

**Untersuchung zum Einfluss der Wärmeemission von Hochspannungs-
Gleichstrom-Erdkabeln (HGÜ) auf Kulturpflanzen – Gefäßversuch mit
vier Kulturphasen**

**Dissertation
zur Erlangung des
Doktorgrades der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)**

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III
Agrar- und Ernährungswissenschaften,
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Herrn Uhlig, Ken

Erstgutachter: PD Dr. Jan Rücknagel
Zweitgutachter: Prof. Dr. Stephan Peth
Verteidigung: 19.05.2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen.....	IV
Tabellen.....	VI
Abstract.....	VII
Kurzfassung	VIII
1. Hintergrund	1
1.1 Energieversorgung und ihre Infrastruktur.....	1
1.2 Übertragungstechnik und mögliche Auswirkungen auf die Landwirtschaft.....	2
1.3 Der SuedOstLink und SuedOstLink+	5
1.4 Fragestellung und passende Versuchsgefäße	6
2. Material und Methoden	8
2.1 Übersicht über die untersuchten Faktoren und Faktorstufen	8
2.2 Aufbau der HAL-M-Versuchsgefäße.....	9
2.3 Verwendete Böden und ihre Eigenschaften – Faktor A: BODEN	11
2.4 Simulierte Wärmeemission – Faktor B: WARM.....	13
2.5 Simulierte Niederschläge – Faktor C: NIEDERSCHLAG	14
2.6 Veränderung des Versuchsdesigns in Kulturphase 4 – Faktor D: KULTUR	15
2.7 Pflanzenmaterial und Wuchsbedingungen.....	16
2.8 Erfasste Messdaten.....	18
2.9 Statistik.....	20
3. Ergebnisse	22
3.1 Bodentemperaturen in den HAL-M-Versuchsgefäßen	22
3.1.1 Bodentemperatur zu Beginn des Versuchs.....	22
3.1.2 Bodentemperaturen im Verlauf des Versuchs.....	23
3.1.3 Temperaturdifferenz zwischen Wärmeemission und Kontrolle.....	26
3.2 Bodenwassergehalte im Versuchszeitraum.....	28
3.2.1 Bodenwassergehalt in Kulturphase 1-3	28
3.2.2 Bodenwassergehalt in Kulturphase 4.....	30
3.3 Auswirkungen der Wärmeemission auf die Kulturpflanzen.....	32
3.3.1 Kulturphase 1 – Sommergerste (<i>Hordeum vulgare</i>)	33

3.3.2 Kulturphase 2 – Zuckerrübe (<i>Beta vulgaris subsp. Vulgaris</i>).....	35
3.3.3 Kulturphase 3 – Sommerweizen (<i>Triticum aestivum</i>)	37
3.3.4 Kulturphase 4 – Sommergerste und Luzerne (<i>Medicago sativa</i>)	40
3.3.5 Kulturphasenübergreifende Ertragsauswertung.....	42
3.3.6 Wurzelwachstum.....	46
3.3.7 Auswirkungen auf pflanzenphysiologische Prozesse	54
3.4 Methodenkontrolle der HAL-Ms nach Versuchsabschluss.....	58
4. Diskussion	62
4.1 Methodische Aspekte der Versuchsdurchführung	62
4.1.1 Boden- und Gewächshaustemperaturen.....	62
4.1.2 Wurzelbeobachtung.....	64
4.1.3 Sensortechnik	65
4.1.4 Änderung des Versuchsdesigns	66
4.2 Auswirkung der Wärmeemission auf das Pflanzenwachstum	67
4.2.1 Erträge und Qualitätsparameter.....	67
4.2.2 Pflanzenphysiologische Aspekte.....	75
4.2.3 Wurzelwachstum.....	77
4.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse.....	79
4.3.1 Gefäßversuch.....	79
4.3.2 Boden.....	80
4.5 Mögliche Wechselwirkungen zwischen Wärmeemission, Wurzelwachstum und Bodenwassergehalt.....	83
4.6 Untersuchungsbedarf.....	84
4.6.1 Bodenbürtige Pathogene.....	84
4.6.2 Nährstoffe, Aminosäuren und Enzyme	85
4.6.3 Makrofauna des Bodens	87
5. Schlussfolgerung.....	89
6. Literatur	91
7. Anhang	105

Abbildungen

Abbildung 1: SuedOstLink, Vorhaben 5 Wolmirstedt - Isar (BNetzA, 2023)	5
Abbildung 2: Schaubild zum Aufbau der HAL-M-Gefäße	10
Abbildung 3: Temperaturverlauf des Tag-Nacht-Zyklus	23
Abbildung 4: Temperaturverlauf über die vier Kulturphasen KP1-KP4	24
Abbildung 5: Durchschnittliche monatliche Temperaturdifferenz	27
Abbildung 6: Bodenwassergehalt der HAL-Ms über den Versuchszeitraum KP1-KP3	29
Abbildung 7: Bodenwassergehalt der Versuchsgefäße für die vierte Kulturphase	31
Abbildung 8: Mittelwerte wichtiger Ertragsparameter für Sommergerste KP1	33
Abbildung 9: Mittelwerte ertragsbeschreibender Parameter der Sommergerste in KP1	34
Abbildung 10: Mittelwerte wichtiger Ertragsparameter für Zuckerrübe in KP2	36
Abbildung 11: Mittelwerte der Qualitätsparameter der Zuckerrübe in KP2	37
Abbildung 12: Mittelwerte wichtiger Ertragsparameter für Sommerweizen in KP3	38
Abbildung 13: Mittelwerte ertragsbeschreibender Parameter für Sommerweizen in KP3	39
Abbildung 14: Mittelwerte der Ertragsparameter für die Sommergerste in KP4	41
Abbildung 15: Mittelwerte der Trockenmassegewichte für Luzerne in KP4	42
Abbildung 16: Erträge von KP1-KP4 umgerechnet in CRV-Werte	44
Abbildung 17: Beispielhafte Wurzelscans aus KP1	45
Abbildung 18: Wurzelintensität für Sommergerste in KP1	47
Abbildung 19: Wurzelintensität für Zuckerrübe in KP2	48
Abbildung 20: Wurzelintensität für Sommerweizen in KP3	50
Abbildung 21: Wurzelintensität für Sommergerste in KP4	52
Abbildung 22: Wurzelintensität für Luzerne in KP4	53
Abbildung 23: Wurzelintensität von KP1-KP4 umgerechnet in CRV-Werte	54
Abbildung 24: Feldaufgang in den einzelnen Kulturphasen.	55
Abbildung 25: Wuchshöhe der Sommergerste in KP1 auf SAND.	57
Abbildung 26: Entwicklungsstadien der Zuckerrübe in KP2 auf LÖSS.	57
Abbildung 27: Chlorophyllgehalt für Sommerweizen in KP3 auf SAND.	58
Abbildung 28: Einblick in geöffneten HAL-M-Gefäße.	59
Abbildung 29: Geöffnetes HAL-M-Gefäß unter KONT	60
Abbildung 30: Geöffnetes HAL-M-Gefäß unter WARM	60
Abbildung 31: Soll-Ist Umgebungstemperatur im Gewächshaus.	64
Abbildung 32: Fließschema zu den möglichen Wechselwirkungen	83
Abbildung 33: Bodenentnahme für SAND	105

Abbildung 34 Bodenentnahme für LÖSS	105
Abbildung 35: Beispielbild der Sommergerste in Kulturphase 1	106
Abbildung 36: Beispielbild der Zuckerrübe in Kulturphase 2	106
Abbildung 37: Beispielbild des Sommerweizens in Kulturphase 3	107
Abbildung 38: Beispielbild der Sommergerste und Luzerne in Kulturphase 4	107
Abbildung 39: Wurzelscan inklusive Zählraster	108
Abbildung 40: Einfluss der Niederschlagsstufen auf die Wurzelintensität	109

Tabellen

Tabelle 1: Faktoren und Faktorstufen der Kulturphasen 1-3	8
Tabelle 2: Faktoren und Faktorstufen in Kulturphase 4.....	9
Tabelle 3: Bodenphysikalische Eigenschaften der Substrate	12
Tabelle 4: Verlauf der simulierten Kabeltemperaturen für den Versuchszeitraum	14
Tabelle 5: Temperaturen und Tageslängen beispielhaft für KP1	17
Tabelle 6: Signifikanter Einfluss der Niederschlagsstufen auf die Bodentemperaturen.....	26
Tabelle 7: Ertrags- und p-Werte für KP1-KP4.....	43
Tabelle 8: Stichprobenartiger Vergleich bodenphysikalische Parameter	61
Tabelle 9: Durchschnittliche Temperaturdifferenzen	63

Abstract

The use of renewable energy for sustainable and climate-neutral electricity production is increasing worldwide. High-voltage direct-current (HVDC) transmission via underground cables helps connect large production sites with consumer regions. In Germany, nearly 5,500 km of new power line projects are planned, with an initial activation in 2038 or earlier. During transmission, heat is emitted to the surrounding soil, but the effects of the emitted heat on root growth and yield of overlying crops remain uncertain and need to be investigated. For this purpose, we designed and constructed a low-cost large HeAted soil L Monolith (HAL-M) model for simulating heat flow within soil with a natural composition and density. We could observe root growth, soil temperature and soil water content over an extended period. We performed a field trial-type experiment involving four-part crop rotation with 4 growth phases (GP) in a greenhouse. We showed that under the simulated conditions, heat emission could reduce the yield and root growth in varying degrees depending on the crop type and soil. Spring barley in GP1 reacted to the heat emission with significantly lower root intensity and thus significantly lower straw and, depending on the soil, significantly lower grain yields. The sugar beet in GP2 benefited from the higher soil water content left behind by the previous crop, but showed no significant reaction to the heat emission, similar to spring wheat in GP3. The renewed cultivation of spring barley in GP4 only tended to confirm the lower grain yields under heat emission in GP1. The yield of the first cut of lucerne in GP4 was significantly lower under heat emission, depending on the soil. No statement can be made about possible varietal differences in the results and other crops and soils.

