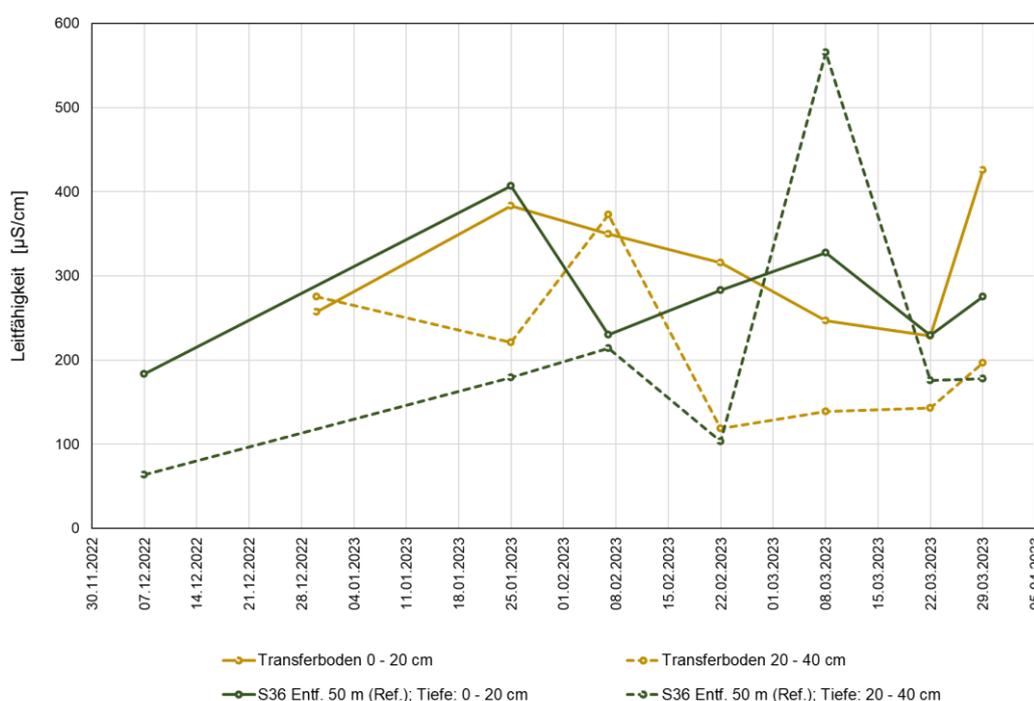


Abbildung 39: Transferboden S36

5.2 S5 Schmida

Das rasche Verschwinden des Salzes war auch bei der Fläche neben der S5 beobachtbar.

Im ersten Winter wurden bei der 5. Probenahme 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und ca. 140 mg Chlorid pro Kilogramm gemessen. Beide Werte sind der Probe aus 20 – 40 cm der 1. Entfernungsstufe zuzuordnen. Zwei Wochen später bei der 6. Probenahme betrug die Leitfähigkeit nur mehr 40% davon und 10% des Chlorids war noch vorhanden. Im Intervall regnete es zwei Mal schwach mit 0,5 bzw. 1 Liter pro m^2 , wovon einmal nach der letzten Streuung vor der Probenahme war.

Auf Basis der Daten ist anzunehmen, dass vor allem der Zeitpunkt der Probenahme stark beeinflusst, wie viel Chlorid im Boden detektiert wurde. Denn während zum Beispiel 1,5 Wochen vor der 3. Probenahme des ersten Winters viel größere Mengen gestreut worden waren, als vor der 5. Probenahme, waren die Leitfähigkeits- und Chloridwerte aller Entfernungsstufen niedrig, da auf die Streuung, wenn auch schwache, Regenfälle folgten, was bei der um ein Vielfaches geringeren Streuung zwei Tage vor der 5. Probenahme nicht der Fall war. Der Zeitraum mit der meisten Streuung auf der S5 war ca. sechs Tage vor der 2. Probenahme, wo drei Tage hintereinander über 50 kg Salz pro 100 Meter Fahrbahn ausgebracht wurden. Die Reaktion des Bodens ist in den Diagrammen durch eine Erhöhung der Leitfähigkeit und Chlorids sichtbar, die auch die Referenz betrifft.

Im zweiten Winter deuten die auffälligen Werte der 2. Probenahme auf das Vorhandensein von Salz bei der 1. Entfernungsstufe hin. Dies korreliert mit der intensiven Streuung Anfang Dezember 2023. Der Chlorid-Peak bei der 2. Entfernungsstufe Ende Februar lässt sich nicht unmittelbar auf ein außergewöhnliches Streueignis zurückführen und wird auch nicht durch die Leitfähigkeitsdaten bestätigt.

Nach beiden Wintern ist die Leitfähigkeit der letzten Probenahme vor der Anbauperiode stark erhöht, was man auf die bereits beginnende Bearbeitung der Fläche zurückführen kann.

Die Chlorid-Konzentration im Gischtwasser korrelieren in beiden Untersuchungsperioden positiv mit den Leitfähigkeitswerten. Auch hier lassen sich die Werte im ersten Winter mit dem Verdünnungseffekt begründen: Die höchste Leitfähigkeit und Chloridkonzentration war nach einem Intervall mit den niedrigsten Niederschlagsmengen zu finden. In beiden Wintern waren die Leitfähigkeiten und Chloridkonzentrationen teilweise höher im rund 50 Meter von der Fahrbahn installierten Regenfänger als im Gischtfänger. Ein Grund dafür könnten die Partikel und das organische Material sein, dass sich bei dieser Fläche vermehrt im Regenfänger angesammelt hatte.

Der Transferboden lieferte auch hier keine aussagekräftigen Ergebnisse.

5.3 A8 Ried im Innkreis

Auffällig bei der Fläche neben der A8 ist, dass die weiter entfernten Probenahmebereiche inklusive der Referenz im Verhältnis zur 1. Entfernungsstufe, die sich hier im Graben zwischen Autobahn und Beginn des Feldes befand, stärker schwankten als bei den anderen Versuchsstandorten. Im ersten Winter war die Leitfähigkeit bei der 1. Probenahme höher bei der

Referenz als bei den anderen Proben. Auch der Chlorid-Gehalt der Referenz zu diesem Zeitpunkt war erhöht. Im zweiten Winter waren drei der vier höchsten Chlorid-Peaks der 2., 3. oder Referenz-Entfernungsstufe zuzuordnen, die aber nur teilweise auch durch die Leitfähigkeitsdaten widergespiegelt werden. Die fast 150 mg Chlorid pro Liter im 2. Horizont der 2. Entfernungsstufe im Februar 2024 lassen sich nicht mit einem Streuevent in Verbindung bringen, da im Intervall davor keine Streuung aufgezeichnet wurde.

Bei der A8 war der Verdünnungseffekt im Wasser der Gischtfänger-Auffangbox am stärksten. Im ersten Winter sind übereinstimmende Peaks in Leitfähigkeit und Chlorid erkennbar in Zusammenhang mit trockeneren Perioden. Im zweiten Winter entsprach das Wasser in der Gischt-Auffangbox dem Regenwasser. Ein starker Anstieg der gemessenen Parameter war ab Mitte März zu erkennen. Der Grund dafür war die zu diesem Zeitpunkt bereits gestartete Bearbeitung der Fläche durch den Landwirt. Einmalig wurde auch Schnee beprobt, der sich auf dem Gischtfänger angesammelt hat und in dem eine erhöhte Leitfähigkeit und Chloridkonzentration nachgewiesen wurde.