Therefore, more research in this area is needed, and this experimental design could serve as a low-cost, rapid, and reliable standard for investigating thermal issues related to different soil compositions and types, precipitation regimes, and crops affected by similar projects. Beyond our research question, the HAL-M technique could serve as a link between pot and field trials with the advantages of both approaches. This method could enrich many research areas with the aim of controlling natural soil and plant conditions.

Keywords: High-voltage direct-current (HVDC) transmission, heat emission, earth cable, root growth, thermotropism, barley, crop rotation, pot experiment, HAL-M

Kurzfassung

Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen zur nachhaltigen und klimaneutralen Stromerzeugung erlebt gegenwärtig eine starke Zunahme auf globaler Ebene. Die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) über Erdkabel stellt eine Möglichkeit zur Verbindung großer Erzeugungsstandorte mit Verbraucherregionen dar. In Deutschland sind nahezu 5.500 km neue Stromleitungsprojekte in Planung, deren Inbetriebnahme bis spätestens 2038 vorgesehen ist. Während der Übertragung wird Wärme an den umliegenden Boden abgegeben, wobei die Auswirkungen dieser abgegebenen Wärme auf das Wurzelwachstum und den Ertrag der darüber liegenden Pflanzen bislang noch ungeklärt ist. Zu diesem Zweck wurde ein kostengünstiges, groß dimensioniertes Gefäß (HeAted soil Monolith, HAL-M) entwickelt, welches die Wärmeemission im Boden unter Berücksichtigung der natürlichen Zusammensetzung und Dichte des Bodens simuliert. Es war möglich, das Wurzelwachstum, die Bodentemperatur sowie den Bodenwassergehalt über einen längeren Zeitraum zu beobachten. Mit Hilfe der HAL-M-Gefäße wurde eine viergliedrige Fruchtfolge mit 4 Kulturphasen (KP) im Gewächshaus kultiviert. Die Ergebnisse zeigen, dass Wärmeemissionen den Ertrag und das Wurzelwachstum in Abhängigkeit von der Kulturart und dem Boden unterschiedlich stark reduzieren können. Die Sommergerste in KP1 reagierte auf die Wärmeemission mit einer signifikant geringeren Wurzelintensität und damit verbunden mit signifikant geringerem Stroh und bodenabhängig auch mit signifikant geringeren Kornträgen. Die Zuckerrübe in KP2 profitierte von den höheren Bodenwassergehalten, die die Vorfrucht unter Wärmeemission hinterlassen hatte, zeigte aber wie später der Sommerweizen in KP3 keine signifikante Reaktion auf die Wärmeemission. Der erneute Anbau von Sommergerste in KP4 bestätigte nur tendenziell die geringeren Kornträge unter Wärmemission in KP1. Der Ertrag des ersten Schnittes von Luzerne in KP4 war in Abhängigkeit vom Boden unter Wärmeemission signifikant geringer. Weitere Untersuchungen in diesem Bereich sind erforderlich, um ein besseres Verständnis der Auswirkungen von Wärmeemissionen zu erlangen, insbesondere für unterschiedliche Bodenzusammensetzungen und -typen, Niederschlagsregime und Kulturen, die von ähnlichen Projekten betroffen sind.

Keywords: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), Wärmeemission, Erdkabel, Wurzelwachstum, Thermotropismus, Gerste, Fruchtfolge, Topfversuch, HAL-M

1. Hintergrund

1.1 Energieversorgung und ihre Infrastruktur

Im Zeitraum von 1987 bis 2018 stieg der weltweite Primärenergieverbrauch von 271 EJ auf 580 EJ. Der Großteil des Verbrauchs entfiel dabei auf fossile Energieträger (Kober et al., 2020). Im Jahr 2020 verlor die Nachfrage aufgrund der COVID-19-Krise an Dynamik und sank auf 557 EJ (BP, 2021). Dies war vor allem auf den um 9,3 % geringeren Ölverbrauch zurückzuführen. Obwohl dieser Trend laut BP notwendig ist, um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zur Begrenzung der globalen Erderwärmung zu erreichen (BP, 2021), stieg der globale Primärenergiebedarf bereits wieder an. Im Jahr 2021 lag er um 1,3 % über dem Niveau von 2019 (BP, 2022). 2023 wurde so viel Öl verbraucht wie noch nie zuvor (Energy Institute, 2024). Eine Substitution fossiler Energieträger wird daher zwingend erforderlich sein, um die Pariser Umweltziele noch zu erreichen.

Erneuerbare Energien (EE) wie Wind, Sonne, Wasserkraft, Bioenergie und Geothermie haben das Potenzial, fossile Brennstoffe zu ersetzen (Moriarty und Honnery, 2016). Im Jahr 2021 erreichte die jährliche Wachstumsrate mit 15% ein Allzeithoch und übertraf damit alle anderen Kraftstoffe (BP, 2022). Im Jahr 2023 wurde ein Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Primärenergieverbrauch von 14,6 % registriert, was einem Anstieg von 0,4 % gegenüber dem Vorjahr entsprach (Energy Institute, 2024). Angesichts dieser Zahlen und der Notwendigkeit, das Energiesystem zu verändern, wird in der überwiegenden Mehrheit der wissenschaftlichen Veröffentlichungen sogar ein 100 % EE-System für machbar gehalten (Hansen et al., 2019). Die größten Potenziale liegen im Bereich der Sonnen- und Windenergie (Ellabban et al., 2014).

Erneuerbare Energien können negative Auswirkungen auf die Umwelt haben, wie beispielsweise eine höhere Landnutzungsintensität (Harjanne und Korhonen, 2019), negative Auswirkungen auf die Avifauna (Nazir et al., 2020) oder die Artenvielfalt (Rehbein et al., 2020). Richtig eingesetzt stellen sie jedoch einen praktikablen Ansatz dar, um die globale Erwärmung aufgrund der mit fossilen Brennstoffen verbundenen CO₂-Emissionen zu verringern (Lee, 2019; Owusu und Asumadu-Sarkodie, 2016; Shafiei und Salim, 2014). Tatsächlich verzeichneten die Solar- und Windkapazitäten in den Jahren 2020 und 2021 einen starken Anstieg (BP, 2022) und bereits 30 % der weltweiten Stromerzeugung stammen aus erneuerbaren Energien (IEA, 2022). Die globale Stromerzeugung stieg 2023 um 2,5% und erreicht ein Rekordniveau von 29.925 TWh (Energy Institute, 2024). Dieser Erfolg der erneuerbaren Energien bringt jedoch auch einige Herausforderungen mit sich.

Die Integration erneuerbarer Energien in bestehende Stromsysteme kann schwierig sein (Bird et al., 2016; Liang, 2017; Sinsel et al., 2020) und es werden Energiespeicherkapazitäten benötigt um die Schwankungen in der Energieerzeugung auszugleichen (Heide et al., 2011; IEC, 2011; Leonard et al., 2020; Zsiborács et al., 2019). Darüber hinaus ist die Übertragung der erzeugten Energie zu den Verbrauchsorten ein entscheidender Faktor (Bird et al., 2016; Child et al., 2019; Deng und Lv, 2020).

In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu berücksichtigen, dass erneuerbare Energiequellen häufig in abgelegenen Gebieten und weit entfernt von den Verbrauchsstellen liegen (de Jong et al., 2016; Miao et al., 2021; Sun et al., 2017). Aus diesem Grund sind neue Übertragungsleitungen, Stromnetze und Verbindungsleitungen erforderlich. Es gibt verschiedene Konzepte und Projekte, um Regionen weltweit miteinander zu verbinden. Einige dieser Konzepte beinhalten die Schaffung von größeren Supernetzen (Brinkerink et al., 2019; Reichenberg et al., 2022) während andere sogar ein globales Netzwerk vorsehen (Chatzivasileiadis et al., 2013).

Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie im Jahr 2023 und dem damit verbundenen Ausbau des Übertragungsnetzes für den Stromtransport von Nord nach Süd gilt Deutschland bereits heute als Wegbereiter für ein kontinentales Supernetz (Fairley, 2013; Neukirch, 2020; Pierri et al., 2017). Die Realisierung von Supernetzen erfordert den Bau von mehreren tausend Kilometern Stromleitungen. Die Einbindung Nordafrikas, das reich an erneuerbaren Energien ist, könnte beispielsweise den Bau von bis zu 286.260 km Kabeltrassen zur Realisierung eines interkontinentalen Supernetzes erfordern (Platzer et al., 2016).

Obwohl große Teile eines solchen Netzes aus Seekabeln oder kontinentalen Freileitungen bestehen würden, werden aufgrund lokaler Bürgerproteste hinsichtlich Umweltbedenken, visueller Beeinträchtigungen und erwarteter wirtschaftlicher Verluste auch Erdkabel in Betracht gezogen (Mueller, 2020; Neukirch, 2020). Die Bundesnetzagentur (BNetzA) hat aktuell knapp 5.000 km neue Stromleitungsprojekte (ex Offshore), die bis spätestens 2038 in Betrieb gehen sollen, als reine Erdkabelprojekte gekennzeichnet (BNetzA, 2023). Es ist zu erwarten, dass der zukünftige Ausbau der Stromnetze weltweit, insbesondere in Ballungsräumen, zunehmend als unterirdische Lösung nachgefragt wird.

1.2 Übertragungstechnik und mögliche Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Grundsätzlich sind Freileitungen für den Stromtransport kostengünstiger und einfacher zu bauen sowie zu unterhalten. Die öffentliche Diskussion zu diesem Thema ist jedoch von massiven Bürgerprotesten geprägt, bei denen bestimmte Argumentationsmuster immer

wieder auftauchen. Dazu zählen insbesondere die Aspekte „Verschandelung der Landschaft“, „Zerstörung der Natur“ sowie - in Bayern - „Verlust der Heimat“ (Kühne und Weber, 2018). Aus diesem Grund werden in Deutschland die Bestrebungen für den Neubau von Trassen in Richtung Erdkabel vorangetrieben. Generell stellt der Bau von unterirdischen Stromleitungen einen erheblichen Eingriff in den Boden dar. Dabei kann es zu Beeinträchtigungen der Bodenstruktur, Vermischungen oder Kontaminationen kommen. Der Bodenschutz spielt in Deutschland bereits eine wichtige Rolle, kann aber angesichts der Vielzahl zukünftiger Projekte noch verbessert werden (Bosold et al., 2022).

Nach Fertigstellung und Inbetriebnahme der Trassen entstehen bei der Stromübertragung elektromagnetische Felder. Diese nehmen mit steigender Spannung und Stromstärke zu. Während elektrische Felder relativ gut abgeschirmt werden können, wird an der Abschirmung magnetischer Felder noch geforscht (Rabah et al., 2023). Auch die Auswirkungen von elektromagnetischer Strahlung auf das Wachstum von Pflanzen werden ebenfalls untersucht (Ayesha et al., 2023). Ein möglicher Einfluss der Strahlung einer Stromtrasse auf das Pflanzenwachstum sowie Bodenstörungen durch die Baumaßnahmen wurden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Stromübertragung kann mit unterschiedlichen Systemen erfolgen. Während die Hochspannungs-Wechselstromtechnik zur Stromübertragung weit verbreitet ist, gewinnt die Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) zunehmend an Bedeutung. Bisher wurden HGÜ-Kabel vor allem als Seekabel zur Anbindung von Offshore-Windparks eingesetzt (Pierri et al., 2017). Sie werden jedoch bereits in mehr als 20 kontinentalen Übertragungsleitungen in China eingesetzt, um wichtige erneuerbare Energiequellen im Westen mit Verbrauchern im Osten zu verbinden (Sun et al., 2017). Darüber hinaus bietet die HGÜ-Technik Vorteile bei der Fernübertragung, der Integration erneuerbarer Energien, der Verbindung asynchroner Netze sowie zahlreiche technische und wirtschaftliche Vorteile (Pierri et al., 2017; Wang et al., 2020; Ye et al., 2018). Auch beim Ausbau des deutschen Erdkabelnetzes soll die HGÜ-Technik bei ca. 70% zum Einsatz kommen (BNetzA, 2022).

Während des Betriebs geben HGÜ-Kabel Wärme ab, wobei die Temperatur von verschiedenen Faktoren abhängt, wie z.B. der Stromstärke, dem Kabelquerschnitt oder dem Kabelisolierungsmaterial (Rerak und Ocloń, 2017; Wang, 2018). Bei der Prüfung eines 500-kV-Kabels mit heutigen Isolationsmaterialien wurde eine Kabelmanteltemperatur von über 50 °C gemessen (Diban und Mazzanti, 2021).

Der Boden um das Erdkabel kann als thermischer Isolator wirken, wobei die Wärmeableitung durch die Wärmeleitfähigkeit des Bodens bestimmt wird (Mey et al., 2014). Die

Wärmeleitfähigkeit des Bodens hängt im Wesentlichen von vier Faktoren ab: dem Wassergehalt, der Trockendichte, dem Mineralgehalt und der Porosität. Diese vier Faktoren sorgen dafür, dass die Wärmeleitfähigkeit des Bodens eine komplexe Betrachtungsweise benötigt (Dong et al., 2015; Zhang und Wang, 2017).

Zu den technischen Aspekten der Kabel- bzw. Bodentemperatur liegen bereits mehrere Studien vor (Ochoń et al., 2015; Olsen et al., 2013; Salata et al., 2015). Die für die Landwirtschaft relevante Frage, wie sich Wärmeemissionen auf den Ertrag und das Wurzelwachstum von Kulturpflanzen auswirken, ist jedoch wissenschaftlich noch wenig untersucht. Dies ist jedoch wichtig, wenn es um den Schutz des Bodens und der Bodenfruchtbarkeit sowie um Entschädigungsansprüche von Landwirten geht, die mögliche Ertragseinbußen befürchten. Eingriffe in den Boden können das Wurzelwachstum von Kulturpflanzen und damit die Ertragsleistung beeinflussen. Das Wurzelwachstum reagiert auf die Bodentemperatur und wird als Thermotropismus bezeichnet (Hooker, 1914; Wortmann, 1885). Obwohl dieses Thema bereits vor über 100 Jahren diskutiert wurde, ist es im Allgemeinen noch wenig erforscht. Bisher ist bekannt, dass Wurzeln je nach Pflanzenart höhere Temperaturen entweder suchen oder meiden (Muthert und Izzo, 2020; van Zanten et al., 2021). Obwohl sich der Großteil der Wurzelbiomasse von Kulturpflanzen in der Regel in den oberen 50 cm des Bodens befindet (Fan et al., 2016) ist eine tiefe Durchwurzelung von bis zu zwei Metern oder mehr für ein widerstandsfähiges Wachstum unerlässlich (Thorup-Kristensen et al., 2020) und wird mit den zunehmenden Herausforderungen des Klimawandels immer wichtiger. Die Wurzeln von Kulturpflanzen, die über der Kabeltrasse wachsen, befinden sich in einem Bereich erhöhter Bodentemperaturen. Dies kann sich negativ auf die Pflanzen auswirken.

In Deutschland gibt es nur vereinzelt Gutachten von Behörden oder Netzbetreibern direkt zu unterirdischen Leitungen bis 380 kV. Die Ergebnisse zeigen höhere Temperaturen im Oberboden von 0-40 cm, die stark um bis zu 5 °C schwanken und jahreszeitlichen Einflüssen unterliegen (Trüby, 2014). Im Rahmen des Großversuchs „Agrotherm“ an drei Standorten zur Nutzung der Abwärme von Kernkraftwerken wurden bereits in den 70er Jahren umfangreiche interdisziplinäre Untersuchungen zu den Auswirkungen unterirdischer Wärmeemissionen auf Boden und Kulturpflanzen durchgeführt (Reinken und Werning, 1982). Obwohl der Hintergrund ein anderer war und der Versuchsaufbau nicht direkt vergleichbar ist, können Erkenntnisse über mögliche Auswirkungen einer HGÜ-Leitung gewonnen werden, die an entsprechender Stelle mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit verglichen werden. Die Bundesnetzagentur hat im Jahr 2017 mögliche Ertragseinbußen offiziell ausgeschlossen (BNetzA, 2017). Allerdings wurde in einem Gutachten für das Bundesministerium für

Wirtschaft und Energie (BMWi) 2016 festgestellt, dass die Auswirkungen nicht umfassend abgeschätzt wurden (Consentec GmbH et al., 2016). In einem anderen Bericht wurden fälschlicherweise nur die obersten 50 cm des Bodens als kulturrelevant eingestuft (Runge et al., 2012) was, wie oben beschrieben, nicht ganz zutreffend ist. Daher soll in der vorliegenden Arbeit der Einfluss der Wärmeemission des SuedOstLinks auf das Wurzelwachstum untersucht werden.