5.4 S6 Allerheiligen

Bei der Fläche neben der S6 gab es in beiden Wintern einige Zeitpunkte an denen es so aussieht, als hätte sich hier das Salz bis ins Feld bzw. bis zum Zaun am Feldrand ausgebreitet. Am Ende beider Winter erreichten die Leitfähigkeit und die Chloridkonzentration bei allen Entfernungsstufen Werte wie vor dem Winter bzw. im Bereich der Sommer-Probenahmen. Der auffällig hohe Chlorid-Peak Anfang Februar 2024 bei der Referenz war nicht im Verlauf der Leitfähigkeit in diesem Ausmaß erkennbar.

Die Maximalwerte für Chlorid und Leitfähigkeit im ersten Winter wurden bei der 4. Probenahme in den oberen 20 cm der 1. Entfernungsstufe nachgewiesen. Auch im Gischtwasser wurden zu diesem Zeitpunkt über 500 mg Chlorid pro Liter gemessen. Regenfälle waren zwischen 3. und 4. Probenahme minimal. Streuung hat auch stattgefunden, wenn auch in geringerem Ausmaß als im Intervall zuvor, bei dem die Streuung allerdings im Zuge von verstärktem Niederschlag bei Temperaturen über dem Nullpunkt stattgefunden hatte und das möglicherweise vorhandene Salz im Graben, in dem sich die 1. Probenahmestelle befand, ausgewaschen hat. Kurz vor der 4. Probenahme im zweiten Winter wurden signifikante Mengen an Salz gestreut. Die Ergebnisse deuten auf einen verstärkten Transport des Salzes zu diesem Zeitpunkt hin, da die Leitfähigkeit und die Chloridkonzentration im Boden der 2. Entfernungsstufe erhöht waren und außerdem auch das Wasser im Regenfänger auffällige Werte aufwies.

Bei allen vier Flächen war die Leitfähigkeit bei der Juli-Probenahme im Sommer 2024 erhöht. Die Ursache liegt in der kurz zuvor durchgeführten Düngung der Böden.

5.5 Kationenaustauschkapazität

An Proben vom Dezember 2023 wurden die Gehalte an Na^+ , sowie von weiteren austauschbaren einwertigen (Abbildung 40) und zweiwertigen (Abbildung 41) Kationen bestimmt. Bei allen vier Standorten war eine deutliche Erhöhung der Natriumgehalte im Boden mit der geringsten Entfernung von der Straße feststellbar. Danach nahm der Gehalt sehr rasch ab. Allerdings waren die Gehalte bei den Standorten S5 und S6 auch in einer Entfernung von 10 m gegenüber dem Referenzpunkt von 50 m noch in beiden Tiefenstufen (0-20 cm und 20-40 cm) erhöht. Bei Kalium war dagegen kein Unterschied zwischen den Bodenproben nahe bei der Autobahn und den Referenzprobe in 50 m Entfernung erkennbar.

Die zweiwertigen Kationen Ca^{2+} und Mg^{2+} erschienen an den Standorten S6 und S36 bei den Probenahmepunkten nahe der Autobahn leicht erhöht (Abbildung 41). Bei S5 und A8 war diese Tendenz nicht erkennbar.

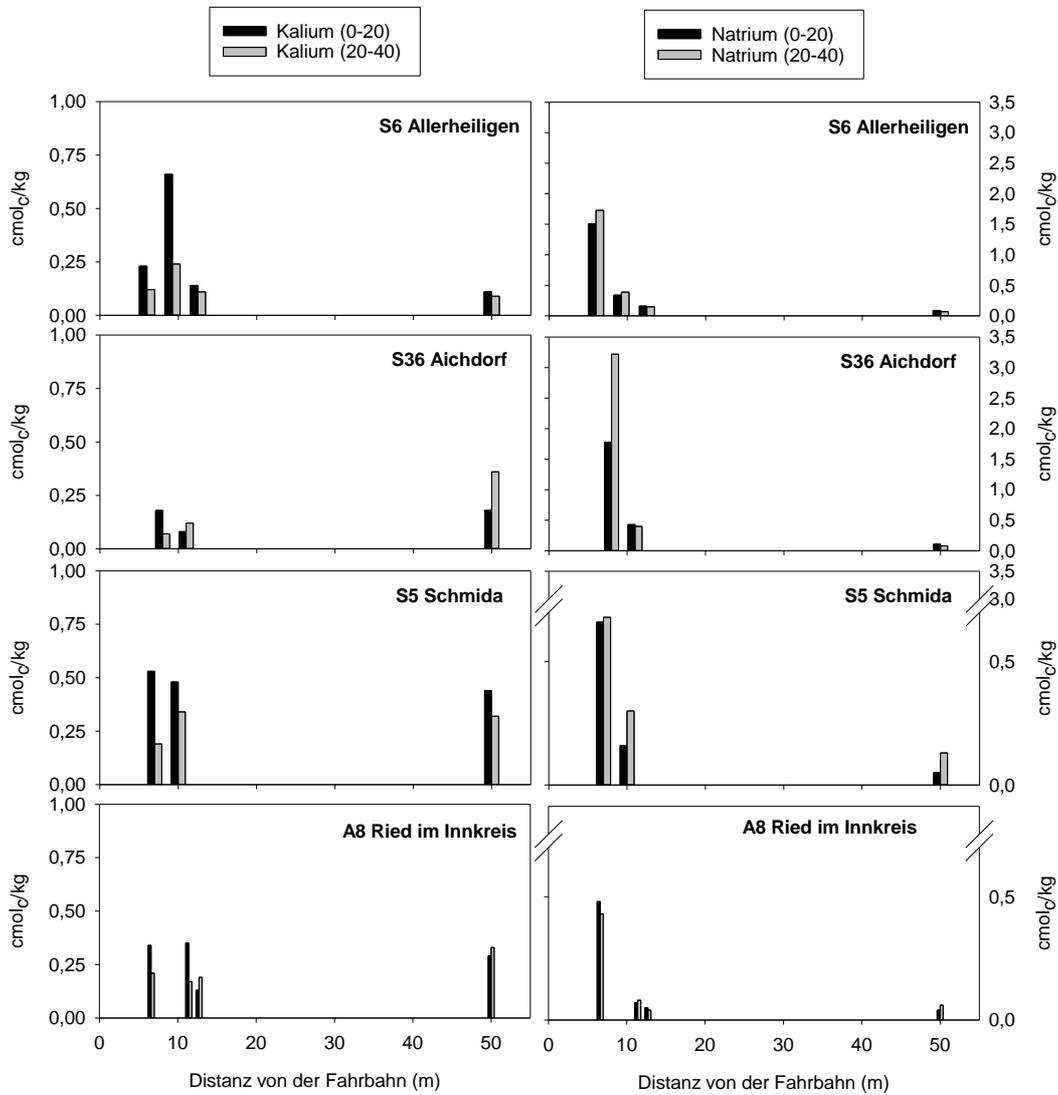


Abbildung 40: Austauschbare einwertige Kationen in Bodenproben der vier Untersuchungsstandorte am Beginn der Streuperiode 2023/24.