1.3 Der SuedOstLink und SuedOstLink+

Die vorliegende Untersuchung zu den Auswirkungen einer Wärmeemission im Boden auf die Kulturpflanzen bezieht sich direkt auf das Bauvorhaben SuedOstLink, weshalb im Folgenden das Vorhaben kurz erläutert wird.

Der SuedOstLink (Vorhaben 5, Bundesbedarfsplan) ist ein länderübergreifendes Vorhaben zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung mit einer Spannung von 525 kV. Er wird als Erdkabel realisiert und verläuft durch Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen und Bayern mit einer Gesamtlänge von 538 km (Abbildung 1). Die Trasse ist seit 2013 im Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) enthalten, Vorhabenträger sind 50Hertz und TenneT. Die geplante Inbetriebnahme ist laut Bundesnetzagentur für 2027 vorgesehen. Darüber hinaus soll die

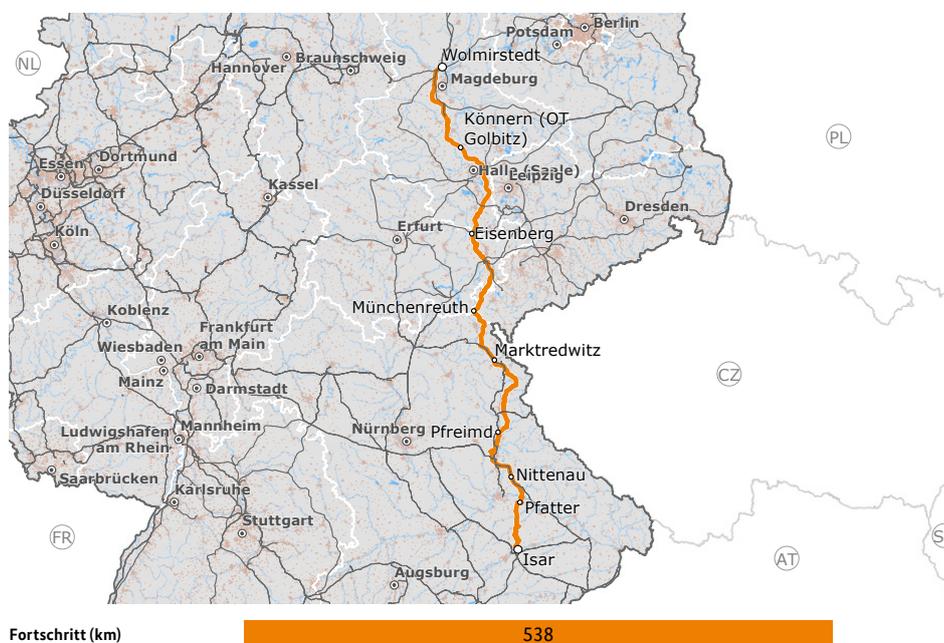


Abbildung 1: SuedOstLink, Vorhaben 5 Wolmirstedt - Isar (BNetzA, 2023)

Trasse auch für den SuedOstLink+ (Vorhaben 5a) genutzt werden. Dieser wurde 2021 in den BBPIG aufgenommen und erhöht den geplanten Eingriff in die Umwelt (BNetzA, 2023).

1.4 Fragestellung und passende Versuchsgefäße

Um die möglichen Auswirkungen von HGÜ-Erdkabeln auf Wurzeln und Ernteerträge zu untersuchen, wäre ein Langzeit-Feldexperiment an einer realen 525-kV-Leitung die aussagekräftigste Methode, um konkrete Ergebnisse zu erhalten und eine hohe Übertragbarkeit auf andere Standorte zu gewährleisten. Diese Methode ist jedoch kostenintensiv, wetterabhängig und während des laufenden Betriebs der Leitung nicht einfach durchzuführen. Auch die Möglichkeiten der In-situ-Wurzelbeobachtung mittels Mini-Rhizotron wären begrenzt. Darüber hinaus sind die offenen Fragen hinsichtlich der Auswirkungen der Wärmeemission auf Boden und Pflanzen für die Beurteilung solcher Bauvorhaben vor deren Beginn zu klären. Ein Langzeit- oder Feldversuch könnte erst nach frühestens drei bis vier Jahren verlässliche Daten liefern, wenn keine Witterungsextreme oder bauliche Probleme auftreten.

Daher wurden verschiedene Pflanzenversuche aus der Literatur ausgewertet, um geeignete Versuchsgefäße zu finden, mit denen kurzfristig übertragbare Ergebnisse vor der Baumaßnahme erzielt werden können. Aufwändige Semi-Feld-Großanlagen oder Lysimeteransätze zur Wurzelbeobachtung schieden aufgrund des enormen Aufwands aus (Eberbach et al., 2013; Svane et al., 2019b). Ziel war es, einen geeigneten Gefäßversuch für das Gewächshaus zu etablieren, der Vorteile bei der Kontrolle von Niederschlag, Klima und Boden-Pflanzen-Kombinationen bietet. Normale Pflanztöpfe, Behälter und Versuchsgefäße wie Mitscherlich sind für die meisten Pflanzenexperimente nicht ausreichend. Insbesondere wenn das Ziel ist, die Pflanzen bis zur Reife wachsen zu lassen, fehlt es an einem geeigneten Pflanzen-Erde-Verhältnis (Poorter et al., 2012). Außerdem ist ein repräsentatives Bodenprofil erforderlich, um die Wärmeverteilung durch den Boden zu berücksichtigen. In verschiedenen wissenschaftlichen Bereichen wurden bereits unterschiedliche Methoden beschrieben, wie z.B. Großcontainer (Hohmann et al., 2016) RhizoTubes (Jeudy et al., 2016) oder Bodensäulen (Kohne and Mohanty, 2005; Scholl et al., 2015). Auf der Grundlage dieser Methoden sollte ein eigenes Gefäß entwickelt werden, das die thermischen Auswirkungen des Erdkabels und die zu erwartende Wärmeemission während des Betriebs simuliert.

Unter Berücksichtigung aller Punkte bestand die Aufgabe zunächst darin,

- (i) einen kostengünstigen Prototyp eines großen Versuchsgefäßes zu konstruieren, in dem die Temperatur in 1,40 m Tiefe geregelt werden kann, um die Wärmeemission

von einem HGÜ-Kabel zu simulieren, der eine natürliche Bodenzusammensetzung und Lagerungsdichte aufweist, in dem die Bodentemperatur, der Bodenwassergehalt und das Wurzelwachstum überwacht werden können und der in einem Gewächshaus aufgestellt werden kann, um Niederschlag und Klima zu kontrollieren.

Dies würde einen erheblichen Fortschritt gegenüber Feldexperimenten bedeuten, mit schnelleren und umfassenderen Ergebnissen, zuverlässiger Klima- und Niederschlagssteuerung und geringeren Investitionen.

Ausgehend von diesem Prototyp sollte dann ein Versuchsaufbau entwickelt werden, um **(ii)** über eine mehrgliedrige Fruchtfolge die Auswirkungen einer simulierten Wärmeemission auf das Wurzelwachstum, die Pflanzenentwicklung und den Ertrag, **(iii)** Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Bodentemperatur in den unterschiedlichen Bodenschichten, **(iv)** und eventuelle Veränderungen in wichtigen Bodeneigenschaften zu untersuchen.

Fragen der Bodenverdichtung, der Veränderung des Bodenprofils oder des Flächenverlustes, die im Zuge der Baumaßnahmen auftreten können, wurden nicht berücksichtigt. Das Projekt war ursprünglich auf drei Jahre angelegt, erstreckt sich aber inklusive Projektverlängerung von April 2019 bis Dezember 2022.

Im Folgenden werden zunächst im Kapitel Material und Methoden das Versuchsdesign, der Aufbau der für diesen Versuch entwickelten Versuchsgefäße und die verwendeten Methoden erläutert. Im anschließenden Ergebnisteil werden die Erkenntnisse des Versuchs dargestellt, gefolgt von einer abschließenden Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. Die Diskussion beleuchtet die gewonnenen Erkenntnisse kritisch und geht auf mögliche Schwächen des Versuchs ein. In der Schlussfolgerung werden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um Antworten auf die formulierten Fragestellungen zu finden.

2. Material und Methoden

2.1 Übersicht über die untersuchten Faktoren und Faktorstufen

Der Versuch fand von November 2019 bis Ende 2022 im Gewächshaus der universitären Feldversuchsstation Halle/Kühnfeld statt. Es wurden große Versuchsgefäße (HAL-Ms, HeAte*d* so*L* Monoliths) konstruiert, um die Wirkung der Wärmeemission (WARM) auf zwei Bodensubstrate (LÖSS, SAND), drei Niederschlagsstufen mit TROCKEN, MITTEL und FEUCHT (T, M, F) und zunächst drei Kulturpflanzen (Sommergerste, Zuckerrübe, Sommerweizen) mit jeweils zwei Replikaten zu untersuchen. Die Kulturpflanzen wurden nacheinander in drei aufeinanderfolgenden Kulturphasen (KP) angebaut, um eine Fruchtfolge zu simulieren.