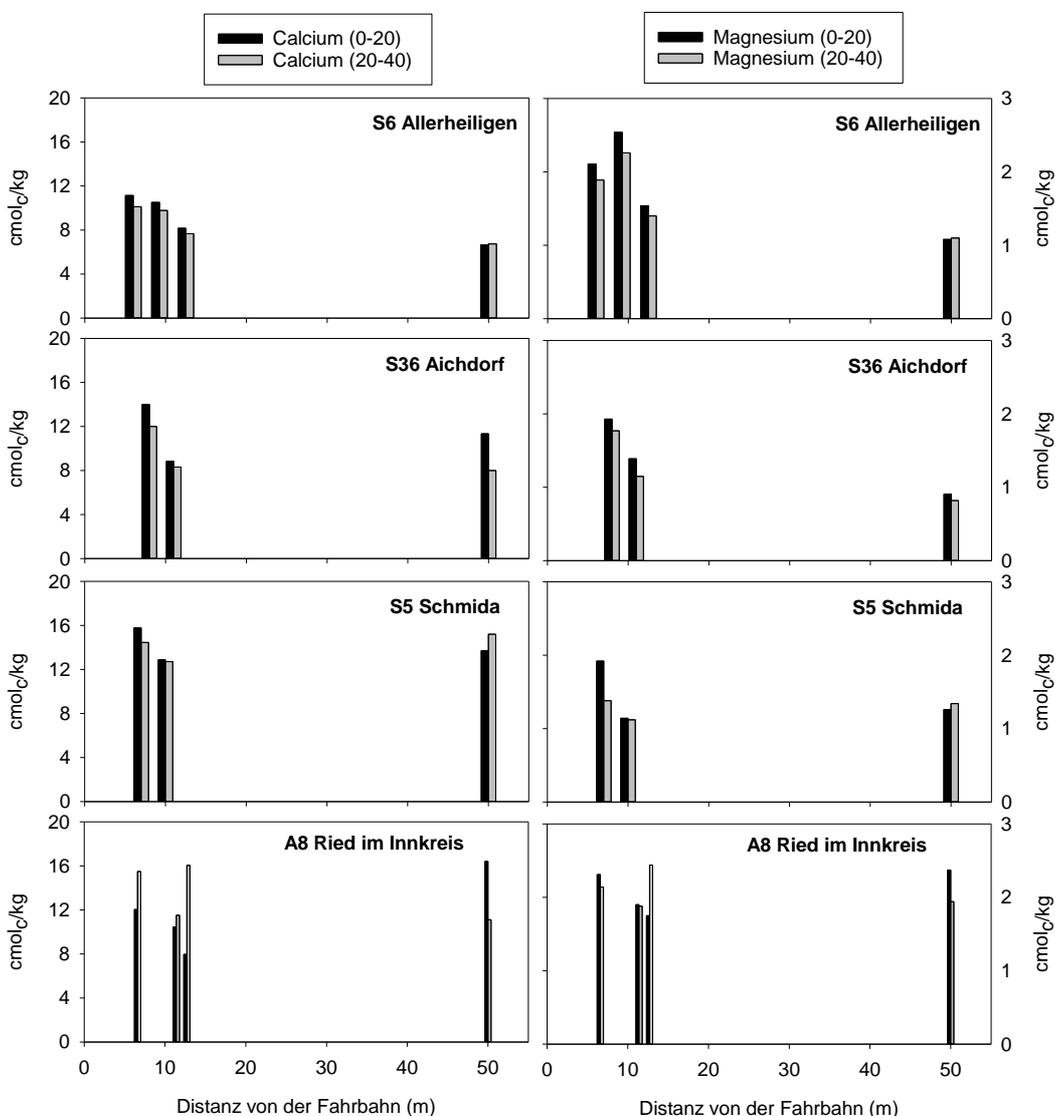


Abbildung 41: Austauschbare zweiwertige Kationen in Bodenproben der vier Untersuchungsstandorte am Beginn der Winterperiode 2023/24.

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) lag mit durchschnittlichen Werten von 11,6 (S6), 12,9 (S36), 16,2 (S5) und 15,2 (A8) im typischen Bereich für Ackerböden. Der prozentuelle Anteil von Na^+ lag jedoch bei den Standorten an der S6, S36 und S5 bei allen untersuchten Messpunkten (außer dem Referenzpunkt bei 50 m) über 1%. Nur beim Standort bei der A8 zeigte einzig der nächstgelegene Probenahmepunkt (6,6 m vom Fahrbandrand) einen Na^+ -Anteil $>1\%$ der KAK_{eff} . Als Optimalbereich für den Na^+ -Anteil wird ein Wert unter 1% betrachtet (Scheffer et al. 2018).

Diese Erhöhung kann daher als ein Hinweis auf eine langfristige Streusalzeinwirkung betrachtet werden. Allerdings kann von einem Wert >1 nicht unmittelbar eine negative Auswirkung auf die Bodenfruchtbarkeit abgeleitet werden. Auch der Wachstumsversuch zeigte beim Boden vom Standort S36 (6,6 m Entfernung, 0-20 cm Bodentiefe) keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zum Referenzboden (~50 m Entfernung, 0-20 cm) in den untersuchten Parametern. Nachfolgende Tabelle 28 listet die Ergebnisse an den 4 Untersuchungsflächen auf.

Tabelle 28: Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) und prozentueller Anteil der einwertigen und zweiwertigen Kationen.

Probenahme- stelle	Entfernung vom Fahrbahn- rand	Entfernung von asphaltiert er Fläche [m]	Tiefe von-bis [cm]	KAK_{eff} [cmol _e /kg]	Ca ²⁺ [%]	Mg ²⁺ [%]	K ⁺ [%]	Na ⁺ [%]
S6-Allerheiligen	6	3,5	0-20	15,03	74,1	14,0	1,5	10,0
S6-Allerheiligen	6	3,5	20-40	13,90	72,9	13,6	0,9	12,4
S6-Allerheiligen	9,25	6,75	0-20	14,22	74,0	17,9	4,6	2,4
S6-Allerheiligen	9,25	6,75	20-40	12,75	76,8	17,7	1,9	3,1
S6-Allerheiligen	12,5	10	0-20	10,28	79,5	15,0	1,4	1,6
S6-Allerheiligen	12,5	10	20-40	9,67	79,3	14,5	1,1	1,6
S6-Allerheiligen	~50	~50	0-20	8,70	76,4	12,4	1,3	1,0
S6-Allerheiligen	~50	~50	20-40	8,30	81,3	13,3	1,1	0,8
S36-Aichdorf	8	4	0-20	17,89	78,3	10,8	1,0	9,9
S36-Aichdorf	8	4	20-40	17,07	70,3	10,4	0,4	18,9
S36-Aichdorf	11	7	0-20	10,82	81,9	12,8	0,7	4,0
S36-Aichdorf	11	7	20-40	10,01	83,1	11,5	1,2	4,0
S36-Aichdorf	~50	~50	0-20	12,57	90,2	7,2	1,4	0,9
S36-Aichdorf	~50	~50	20-40	9,28	86,3	8,8	3,9	0,9
S5-Schmida	7	4,25	0-20	18,89	83,5	10,2	2,8	3,5
S5-Schmida	7	4,25	20-40	16,70	86,5	8,3	1,1	4,1
S5-Schmida	10	7,25	0-20	14,64	87,9	7,8	3,3	1,1
S5-Schmida	10	7,25	20-40	14,46	87,8	7,7	2,4	2,1
S5-Schmida	~50	~50	0-20	15,47	88,6	8,1	2,8	0,3
S5-Schmida	~50	~50	20-40	17,00	89,4	7,9	1,9	0,8
A8-Ried/Innkreis	6,6	2,7	0-20	15,31	78,6	15,1	2,2	3,1
A8-Ried/Innkreis	6,6	2,7	20-40	18,31	84,6	11,7	1,1	2,3
A8-Ried/Innkreis	11,4	7,5	0-20	13,01	80,3	14,6	2,7	0,5
A8-Ried/Innkreis	11,4	7,5	20-40	13,75	83,7	13,7	1,2	0,6
A8-Ried/Innkreis	12,7	8,8	0-20	9,90	80,3	17,7	1,3	0,5
A8-Ried/Innkreis	12,7	8,8	20-40	18,79	85,4	13,0	1,0	0,2
A8-Ried/Innkreis	~50	~50	0-20	19,17	85,6	12,4	1,5	0,2
A8-Ried/Innkreis	~50	~50	20-40	13,65	81,3	14,2	2,4	0,4

6 Erkenntnisse und Interpretation

Die in diesem Projekt gestellten Forschungsfragen sollen nachfolgend basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten Literaturrecherche, des Technikumsversuches und des Freilandversuches beantwortet werden.

6.1 Wie hoch sind die Tausalzeinträge und wie verändert sich die Bodenqualität entlang hochrangiger Straßen durch streusalzbelastete Verkehrsgischt/Sprühnebel?

Im Freilandversuch wurden an vier Standorten Gischtfänger in Entfernungen von rund 10 bis 14 Metern neben der Fahrbahn aufgestellt (siehe Kapitel 4). Die Gischt wurde während der Streuperiode alle zwei Wochen beprobt und Leitfähigkeit, Chloridgehalt und pH-Wert der Proben bestimmt. Außerdem wurden alle zwei Wochen in unterschiedlichen Entfernungen zur Fahrbahn Bodenproben in zwei Tiefenstufen (0-20 cm und 20-40 cm) gezogen, in denen ebenfalls Leitfähigkeit, Chloridgehalt und pH-Wert bestimmt wurden (siehe Kapitel 4.3 für die Vorgehensweise bei der Probenahme und Kapitel 5 für die Ergebnisse). Diese Werte wurden mit den Werten von Bodenproben in 50 m Entfernung von der Fahrbahn, die dem jeweiligen gleichen Zeitpunkt entsprechen, verglichen.

Im Feldversuch konnte ein Zusammenhang zwischen Erhöhungen in den Parametern Leitfähigkeit und Chloridkonzentration im Boden und vorangegangenen Streueignissen hergestellt werden. Dieser Zusammenhang war am stärksten bei der 1. Entfernungsstufe in 3-4 m vom Ende der asphaltierten Fläche (Tabelle 29 bis Tabelle 32) zu detektieren. Die Erhöhung gegenüber dem Referenzpunkt bei 50 m war hier fast zu allen Messzeitpunkten zu erkennen (für Verlaufsdiagramme siehe Anlage 7 - Grafische Auswertung Freilanduntersuchungen). Mit zunehmender Entfernung von der Fahrbahn (Entfernungsstufen 2 und 3, das sind 7-8 m bzw. 9-11 m vom Ende der asphaltierten Fläche) nahm auch die Häufigkeit der erhöhten Werte ab (Tabelle 29 bis Tabelle 32).

Tabelle 29: Anzahl der Proben, die im 1. Winter eine erhöhte Leitfähigkeit im Vergleich zur Referenz aufwiesen (>20% des gemessenen Referenzwertes). Die Entfernungangaben beziehen sich auf das Ende der asphaltierten Fläche.

	1. Entfernungsstufe 3-4 m	2. Entfernungsstufe 7-8 m	3. Entfernungsstufe 9-11 m
0 – 20 cm			
S36 (7 Referenzproben)	7	4	-
20 – 40 cm			
S36 (7 Referenzproben)	7	3	-
0 – 20 cm			
S5 (7 Referenzproben)	5	2	-
20 – 40 cm			
S5 (7 Referenzproben)	1	2	-
0 – 20 cm			
A8 (6 Referenzproben)	5	-	1
20 – 40 cm			
A8 (6 Referenzproben)	4	-	2
0 – 20 cm			
S6 (7 Referenzproben)	7	7	4
20 – 40 cm			
S6 (7 Referenzproben)	7	7	6

Tabelle 30: Anzahl der Proben, die im **1. Winter** eine **erhöhte Chlorid-Konzentration** im Vergleich zur Referenz aufwiesen (>20% des gemessenen Referenzwertes). Die Entfernungsangaben beziehen sich auf das Ende der asphaltierten Fläche. Teilweise konnten nicht alle Probenahmedurchgänge bewertet werden (außerhalb des Kalibrationsbereichs etc.). Wenn dies der Fall war, wurde die Gesamtanzahl der bewertbaren Proben nach dem Schrägstrich angegeben.

	1. Entfernungsstufe 3-4 m	2. Entfernungsstufe 7-8 m	3. Entfernungsstufe 9-11 m
0 – 20 cm			
S36 (7 Referenzproben)	7	5	-
20 – 40 cm			
S36 (7 Referenzproben)	7	5	-
0 – 20 cm			
S5 (7 Referenzproben)	6	2	-
20 – 40 cm			
S5 (7 Referenzproben)	1	1	-
0 – 20 cm			
A8 (6 Referenzproben)	4/5	-	3
20 – 40 cm			
A8 (6 Referenzproben)	5/5	-	2/5
0 – 20 cm			
S6 (7 Referenzproben)	6/6	7	7
20 – 40 cm			
S6 (7 Referenzproben)	7	7	6/6

*Tabelle 31: Anzahl der Proben, die im **2. Winter** eine **erhöhte Leitfähigkeit** im Vergleich zur Referenz aufwiesen (>20% des gemessenen Referenzwertes). Die Entfernungangaben beziehen sich auf das Ende der asphaltierten Fläche.*

	1. Entfernungsstufe 3-4 m	2. Entfernungsstufe 7-8 m	3. Entfernungsstufe 9-11 m
0 – 20 cm			
S36 (8 Referenzproben)	8	0	-
20 – 40 cm			
S36 (8 Referenzproben)	7	1	-
0 – 20 cm			
S5 (8 Referenzproben)	6	3	-
20 – 40 cm			
S5 (8 Referenzproben)	3	1	-
0 – 20 cm			
A8 (8* Referenzproben)	7	1	1
20 – 40 cm			
A8 (8* Referenzproben)	5	1	0
0 – 20 cm			
S6 (9 Referenzproben)	8	8	3
20 – 40 cm			
S6 (9 Referenzproben)	8	9	5

* nicht alle Probenahmedurchgänge bewertbar, da kein Ergebnis für Referenzproben (Begründungen siehe Anlage 5 und Anlage 6)

Tabelle 32: Anzahl der Proben, die im 2. Winter eine erhöhte Chlorid-Konzentration im Vergleich zur Referenz aufwiesen (>20% des gemessenen Referenzwertes). Die Entfernungsangaben beziehen sich auf das Ende der asphaltierten Fläche. Teilweise konnten nicht alle Probenahmedurchgänge bewertet werden (außerhalb des Kalibrationsbereichs etc.). Wenn dies der Fall war, wurde die Gesamtanzahl der bewertbaren Proben nach dem Schrägstrich angegeben.