Tabelle 1: Faktoren und Faktorstufen der Kulturphasen 1-3

	24 HAL-M-Versuchsgefäße											
Faktor A: BODEN	12 x Tiefgründiger LÖSS						12 x Sandlöss über SAND					
Faktor B: WARM	6x KON- TROLLE			6x WARM (50 °C)			6x KON- TROLLE			6x WARM (50 °C)		
Faktor C: NIEDERSCHLAG	2x TROCKEN	2x MITTEL	2x FEUCHT	2x TROCKEN	2x MITTEL	2x FEUCHT	2x TROCKEN	2x MITTEL	2x FEUCHT	2x TROCKEN	2x MITTEL	2x FEUCHT
Kulturphasen (KP) der Fruchtfolge	KP1 Sommergerste (<i>Hordeum vulgare</i>) 27.11.2019 - 17.04.2020 KP2 Zuckerrüben (<i>Beta vulgaris</i>) 08.09.2020 - 19.01.2021 KP3 Sommerweizen (<i>Triticum aestivum</i>) 19.02.2021-16.06.2021											

In der vierten Kulturphase wurde das Versuchsdesign modifiziert. Anstelle des Faktors C (NIEDERSCHLAG) wurden die Kulturarten Sommergerste (SG) und Luzerne (LU) als neuer Faktor D (KULTUR) in den Versuchsablauf integriert (Tabelle 2). Die zuvor definierten Niederschlagsstufen wurden zu diesem Zeitpunkt aufgehoben und durch eine einheitliche Bewässerung mit Niederschlagsstufe MITTEL ersetzt, um einen parallelen Anbau von Sommergerste und Luzerne zu ermöglichen. Durch diese Änderung des Versuchsdesigns ergaben sich in KP4 drei Replikate pro Versuchsglied. Bodentemperatur, Bodenwassergehalt, Wurzelungsintensität, Ertrag sowie verschiedene Ertragsparameter und pflanzenphysiologische Aspekte wurden zwischen WARM und Kontrolle (KONT) sowie in KP 1 bis 3 zwischen den verschiedenen Niederschlagsstufen verglichen.

Tabelle 2: Faktoren und Faktorstufen in Kulturphase 4

SG = Sommergerste, LU = Luzerne

		24 HAL-M-Versuchsgefäße							
Faktor A: BODEN	Faktor B: WARM	12x Tiefgründiger LÖSS				12x Sandlöss über SAND			
		6x KON- TROLLE		6x WARM (50 °C)		6x KON- TROLLE		6x WARM (50 °C)	
Faktor D: KULTUR		3x SG	3x LU	3x SG	3x LU	3x SG	3x LU	3x SG	3x LU
		KP4 Luzerne (<i>Medicago sativa</i>) 03.12.2021 - 10.05.2022 und Sommergerste (<i>Hordeum vulgare</i>) 03.12.2021 - 28.04.2022							

2.2 Aufbau der HAL-M-Versuchsgefäße

Nach erfolgreichem Bau eines Prototyps wurden insgesamt 24 HAL-M-Versuchsgefäße, im Folgenden auch HAL-Ms genannt, mit einer Höhe von 1,56 m und einem Durchmesser von ca. 0,65 m gebaut. Jeder Behälter enthielt ca. 400 kg natürliches Bodensubstrat und hatte eine Pflanzfläche von 0,177 m². Die Basis bildete ein Fassheizroller (HBR10, Hillesheim), bestehend aus einem Stahlrahmen, einer Metallplatte mit integriertem Heizelement (Heizplatte) und sechs Polymer-Lenkrollen (Abbildung 2). Der HBR10 hatte einen Innendurchmesser von 0,61 m und eine Höhe von 0,175 m. Die Heizplatte hatte einen Durchmesser von 0,51 m und konnte mit einer Leistung von 1200 Watt auf 100 °C aufgeheizt werden. Die Temperaturregelung erfolgte über einen externen Temperaturregler (HT63, Hillesheim) auf Basis einer Proportional-Integral-Differential-Regelung (PID). Zusätzliche Zeitschaltuhren ermöglichten unterschiedliche Tag- und Nachttemperaturen. Zwölf der Fassheizer wurden als Basis für die Kontrollgruppe verwendet. Diese waren baugleich, jedoch ohne Heizelement.

Kanalgrundrohre (KG) aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (UPVC) mit einem Durchmesser von 50 cm (KG 500 SN 4) wurden auf eine Länge von jeweils 1,40 m zugeschnitten und senkrecht muffenseitig auf die Fassheizrollen installiert. Die Außenwand wurde mit flexibler Rohrisolierung aus 0,032 m dickem Elastomer-Synthesekautschuk (Armaflex XG 32) isoliert. Für die Wurzelbeobachtung wurden zwei transparente Röhren mit einem Durchmesser von 70 mm in unterschiedlichen Höhen diagonal zur Rohrwand in einem Winkel von 45° angeordnet und horizontal zueinander versetzt, um einen größeren Wurzelraum abzudecken und „Wurzelschatten“ durch das obere Rohr zu reduzieren (Abbildung 2, a). Die

Beobachtung des Wurzelwachstums war mit dem CI-600 In-Situ Root Imager (CID Bio-Science) in einem Bereich von 22,5 – 53,0 und 71,0 – 101,5 cm unter der Oberkante möglich. Wenn keine Messungen stattfanden wurden die Enden der beiden transparenten Röhren verschlossen und abgedeckt, um Lichteinwirkung zu verhindern.

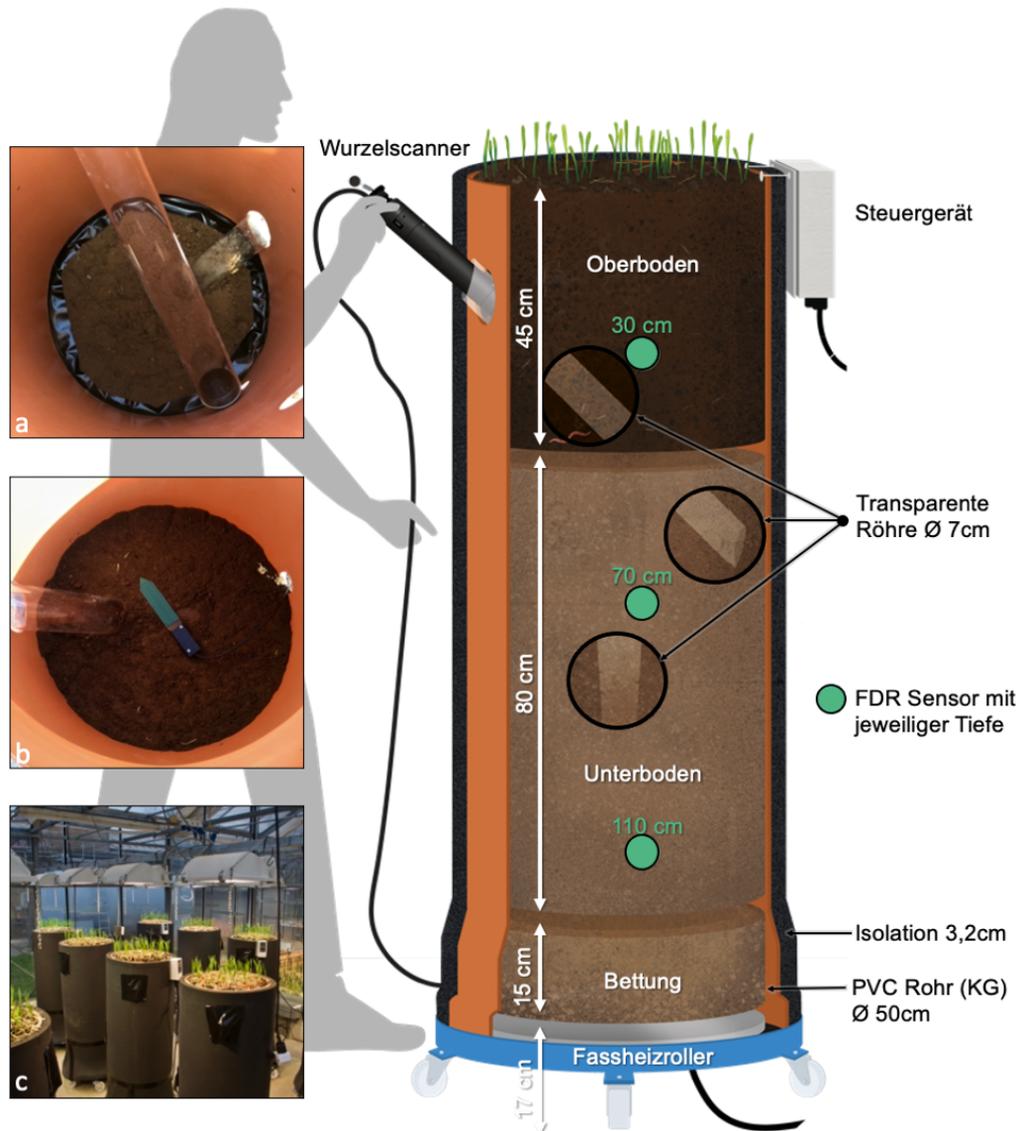


Abbildung 2: Schaubild zum Aufbau der HAL-M-Gefäße

Bild (a): Wurzelsperre und transparente Röhren zur Wurzelbeobachtung; (b) FDR Messsonde (SMT-100) in 30 cm Tiefe und (c) die Versuchsgefäße im Gewächshaus.

Zur Überwachung der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte wurden drei Frequency Domain Reflectometry-Messsonden (SMT 100, TRUEBNER) horizontal in 30, 70 und 110 cm Tiefe installiert. Hierfür wurden Löcher in die KG-Rohre gebohrt und nach der Installation abgedichtet (Abbildung 2, b). Die 24 Gefäße wurden randomisiert und nach Bodensubstrat getrennt in zwei unterschiedliche Gewächshausabteilen platziert. Während der Versuchszeit verblieben sie an ihren Positionen (Abbildung 2, c).

2.3 Verwendete Böden und ihre Eigenschaften – Faktor A: BODEN

Stellvertretend für die verschiedenen Bodentypen im geplanten Trassenverlauf in Sachsen-Anhalt wurden ein tiefgründiger Löss (LÖSS) und ein Sandlöss über Sand (SAND) ausgewählt. Die Eignung möglicher Entnahmestellen für die ausgewählten Böden wurde anhand von Texturanalysen überprüft. In Tabelle 3 sind Details zu den verwendeten Substraten aufgeführt. Für LÖSS wurde der geeignete Oberboden (OB) Uu nördlich von Bernburg direkt von einer Ackerfläche und der geeignete Unterboden (UB) Ut2 westlich von Bernburg aus dem KSW Kies- und Sandwerk bei Güsten entnommen (Abbildung 34, Anhang). Für SAND konnte der geeignete OB und UB südöstlich von Merseburg in der Kiesgrube Schladebach gewonnen werden (Abbildung 33, Anhang). Ober- und Unterboden wurden getrennt entnommen und bis zur Weiterverarbeitung in den Gewächshäusern mit Folien abgedeckt gelagert. Die Vorgaben für das Bettungsmaterial lagen bei einem Tongehalt von 3-8 M. % und einem Schluffgehalt von 10-25 M. % (Ickler, 2019). Um diese Vorgaben zu erfüllen, wurden fünf Teile des St2 mit einem Teil des Ut2-Substrat gemischt. Daraus ergaben sich rechnerisch ein Tongehalt von 5,5 M. % und ein Schluffgehalt von 15,3 M. %. Das Bodensubstrat des Bettungsmaterials entsprach somit einem S12. Die Ober- und Unterbodenschicht in den Behältern hatte eine Mächtigkeit von 45 cm bzw. 80 cm. Um den gegebenen Anforderungen des Erdkabelbaus gerecht zu werden, wurde vorab eine Bettungsschicht mit einer Mächtigkeit von 15 cm und der ermittelten Proctordichte (DIN 18127: 2012-09, 2012) eingebaut. Die Substrate wurden schichtweise eingebaut und aller 5 cm manuell verdichtet. Während der Befüllung wurden 250 cm³ Stechzylinder (Ø 7,2 cm, 6,0 cm hoch) aus den verschiedenen Schichten entnommen, um die Feldkapazität (FK), den permanenten Welkepunkt (PWP) und die Trockenrohdichte (TRD) zu bestimmen. Die Stechzylinder wurden sieben Tage lang in Sandboxen mit hängender Wassersäule auf ein Matrixpotential von -6 kPa entsprechend FK (pF 1,8) entwässert (Klute, 1986). Der PWP (pF 4,2) wurde mit Hilfe von Drucktöpfen anhand

2. Material und Methoden

Tabelle 3: Bodenphysikalische Eigenschaften der Substrate

Trockenrohdichte (TRD), Gesamtporenvolumen (PV_{ges.}), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f -Wert); ^aSponagel et al., 2005; ^bRücknagel et al., 2017; ^c(Schlüter et al., 2018); ^d(Altermann et al., 2005); ^e(Kaufmann et al., 2010); ^f(Petelkau, 1991)

		LÖSS			SAND		
		Oberboden	Unterboden	Bettung	Oberboden	Unterboden	Bettung
Bodenbeschreibung	Tiefe in m	0 - 0,45	0,45 - 1,25	1,25 - 1,40	0 - 0,45	0,45 - 1,25	1,25 - 1,40
	Sand %	10	10	15	35	92	15
	Ton %	7	12	6	23	5	6
	Bodenart ^a	Uu reiner Schluff	Ut2 schwach toniger Schluff	(Sl2) schwach lehmiger Sand	Ls2 schwach sandiger Lehm	St2 schwach toniger Sand	(Sl2) schwach lehmiger Sand
	C _{org} M. %	1,28	0,29		1,86	0,35	
	pH	7,0	7,6		6,2	7,7	
Makronährstoffe	N _{min} kg ha ⁻¹	201	16		36	12	
	P mg 100g ⁻¹	3,3	1,5		4,6	1,1	
	K mg 100g ⁻¹	35,7	4,1		2,9	1,6	
	Mg mg 100g ⁻¹	12,9	10,1		11,9	4,8	
	Ca mg 100g ⁻¹	342	435		125	203	
Mikronährstoffe	Na mg kg ⁻¹	27,2	71,7		21,4	21,6	
	B mg kg ⁻¹	1,58	0,25		1,09	0,49	
	Mn mg kg ⁻¹	133	1,38		118	7,05	
	Cu mg kg ⁻¹	2,24	0,63		2,83	0,30	
	Zn mg kg ⁻¹	3,20	0,48		4,13	0,29	
Bodenphysikalische Eigenschaften	TRD _{ist} g cm ⁻³	1,22	1,40	1,58	1,45	1,63	1,58
	TRD _{Ziel} g cm ⁻³	1,22 ^{b,c}	1,42 ^d	2,03	1,45 ^{e,f}	1,60 ^{e,f}	2,03
	PV _{ges} Vol. %	53,4	46,3		44,3	37,7	
	LK Vol. %	11,7	4,0		12,5	21,5	
	FK _{ist} Vol. %	41,7	42,3		31,7	16,5	
	FK _{KAS} Vol. %	43	37		34	18	
	PWP Vol. %	15,2	13,3		15	7	
	k _f cm d ⁻¹	26,6	9,9		15,7	99,7	

des Wassergehalts bei einem Bodenmatrixpotential von -1,5 MPA ermittelt (ISO11274, 2019). Zur genauen Berechnung der TRD wurde die wahre Dichte mit einem Heliumpyknometer (Ultrapyc 5000, ANTON PAAR) bestimmt. Die angestrebte TRD (TRD_{Ziel}) entsprach der aus verschiedenen Veröffentlichungen bekannten TRDs für die Bodentypen in dieser Region (Altermann et al., 2005; Kaufmann et al., 2010; Rücknagel et al., 2017; Schlüter et

al., 2018). FK_{KAS} verweist als Referenz auf vergleichbare Texturklassen der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (Eckelmann et al., 2022). Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_f , cm d^{-1}) der Bodenproben wurde mit einem stationären System mit einer Fließzeit von 4 Stunden gemessen, wie in Klute und Dirksen (1986) beschrieben. Aufgrund der Konstruktion der Behälter und der eingeschränkten Möglichkeit, ausschließlich von Hand zu verdichten, konnte der Zielwert für das Bettungsmaterial nicht erreicht werden.

Nach Abschluss des Versuchs im Jahr 2022 wurden aus dem Oberboden von LÖSS beim Öffnen von zwei HAL-M jeweils drei Stechzylinder aus einem WARM- und einem KONT-Gefäß in 30 cm Tiefe entnommen. Für den Unterboden wurden acht Stechzylinder aus 70, 80 und 110 cm entnommen, aus denen die Mittelwerte berechnet wurden. Analog zu den Stechzylindern vor Versuchsbeginn wurden TRD, FK und k_f bestimmt.

Um präferenzielles Wurzelwachstum an der Innenfläche der Gefäße zu vermeiden, wurde alle 15 cm ein Gewebiband in L-Form aufgeklebt, um die Wurzeln zurück zur Gefäßmitte zu führen (Abbildung 2, a). Insgesamt bestand der Versuchsaufbau aus jeweils sechs beheizten und sechs Kontrollgefäßen pro Bodensubstrat LÖSS und SAND.