	1. Entfernungsstufe 3-4 m	2. Entfernungsstufe 7-8 m	3. Entfernungsstufe 9-11 m
0 – 20 cm			
S36 (8 Referenzproben)	8	5	-
20 – 40 cm			
S36 (8 Referenzproben)	6	3	-
0 – 20 cm			
S5 (8 Referenzproben)	6	7	-
20 – 40 cm			
S5 (8 Referenzproben)	8	5	-
0 – 20 cm			
A8 (7* Referenzproben)	6	5	5
20 – 40 cm			
A8 (7* Referenzproben)	6	2	4
0 – 20 cm			
S6 (9 Referenzproben)	6/8	7	6
20 – 40 cm			
S6 (8* Referenzproben)	6	5	3/7

* nicht alle Probenahmedurchgänge bewertbar, da kein Ergebnis für Referenzproben (Begründungen siehe Anlage 5 und Anlage 6)

Die nur kurzfristig erhöhten Werte weisen darauf hin, dass es hier zu einer raschen Auswaschung des Chlorids kam, sobald kein Streusalz mehr nachgeliefert wurde, wodurch die Leitfähigkeit und die Chloridkonzentration schon bei der darauffolgenden Probenahme (nach 2 Wochen) wieder nahezu den Wert wie vor der Streuperiode angenommen hatten.

Es kam somit bei keinem der Messpunkte zu einer Kumulation der Chloridkonzentration bzw. der Leitfähigkeit. Nach Perioden mit weniger Streuung sowie am Ende des Winters näherten sich die Werte sehr rasch wieder dem Bereich des Referenzpunktes 50 m von der Fahrbahn (mit Ausnahme von Düngeereignissen)¹ an.

Die Na⁺-Gehalte des Bodens waren bei allen vier Standorten bei der 1. Entfernungsstufe deutlich erhöht (siehe Abbildung 40 und Tabelle 28). Die Na⁺-Gehalte nahmen mit zunehmender Entfernung von der Fahrbahn ab, wobei beim Standort A8/Ried im Innkreis schon bei 7,5 m Entfernung vom Ende der asphaltierten Fläche der Natrium-Anteil an den austauschbaren Kationen bereits wieder unter 1% und somit im Idealbereich lag.

Bezugnehmend auf die gemessenen Parameter lässt sich keine erhebliche Auswirkung auf die Bodenqualität ableiten.

6.2 In welcher Entfernung und in welchem Ausmaß wird der Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen entlang von hochrangigen Straßen durch den Einfluss von streusalzbelasteter Verkehrsgischt/Sprühnebel nachteilig beeinflusst?

Die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit und des Chloridgehaltes des Bodens durch Streusalzeintrag zeigten sich am deutlichsten bei den Messpunkten, die der Fahrbahn am nächsten lagen (Entfernungsstufe 1 in 3-4 m Entfernung vom Ende der asphaltierten Fläche (Tabelle 29 bis Tabelle 32). Die Messungen der Na⁺-Gehalte sowie der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) zeigten eine Verschiebung des Na⁺-Anteils in der Kationenzusammensetzung der Böden nahe am Straßenrand. Bei drei der vier Standorte war dieser Effekt bis zu einer Entfernung von 12,5 m vom Fahrbahnrand im Vergleich zum Referenzpunkt (50 m) nachweisbar.

In Keimungs- und Pflanzenwachstumstests mit Böden der am stärksten beeinflussten Entfernungsstufe 1 der Standorte S36 Zeltweg/Aichdorf und A8 Ried im Innkreis konnten weder eine signifikante Verringerung der Keimrate,

-
- ¹ Bei einigen Messpunkten lag die Leitfähigkeit bei den Sommerprobenahmen im Bereich der Peaks, die im Winter während der Streuperiode gemessen wurden. Diese Werte konnten nach Informationen, die von den bewirtschaftenden Bauern erhalten wurden, auf vorangegangene Düngungen zurückgeführt werden.

noch der Biomassebildung von Spross und Wurzeln von Mais, Sojabohne und Ackerbohne nachgewiesen werden (siehe Kapitel 3.3).

Im Wachstumsversuch im Glashaus konnte gezeigt werden, dass es bei Salzkonzentrationen, die aus Literaturdaten abgeleitet wurden, bei empfindlichen Kulturpflanzen wie Sojabohne zu einer Verminderung der Keimrate sowie der Biomassebildung in einem frühen Wachstumsstadium kommen kann. Allerdings traten messbare Effekte erst bei elektrischen Leitfähigkeiten auf, die deutlich über den in den Freilandexperimenten gemessenen Werten lagen (vergleiche Tabelle 5). Sonderkulturen und Pflanzen aus Gärtnereibetrieben wurden in der vorliegenden Studie nicht betrachtet, da der Fokus auf den am häufigsten angebauten Feldfrüchten (Getreide, Hülsenfrüchte) sowie Grünland lag.

Die Daten zeigen somit eine kurzfristige Beeinflussung des Bodens bis zu rund 13,5 m Entfernung von der Fahrbahn (bzw. 9-11 m vom Ende der asphaltierten Fläche) durch das Streusalz in Form einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit und des Chloridgehaltes sowie eine langfristige Beeinflussung durch eine Erhöhung des Natriumgehaltes.

Sowohl die gemessenen Werte wie auch die durchgeführten Keimungs- und Pflanzenwachstumsversuche zeigten aber, dass bei den untersuchten Feldfrüchten keine Einbußen im Ertrag zu erwarten sind.

6.3 Welche Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen sind sinnvoll und wie kann eine angemessene Entschädigung aussehen?

Aufgrund der zuvor beschriebenen nicht erheblichen Auswirkungen auf den Boden und die Ertragssituation der ausgewählten Versuchsfelder sind an Flächen mit vergleichbaren Randbedingungen bzw. Charakteristika keine Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen notwendig. Sonderkulturen und Pflanzen aus Gärtnereibetrieben wurden in der vorliegenden Studie nicht betrachtet.

Im Zuge der Standortauswahl wurde festgestellt, dass hochrangige Straßen bereits größtenteils mit Ausbreitungshindernissen ausgestattet sind (z.B. Bauwerke wie Lärmschutzwände, Einschnittsböschung oder Lebendbarrieren in Form von Vegetationsstreifen am Rand der Fahrbahn). Diese Bauart ist sinnvoll, um auch die kurzfristig erhöht auftretenden Messwerte, die im Rahmen dieser Studie festgestellt wurden, weiter zu minimieren.

Da relevante Ertragseinbußen aufgrund des Streusalzeintrages neben hochrangigen Straßen in den Böden unter den untersuchten Bedingungen nicht nachgewiesen werden konnten und keine erheblichen Veränderungen der Bodeneigenschaften durch die Winterperiode im Boden festgestellt wurden, ergibt sich seitens des Forschungsteams keine Notwendigkeit von Entschädigungszahlungen.

6.4 Fazit

Zusammenfassend können die Ergebnisse dieser Studie so interpretiert werden, dass es zwar auf den untersuchten vier Standorten zu Effekten durch Streusalzausbreitung auf die benachbarten Felder kam (der erhöhte Na^+ -Gehalt ist als langfristiger Effekt der Salzstreuung zu betrachten), dass durch diese aber keine erheblichen negativen Einflüsse auf die Ertragsfähigkeit des Bodens zu erwarten sind.

Auch in den Pflanzenwachstumstests konnte keine signifikante Verringerung der Keimung sowie des frühen Pflanzenwachstums mit Böden von zwei Standorten nachgewiesen werden. Die 3 getesteten Pflanzenarten (Mais, Sojabohne und Ackerbohne) repräsentieren häufig angebaute Feldfrüchte im DACH-Raum und decken das Spektrum von sowohl salzsensitiveren als auch salztoleranteren Pflanzenarten ab. Diese Pflanzen wurden im Rahmen der Vorversuche aus 22 der am häufigsten angebauten Feldfrüchte ausgewählt, um dieses breite Spektrum abzubilden. Sonderkulturen, Spezialkulturen und Pflanzen aus Gärtnereibetrieben wurden in der vorliegenden Studie nicht betrachtet.

Es zeigte sich keine erhebliche Beeinflussung der Bodenfruchtbarkeit entsprechend der Schweizer Begriffsdefinition.

Unter Anwendung der deutschen Begriffsdefinition sind schädliche Bodenveränderungen nicht nachweisbar und auch nicht zu befürchten.

An dieser Stelle wird angemerkt, dass im Projekt ausschließlich Versuchsflächen im Nahbereich von hochrangigen Straßen untersucht wurden.

Untersuchungen an niederrangigen Straßen oder Straßen im städtischen Umfeld waren nicht Teil dieses Forschungsprojektes. Ein Eintrag von Streusalz in angrenzende landwirtschaftliche Flächen ist aufgrund der Ergebnisse dieser Studie zwar auch an niederrangigen Straßen zu erwarten, der betroffene Entfernungsbereich und die dadurch entstehende Beeinflussung des Bodens und eine Ertragsminderung wären jedoch gesondert zu untersuchen.

7 Glossar

7.1 Bodenfruchtbarkeit

Der Begriff „Bodenfruchtbarkeit“ ist nicht einheitlich definiert, sondern wird von verschiedenen Gruppen und Disziplinen unterschiedlich beschrieben. Aus landwirtschaftlicher Sicht (besonders in der konventionellen Landwirtschaft) wird die Bodenfruchtbarkeit meist in Hinblick auf den Ertrag betrachtet, den ein Boden erbringen kann. Neben dieser Produktionsfunktion erfüllt der Boden allerdings noch zahlreiche andere ökologische Funktionen (z.B. Pufferfunktion, Schadstoffabbau, Wasser- und Kohlenstoffspeicher) und kann vor allem auch selbst als eigenes Ökosystem mit einem Netzwerk an Lebensprozessen betrachtet werden, woraus eine weitere Sichtweise auf den Begriff „Bodenfruchtbarkeit“ (z.B. im ökologischen Landbau) abgeleitet werden kann. In der Wissenschaft wird meist versucht die „Bodenfruchtbarkeit“ anhand von messbaren Parametern zu beschreiben und mit davon abgeleiteten Indikatoren zu bewerten.

In der vorliegenden Studie wird der Begriff „Bodenfruchtbarkeit“ aus der Ertragsicht der konventionellen Landwirtschaft verwendet.

Die Schweizerische Gesetzgebung ([Verordnung über Belastungen des Bodens \(VBBo\) vom 1. Juli 1998, Art. 2 Abs.1](#)) definiert den Begriff wie folgt:

Boden gilt als fruchtbar, wenn:

- a. die biologisch aktive Lebensgemeinschaft, die Bodenstruktur, der Bodenaufbau und die Mächtigkeit für seinen Standort typisch sind und er eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist;
- b. natürliche und vom Menschen beeinflusste Pflanzen und Pflanzengesellschaften ungestört wachsen und sich entwickeln können und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden;
- c. die pflanzlichen Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und die Gesundheit von Menschen und Tieren nicht gefährden;
- d. Menschen und Tiere, die ihn direkt aufnehmen, nicht gefährdet werden.

7.2 Erheblichkeit

Der Begriff „erheblich“ wird in dieser Studie im Sinne einer nachweislich messbaren Wirkung (z.B. eine statistisch signifikante Abnahme des Ernteertrages) verwendet. Wenn somit von „keinen erheblichen Auswirkungen auf den Ertrag“ gesprochen wird, dann ist gemeint, dass es zwar nachweisbare Wirkungen durch den Einfluss von Streusalz auf den Boden gibt, dass diese allerdings von so kurzer Dauer oder so geringer Ausprägung

sind, dass sie keinen Einfluss auf den Ertrag der angebauten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen haben.

Im Naturschutz wird der Begriff „Erheblichkeit“ als dauerhafte, schädliche Auswirkung auf ein Schutzgut definiert. Eine lediglich kurzfristige Beeinflussung des Schutzgutes Boden wird daher als nicht erheblich beurteilt.

7.3 Hochrangige Straßen

Mit dem Begriff „hochrangige Straßen“ sind in diesem Bericht Straßen mit baulich getrennten Richtungsfahrbahnen gemeint, die üblicherweise eine höhere Verkehrsfrequenz haben als niederrangige Straßen. In Österreich fallen unter „hochrangige Straßen“ Autobahnen (A) und Schnellstraßen (S), in Deutschland sind das Bundesautobahnen, autobahnähnlich ausgebaute Bundes- und Landesstraßen, in der Schweiz sind es Autobahnen und andere Straßen, welche der Umweltverträglichkeitsprüfung unterstellt sind (Hauptstraßen, die mit Bundeshilfe ausgebaut werden und andere Hochleistungs- und Hauptverkehrsstraßen unter kantonaler Hoheit).