Nach dem Einbau der Substrate war die Bodenstruktur zunächst gestört. Erst mit zunehmender Anzahl von Kulturphasen näherte sich die Bodenstruktur einem natürlichen Zustand an. Um diesen Prozess zu beschleunigen, wurden Regenwürmer eingesetzt. Eine in Deutschland häufig vorkommende Art ist der Gewöhnliche Regenwurm (*Lumbricus terrestris*). Dieser Tiefgräber gilt als Bioindikator für die Bodenqualität. Die Ausbringung erfolgte 15 Tage nach der Aussaat mit drei Tieren pro Gefäß. Zur Simulation einer pfluglosen Bodenbearbeitung und als erste Nahrungsquelle sowie zur Verringerung der Verdunstung wurde eine Stroheinstreu von 25 g pro Gefäß (14 dt ha^{-1}) verwendet.

In diesem Aufbau wurden Bodenschadensverdichtungen aufgrund der Installation und elektromagnetischer Felder von HGÜ-Leitungen nicht berücksichtigt (Zilberti et al., 2010). Die Analyse der Wärmeausbreitung im Boden wurde nur in grundlegendem Maßstab behandelt.

2.4 Simulierte Wärmeemission – Faktor B: WARM

Die Wärmeemission erfolgte, wie bereits erwähnt, mit Hilfe des Fassheizrollers HBR10 und dessen integriertem Heizelement. Zu Beginn des Versuchs wurde ein Funktionstest bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt, der zeitlich mit dem Beginn der ersten Kulturphase zusammenfiel. In den ersten Wochen des Versuchs wurde angenommen, dass der Mantel des HGÜ-Kabels aufgrund der geplanten Übertragungskapazität tagsüber Temperaturen von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ und nachts

von 40 °C erreichen kann. Daher wurde ein Tag-Nacht-Zyklus für die simulierte Temperatur durchgeführt. Neue Erkenntnisse der für den Kabelbau zuständigen Abteilung bei 50Hertz führten Anfang Januar 2020 zu einem Wechsel zu konstanten 50 °C und damit zu einer Änderung des Faktors WARM (Ickler, 2020). Die geschalteten Temperaturen während der Kulturphasen können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Verlauf der simulierten Kabeltemperaturen für den Versuchszeitraum

Zeitraum	Temperatur
25.11.2019 – 02.12.2019	40 °C
03.12.2019 – 14.01.2020	16 h 60 °C / 8 h 40 °C
15.01.2020 – 10.05.2022	50 °C

2.5 Simulierte Niederschläge – Faktor C: NIEDERSCHLAG

Als dritter Faktor wurden unterschiedliche Jahresniederschlagssummen gewählt, da Wechselwirkungen zwischen Wärmeausbreitung und Bodenfeuchte bekannt sind (Koorevaar et al., 1983). Die Datengrundlage bilden die Jahresniederschlagssummen für den Zeitraum 1988-2018 an den vier Standorten Magdeburg, Bernburg, Halle/Leipzig (Flughafen) und Jena, die sich in der Nähe der geplanten Trasse des SuedOstLink befinden. Um die Niederschlagsmengen für ein trockenes (T), ein mittleres (M) und ein feuchtes (F) Jahr zu definieren, wurde der gesamte Datensatz in Quartile eingeteilt. Der Mittelwert aller Werte unterhalb des unteren Quartils ($Q_{0,25}$) diente als Niederschlag für das trockene Jahr (407 mm), der Mittelwert zwischen $Q_{0,25}$ - $Q_{0,75}$ als mittlerer Niederschlag (527 mm) und der Mittelwert aller Werte oberhalb des oberen Quartils ($Q_{0,75}$) als Niederschlag für das feuchte Jahr (678 mm). Um die saisonalen Niederschlagsmengen bei der Bewässerung zu simulieren, wurde aus dem Datensatz eine prozentuale Verteilung der Jahresniederschlagssummen auf die Monate berechnet. Zwischen den Kulturphasen wurde der Niederschlag, der normalerweise in den Wintermonaten fällt, bewässert. Der Niederschlag während des Versuchs wurde manuell mit einem Messbecher bewässert. Da in den frühen Stadien von KP1 ein etwas schnelleres Pflanzenwachstum beobachtet wurde, wurde die monatliche Bewässerung von 30 auf 22 Tage reduziert. Dies war auch in den späteren Kulturphasen notwendig.

In der betrachteten Versuchsregion in Sachsen-Anhalt wird der natürliche Bodenwassergehalt in der Regel im Herbst und Winter wieder aufgefüllt. Da die Böden im Sommer entnommen wurden, musste dieser Vorgang vor Versuchsbeginn in den Gefäßen künstlich

nachgestellt werden. Die Feldkapazität der Böden, die mit den Stechzylindern bestimmt wurde, war vergleichbar mit den Daten aus der Literatur, wie in Tabelle 3 dargestellt. Zu Beginn des Versuchs wurde mit den FDR-Sonden in den drei Tiefen nur ein durchschnittlicher volumetrischer Wassergehalt von ca. 70 % gemessen. Da diese Werte auch bei weiterer Bewässerung kaum höher lagen, kann davon ausgegangen werden, dass sie das Maximum der Bodenwassergehalte in den Gefäßen darstellen. Die Aufwässerung der HAL-Ms erreichte also nicht 100 % der theoretisch im Labor ermittelten Feldkapazität.

2.6 Veränderung des Versuchsdesigns in Kulturphase 4 – Faktor D: KULTUR

Nach Abschluss der dritten Kulturphase wurde das Versuchsdesign im Herbst 2021 modifiziert und eine vierte Kulturphase angeschlossen. Dadurch konnte das Spektrum der untersuchten Kulturpflanzen erweitert werden. Im Rahmen der vierten Kulturphase sollten neue Erkenntnisse im Bereich der Futterpflanzen, bei denen die gesamte oberirdische Pflanze als Ernteorgan dient, gewonnen werden. Silomais hat als Futterpflanze in Sachsen-Anhalt eine große Bedeutung im Anbauumfang. Aufgrund seiner Wuchshöhe war er jedoch für den Versuchsaufbau nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde die Luzerne als Futterleguminose bevorzugt. Im Gegensatz zu den drei bisher untersuchten Kulturen ist die Luzerne in der Lage, Stickstoff aus der Luft zu binden, da sie eine Symbiose mit sogenannten Knöllchenbakterien eingeht. In der wissenschaftlichen Literatur wird berichtet, dass höhere Bodentemperaturen zu einer reduzierten Aktivität der Knöllchenbakterien führen (Ferguson et al., 2019). Der Einfluss der Wärmeemission einer unterirdischen Hochspannungsgleichstromleitung auf die Aktivität der Knöllchenbakterien ist bisher nicht bekannt und könnte möglicherweise ertragsrelevant sein. In der vierten Anbauphase erfolgte daher der Anbau von Luzerne und parallel dazu ein erneuter Anbau von Sommergerste, um die Ergebnisse der ersten Anbauphase zu validieren.

Da die Niederschlagsstufen in den ersten drei Kulturphasen einen deutlichen Einfluss auf den Ertrag, aber nur eine untergeordnete Rolle auf die Wärmeausbreitung im Boden hatten, wurden die Niederschlagsstufen vereinheitlicht. Vor Beginn der vierten Kulturphase wurde der Bodenwassergehalt bei allen Versuchsgefäßen analog zur ersten Kulturphase vollständig aufgefüllt und anschließend einheitlich mit der Niederschlagsstufe MITTEL (527 mm) bewässert.

2.7 Pflanzenmaterial und Wuchsbedingungen

Die im Versuch angebaute Fruchtfolge bestand aus Sommergerste (*Hordeum vulgare*) KP1, Zuckerrübe (*Beta vulgaris*) KP2, Sommerweizen (*Triticum aestivum*) KP3 und Luzerne (*Medicago sativa*) sowie parallel dazu Sommergerste in KP4 (Abbildung 35, Abbildung 36, Abbildung 37, Abbildung 38, Anhang). In Deutschland, bzw. unter Berücksichtigung des Projektrahmens speziell in Sachsen-Anhalt, wurde Weizen (*Triticum aestivum*) im Jahr 2022 von mehr als der Hälfte der 4.250 landwirtschaftlichen Betriebe auf 27 % der Fläche angebaut und nahm damit den größten Anteil ein. Gerste (*Hordeum vulgare*) wurde von 1.710 Betrieben auf insgesamt 9 % der Fläche angebaut (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, 2022). Die Sommerungen der beiden Getreidearten spielen zwar eine untergeordnete Rolle, wurden aber für den vorliegenden Versuch ausgewählt, da die für einen erfolgreichen Anbau notwendige Vernalisation im Gewächshaus nur schwer zu realisieren war.

Neben den beiden Halmfrüchten wurde die Zuckerrübe (*Beta vulgaris* var. *altissima*) als Hackfrucht ausgewählt. Einst der Motor der Industrialisierung in Sachsen-Anhalt (Schaal, 2015), wird die Zuckerrübe heute nur noch auf insgesamt 5 % der Fläche, aber mit dem größten Anteil unter den Hackfrüchten, von 930 Betrieben angebaut (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, 2022).