8 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: *Relativer Ertrag von Kohl im Vergleich zur elektrischen Leitfähigkeit des Bodens, Schwellenwert 4,6 dS/m. aus de Vos et al. (2016).* 12
- Abbildung 2: *„Auswertung der Restsalzmessungen für den Anfangsverlust unmittelbar nach der Ausbringung. Vergleich zur eingestellten Streumenge und relativer Verlust in Prozent (n=47)“ (Hoffmann, Blab, & Nutz, 2011)*..... 17
- Abbildung 3: **Keimraten** (gekeimte Samen in Prozent der 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; lehmiger Boden 26
- Abbildung 4: **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; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden. 29
- Abbildung 5: **Trockengewicht der Wurzeln und der Sprossachse**, K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden. 32
- Abbildung 6: **Durchschnittliche Höhe der Sprossachsen**, K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden 34
- Abbildung 7: **Blattfläche** pro Topf in [cm²], K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden. 36
- Abbildung 8: **Chlorophyllgehalt** pro Topf [µmol/m²], K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; lehmiger Boden 38
- Abbildung 9: **Keimraten** (gekeimte Samen in Prozent der 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; sandiger Boden.	40
Abbildung 10: 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; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.	42
Abbildung 11: Trockengewicht der Wurzeln und der Sprossachse , K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.	44
Abbildung 12: Durchschnittliche Höhe der Sprossachse , K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.	46
Abbildung 13: Blattfläche pro Topf in [cm ²], K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.	48
Abbildung 14: Chlorophyllgehalt pro Topf [μmol/m ²], K_■ Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_■ Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_■ Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Senkrechte Linien zeigen die Standardabweichung von jeweils 5 Wiederholungen; sandiger Boden.	50
Abbildung 15: Pflanzen im Glashaus während des Wachstumsversuches mit Bodenmaterial der Standorte S6 und S36.	52
Abbildung 16: Keimraten im Pflanzenwachstumstest mit Bodenmaterial (0- 20 cm) von den beiden Versuchsstandorten S36 und A8.	52
Abbildung 17: Biomassen von Sprossen und Wurzeln (in Gramm Trockengewicht) im Pflanzenwachstumstest mit Bodenmaterial (0- 20 cm) von den beiden Versuchsstandorten S36 und A8.	53
Abbildung 18: Aufbau des Gischtfängers: Vergraben der Gewindestangen (links) und Auffangplatte (rechts)	57
Abbildung 19: fertig aufgebauter Gischtfänger 1. Winter (links) und fertig aufgebauter Gischtfänger 2. Winter (rechts)	57
Abbildung 20: Wetterstation 1. Winter (links) und Wetterstation inkl. Solarpaneel und Regenfänger vom 2. Winter (rechts)	59

Abbildung 21: Bereiche, aus denen bereits Proben entnommen wurden, begrenzt durch beschriftete Holzpflocke	60
Abbildung 22: Darstellung der Bodenprobenahme. Aushub des ersten Bodenhorizontes (0 – 20 cm) mittels Spaten und Transfer in blauen Kübel (oben links); Fortsetzung ab einer Tiefe von 20 cm mit händischem Drillgerät und rotem Kübel für Boden von 20 – 40 cm (oben rechts); entnommenes Material in Probenahmegebinde (unten)	62
Abbildung 23: Übersicht aller im Rahmen eines Probenahmetermins benötigten Equipment	63
Abbildung 24: Regenfänger mit sichtbaren Verunreinigungen	63
Abbildung 25: Durchmischung des Inhalts der Gischtfänger-Auffangbox (links) und Transfer über Trichter in Sieb in etikettierte Probeflasche (rechts).....	64
Abbildung 26: Solarpaneel und Aufbewahrungsort der Konsole von innen (links) und Vor-Ort-Auslesen der Wetterdaten (rechts)	64
Abbildung 27: Übersichtsfoto S36 Zeltweg, aufgenommen im Dezember 2023 (50-Meter-PN-Stelle nicht sichtbar)	66
Abbildung 28: Übersichtsfoto Fläche S5 (50-Meter-PN-Stelle nicht sichtbar), aufgenommen im März 2024	68
Abbildung 29: Übersichtsfoto A8, aufgenommen im April 2024	69
Abbildung 30: Übersichtsfoto S6, aufgenommen im März 2024	71
Abbildung 31: Leitfähigkeitsverlauf S36	73
Abbildung 32: Verlauf Chlorid-Konzentration S36.....	75
Abbildung 33: <i>Korrelation zwischen Leitfähigkeits- und Chloridwerten für alle Entfernungsstufen der S36.....</i>	76
Abbildung 34: Streueignisse auf der S36	78
Abbildung 35: Wetter S36	79
Abbildung 36: Korrelation zwischen Leitfähigkeits- und Chlorid-Konzentrationswerten im aufgefangenen Gischtwasser von beiden Versuchsperioden.....	80
Abbildung 37: Verlauf Leitfähigkeit und pH-Werte Gischt- bzw. Regenwasser81	
Abbildung 38: Verlauf Leitfähigkeit und pH-Werte Gischt- bzw. Regenwasser82	
Abbildung 39: Transferboden S36	83
Abbildung 40: <i>Austauschbare einwertige Kationen in Bodenproben der vier Untersuchungsstandorte am Beginn der Streuperiode 2023/24.....</i>	87
Abbildung 41: <i>Austauschbare zweiwertige Kationen in Bodenproben der vier Untersuchungsstandorte am Beginn der Winterperiode 2023/24. ..</i>	88

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Salztoleranz von krautigen Pflanzen laut Literatur (Maas & Grattan, 1999).....	13
Tabelle 2: Verwendete Feldfrüchte und Sorten für die Vorversuche	21
Tabelle 3: Salzkonzentrationen im Technikumsversuch.....	21
Tabelle 4: Verwendete Feldfrüchte und Sorten für die Hauptversuche	23
Tabelle 5: 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	24
Tabelle 6: Keimraten in [%], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden	27
Tabelle 7: Frischgewicht der Sprossbiomasse als Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden..	30
Tabelle 8: Frischgewicht der Wurzelbiomasse als Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden	30
Tabelle 9: Trockengewicht der Wurzeln in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; Hauptversuch 1 lehmiger Boden.	33
Tabelle 10: Trockengewicht der Wurzeln in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden.	33
Tabelle 11: Durchschnittlichen Höhe der Sprossachsen in [Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden..	35
Tabelle 12: Blattfläche pro Topf in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden.	37
Tabelle 13: Chlorophyllgehalt pro Topf in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; lehmiger Boden.	39
Tabelle 14: Keimraten in [%], K_Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.....	41
Tabelle 15: Frischgewicht der Sprossachse in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.	43

Tabelle 16: Frischgewicht der Wurzeln Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.	43
Tabelle 17: Trockengewicht der Sprossachse in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.	45
Tabelle 18: Trockengewicht der Wurzeln in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.	45
Tabelle 19: Durchschnittlichen Höhe der Sprossachse in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden. .	47
Tabelle 20: Blattfläche pro Topf in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.	49
Tabelle 21: Chlorophyllgehalt pro Topf in Prozent der Kontrollgruppe ohne Versalzung, A_Salzkonzentration 728,1 mg/kg NaCl, B_Salzkonzentration 1564,2 mg/kg NaCl; sandiger Boden.	51
Tabelle 22: Proben für Pflanzenwachstumstest.....	51
Tabelle 23: Entfernungsbereiche, aus denen Bodenproben gezogen wurden	60
Tabelle 24: Entfernungsstufen S36.....	66
Tabelle 25: Entfernungsstufen S5	67
Tabelle 26: Entfernungsstufen A8	69
Tabelle 27: Entfernungsstufen S6	70
Tabelle 28: Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) und prozentueller Anteil der einwertigen und zweiwertigen Kationen.	90
Tabelle 29: Anzahl der Proben, die im 1. Winter eine erhöhte Leitfähigkeit im Vergleich zur Referenz aufwiesen (>20% des gemessenen Referenzwertes). Die Entfernungangaben beziehen sich auf das Ende der asphaltierten Fläche.	92
Tabelle 30: Anzahl der Proben, die im 1. Winter eine erhöhte Chlorid-Konzentration im Vergleich zur Referenz aufwiesen (>20% des gemessenen Referenzwertes). Die Entfernungangaben beziehen sich auf das Ende der asphaltierten Fläche. Teilweise konnten nicht alle Probenahmedurchgänge bewertet werden (außerhalb des Kalibrationsbereichs etc.). Wenn dies der Fall war, wurde die Gesamtanzahl der bewertbaren Proben nach dem Schrägstrich angegeben.	93
Tabelle 31: Anzahl der Proben, die im 2. Winter eine erhöhte Leitfähigkeit im Vergleich zur Referenz aufwiesen (>20% des gemessenen Referenzwertes). Die Entfernungangaben beziehen sich auf das Ende der asphaltierten Fläche.	94

Tabelle 32: Anzahl der Proben, die im **2. Winter** eine **erhöhte Chlorid-Konzentration** im Vergleich zur Referenz aufwiesen (>20% des gemessenen Referenzwertes). Die Entfernungsangaben beziehen sich auf das Ende der asphaltierten Fläche. Teilweise konnten nicht alle Probenahmedurchgänge bewertet werden (außerhalb des Kalibrationsbereichs etc.). Wenn dies der Fall war, wurde die Gesamtanzahl der bewertbaren Proben nach dem Schrägstrich angegeben. 95

9 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., & Frühwirt, E. (1987). Schadstoffbelastung entlang von Autobahnen. Blei-, Cadmium- und Streusalzkontamination von Böden und Pflanzen im Nahbereich der Autobahn. Wien: Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten.
- 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*. Soil Science Society of America Proceedings, 13, 224-226. <https://doi.org/10.2136/sssaj1949.036159950013000C0039x>
- Bernstein, L., Ayers, A. D., & Wadleigh, C. H. (1951). The salt tolerance of white rose potatoes. *Am. Soc. Hort. 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.- 36 S., Oct. 1998., Linköping.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2011). Leitfaden Versickerung chloridbelasteter Straßenwässer.- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 34 S., Wien.
- 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 Wissenschaft GmbH. Däumling, 2012
- Cancilla, D. A., Baird, J. C. & Rosa, R. (2003). Detection of Aircraft Deicing Additives in Groundwater and Soil Samples from Fairchild Air Force Base, a Small to Moderate User of Deicing Fluids.- Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 70, 0868-0875, Mai 2003.
- Cekstere, G., Nikodemus, O. & Osvalde, A. (2008). Toxic impact of the de-icing material to street greenery in Riga, Latvia.- *Urban Forestry & Urban Greening*, 7, 207-217.
- Craig, S. & Zhu, W. (2018). Impacts of Deicing Salt and Nitrogen Addition on Soil Nitrogen and Carbon Cycling in a Roadside Ecosystem.- *Water Air Soil Pollut* 229, 187 S., 26.05.2018
- Däumling, T. (2012). *Streusalzmonitoring 2007-2011 Bericht*. Hamburg: Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU).
- deVos A., Bruning B., van Straten G., Oosterbaan R., Rozema J., van Bodegom P. (2016). Crop salt tolerance under controlled field conditions in The Netherlands, based on trials conducted by Salt Farm Texel.
- .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, 2018
- Gregori, M., Unterköfler, J., Lechner, J., Pistecky, W., Kuhn, C. & Scholler, C. (2008). Auswirkung der Salztreuung auf Boden und Grundwasser. - 227 S., Februar 2008, Gumpoldskirchen, Pregarten, Wien.
- Hoffmann, M., Blab, R., & Nutz, P. (2011). *Forschungsbericht. Optimierung der Feuchtsalztreuung*. Wien: TU Wien- Institut für Verkehrswissenschaften.
- Hoffmann, M., Leubolt, J., Grothe, H., Nur Koyun, A., Seifried, T., Stinglmayr, D., Hofko, B. & Gruber, M. (2021). Forschungsprojekt WINTERLIFE. WINTERdienst mit effektiven, nachhaltigen und nicht aggressiven Taumitteln sowie optimalen LIFE Cycle Costs der Bahn.- ARGE HOFFMANN / TUW Verkehr / TUW Chemie, 130 S., Dezember 2021, Wien.
- 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.
- Hootman, R.G., P.D., Kelsey, Reid, R. & Von Der Heide-Spravka, K. (1994): Factors affecting accumulation of deicing salts in soils around trees. - *Journal of Arboriculture*, 20, 196-201, May 1994.
- Kaddah, M. T., & S., G. (1964). Salinity effects on the growth of corn at different stages of development. *Agron. J.* 56, 214 - 217.
- Leonardi, S. (1985). *Streusalz = Seine Verfrachtung durch die Verkehrsgischt, sowie seine Auswirkungen auf die Vitalitaet und Physiologie von Gehoelzpflanzen*. Universität Basel: Dissertation.
- Lundmark, A. (2005). Modelling the Impacts of deicing salt on soil water in a roadside Environment.- 22 S., Feb. 2005, Stockholm.
- Lundmark, A. & Olofsson, B. (2007). Chloride Deposition and Distribution in Soils Along a deiced Highway - Assessment Using Different Methods of Measurement.- *Water, Air and Soil Pollution*, 182, 173-185, Jan. 2007.
- Lundmark, A. (2008): Monitoring Transport and Fate of de-icing salt in the roadside Enviroment - Modelling and Field Measurements.- 35 S., Jan. 2008.
- Lundmark, A. & Jansson, P.-E. (2008). Estimating the Fate of De-icing Salt in a Roadside Environment by Combining Modelling and Field Observations.- *Water, Air, and Soil Pollution*, 195, 215-232, Nov. 2008.
- Maas, E., & Grattan, S. (1999). *Crop Yields as Affected by Salinity*. In: *Agricultural Drainage*. Madison Wisc.: Agronomy Monograph Nr.38.
- Monai, B., Zraunig, B. & Pirker, M. (2020). Chlorid und Gischt.- *Der Wasserwirt*, 104 S., 16.12.2020, Maria Saal.
- Olofsson, B. & Lundmark, A. (2009). Monitoring the impact of de-icing salt on roadside soils with time-lapse resistivity measurements.- *Environmental Geology*, 57, 217-229, März 2009.

- Panek, K., Pirkl, H., Scholler, C. & Stundner, W. (2007). Evaluierung unterschiedlicher Möglichkeiten zu Kosteneinsparungen bei derzeit geforderten Umweltmaßnahmen im Zuge der Ableitung von salzbefrachteten Straßenoberflächenwässern.- 81 S., Oktober 2007, Wien.
- Peer, T., & Podlesak, K. (1991). *Auswirkungen von chloridhaltigen Auftaumitteln auf Wasser und Boden im Bereich von Autobahnen und Schnellstraßen*. Österreichische Wasserwirtschaft
- Rasul, H., Earon, R. & Olofsson, B. (2018). Detecting Seasonal Flow Pathways in Road Structures Using Tracer Tests and ERT.- *Water Air Soil Pollut*, 229, 358 S., 26.10.2018.
- 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.
- Statistik Austria*. (22. Februar 2022). Von <https://www.statistik.at/statistiken/land-und-forstwirtschaft/pflanzenbau/ackerbau-dauergruenland> abgerufen
- Tegethof, U. (1998). *Straßenseitige Belastung des Grundwassers. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bergisch Gladbach: Verkehrstechnik Heft V60 bast.
- Walleneder, W., & Tanji, K. (1996). *Agricultural salinity assesement and management*. Jodhpur (India): United Book Prints.
- 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.
- 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. Literaturstudie.- ETH Zürich, 95 S., 11.11.2013, Chur.