Für die vierte Kulturphase wurde neben dem erneuten Anbau von Sommergerste die Luzerne (*Medicago sativa*) ausgewählt. Im Jahr 2019 wurden in Sachsen-Anhalt auf rund 18.500 Hektar Leguminosen angebaut. Gut ein Fünftel der mehr als 4.000 landwirtschaftlichen Betriebe in Sachsen-Anhalt baute Leguminosen zur Grünpflanzenernte an (Richter, 2019). Neben den botanischen und pflanzenbaulichen Besonderheiten spielt diese Kulturartengruppe auch im Trassenverlauf des SuedOstLinks eine zunehmende Rolle.

Die gesamte Fruchtfolge wurde unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus angebaut. Statt einer gewächshaustypischen Kulturführung mit konstanten Umweltbedingungen, wurde eine stufenweise Simulation der natürlichen Verhältnisse gewählt. In Tabelle 5 ist beispielhaft der Temperatur- und Tageslichtverlauf für die erste Kulturphase dargestellt. Die angestrebten Bedingungen orientierten sich an vorangegangenen Versuchen mit Sommergerste im Gewächshaus (Pöhlitz et al., 2020) und wurden bei Bedarf angepasst. Ab der zweiten Kulturphase wurden die Gewächshauskabinen von innen mit Rettungsdecken (DIN 13164:2022-02, 2022) verkleidet, um die Einstrahlung der tiefstehenden Sonne in den Wintermonaten und damit eine Beeinflussung der Versuchsgefäße im Randbereich zu verhindern.

Tabelle 5: Temperaturen und Tageslängen beispielhaft für KPI

Tage nach der Aussaat (Days After Sowing DAS), ^a(Lancashire et al., 1991)

Datum	DAS	BBCH ^a	Phase	Nacht (°C)	Tag (°C)	Tageslichtlänge (h)
27.11.19	0	00-11	Keimung	5	10	10
13.12.19	16	11-12	Blattentwicklung	10	15	12
18.12.19	21	12-34	Blattentwicklung/ Bestocken	10	15	13
04.02.20	69	34-39	Schossen	15	15	14
10.02.20	75	39-75	Ähren-, Blüte-, Fruchtentwicklung	15	20	16
05.03.20	99	75-99	Reife	18	22	16
18.04.20	143	99	Ernte			

Der Nährstoffgehalt des Bodens wurde vor Beginn der Fruchtfolge von Eurofins Agraranalytik (Eurofins Agraranalytik GmbH, Jena, Deutschland) bestimmt (Tabelle 3). Dünger in Form von Kalziumammonsalpeter (N) und Kaliumoxid (K) wurden vor jeder Ernte nach gängiger Praxis auf der Basis einer Nährstoffbilanzierung ausgebracht. Die Lichtintensität wurde kontinuierlich auf etwa $400 (\pm 30) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ eingestellt (Sadok und Tamang, 2018; Tyrka et al., 2015). Der Pflanzenschutz erfolgte ausschließlich mit den Nützlingen *Aphidoletes aphidimyza*, *Chrysoperla carnea* oder *Trichogramma spec.*, falls erforderlich. Eine Behandlung gegen pilzliche oder bakterielle Krankheiten war aufgrund des sehr geringen Befalls nicht erforderlich. Die Ernte erfolgte nach der Vollreife der Pflanzen. Erntegut und Ernterückstände wurden getrennt geerntet und 48 Stunden bei 105 °C getrocknet. Nach dem Wiegen wurden die Ernterückstände vor Beginn der nächsten Wachstumsperiode wie in der Praxis üblich wieder in die entsprechenden Behälter eingearbeitet.

Sommergerste KPI

Die erste Kulturphase begann am 27.11.2019 mit der Aussaat der Sommergerstensorte *KWS Karina*. Diese Sorte ist kurzwüchsig und resistent gegen Mehltau. Zunächst wurde die Sommergerste mit einer Saatstärke von 100 Korn pro Gefäß ($0,177 \text{ m}^2$) ausgebracht, um bei ungleichmäßigem Auflaufen die Mindestzahl an Pflanzen zu garantieren. Ein Metallgitter half bei der gleichmäßigen Verteilung. Nach 15 Tagen wurde der Bestand auf 52 Pflanzen pro Gefäß reduziert. Dies entsprach einer standorttypischen Pflanzendichte von etwa 290 Pflanzen pro Quadratmeter. SAND wurde mit 90 kg ha^{-1} Stickstoff (N) in Form von Kalkammonsalpeter (KAS) und als Vorratsdüngung mit 250 kg ha^{-1} Kalium (K) in Form von Kaliumchlorid 60 (K60) gedüngt. Aufgrund der hohen N_{min} -Werte und der guten Kaliumversorgung wurde LÖSS zunächst nicht gedüngt.

Zuckerrübe KP2

Am 08.09.2020 wurden neun Zuckerrübensamen der Sorte *Strauss* kreisförmig in Gefäßen ausgesät. Nach dem Auflaufen wurden sie auf drei Pflanzen pro Gefäß reduziert, was einer höheren Standortdichte als in der Praxis entsprach. Dies war jedoch notwendig, um mindestens drei biologische Replikate pro Gefäß zu gewährleisten und den Einfluss der Variabilität der Einzelpflanzen auf die Ergebnisse zu reduzieren. Nach einer Bilanzierung der Nährstoffabfuhr wurde LÖSS mit 70 kg N^{ha} und SAND mit 75 kg N^{ha} gedüngt.

Sommerweizen KP3

Für die dritte Kulturphase wurde am 17.02.2021 die Sommerweizensorte *Lennox* ausgesät und nach dem Auflaufen auf eine standorttypische Aussaatstärke von 58 Pflanzen je Gefäß (330 Pflanzen je m²) reduziert. Die Düngung erfolgte wiederum nach einer Bilanzrechnung mit 77 kg N^{ha} für LÖSS und 82 kg N^{ha} für SAND.

Sommergerste und Luzerne KP4

Die Sommergerste wurde in der vierten Kulturphase am 03.12.21 analog zur ersten ausgesät und vereinzelt. Am gleichen Tag wurde die Luzernesorte *Marshal* mit einer Aufwandmenge von 25-30 kg ha⁻¹ gesät (3 g m⁻²). Zur besseren Ausbringung wurde das Saatgut mit Sand vermischt und mit einem Löffel gleichmäßig verteilt. In der vierten Kulturphase wurde nur die Sommergerste gedüngt, und zwar mit 46 kg N^{ha} auf LÖSS und 63 kg N^{ha} auf SAND.

2.8 Erfasste Messdaten

Für jede Kulturphase wurden pro Gefäß fünf Pflanzen (drei Zuckerrübenpflanzen) markiert und beschriftet, um wiederkehrende Messungen wie SPAD (Minolta Camera Co., Ltd., Japan), BBCH (Meier, 2018) oder Chlorophyllfluoreszenz (Handy PEA, Hansatech, Kings Lynn, UK) und Wuchshöhe jeweils an den gleichen Pflanzen durchführen zu können. Bodentemperatur und Bodenfeuchte wurden mit dem Datenlogger TrueHub (TrueHub, Truebner GmbH, Deutschland) aufgezeichnet und in RStudio (Version 1.3.1056) verarbeitet. Für die grafische Darstellung wurden Tagesmittelwerte und für die statistische Auswertung Monatsmittelwerte berechnet. Die in die HAL-Ms eingebauten transparenten Röhren dienten zur Aufnahme der Wurzelbilder mit dem CI-600 In-Situ Root Imager (CI-600, CID Bio-Science, USA). Die Bilder wurden zwischen 40 und 110 Tagen nach der Aussaat (DAS)

aufgenommen, in der Regel sieben bis acht Mal pro Kulturphase. Pro Gefäß wurden vier Bilder aufgenommen, die eine Tiefe von 22,5 bis 53,0 cm und 71,0 bis 101,5 cm abdeckten. Zur Bestimmung der Wurzelintensität wurden alle Bilder digital mit einem Zählgitter, bestehend aus einem 1x1 cm Raster und einer Gesamtlänge von 8,14 m, überlagert (Rasmussen et al., 2015; Svane et al., 2019a). Die Bildbearbeitung erfolgte mit easyHDR Version 3.14.1 zur Bildregistrierung und der kostenlosen Software GIMP Version 2.10.14 inklusive BIMP Plugin zur Stapelverarbeitung. Helligkeit und Sättigung wurden einheitlich angepasst (Abbildung 39, Anhang). Die Zählung der Wurzelschnittpunkte erfolgte manuell durch ständigen Vergleich mit den vorangegangenen Aufnahmen des Wurzelraumes eines Gefäßes. Dies verbesserte die Unterscheidung von Wurzelresten früherer Kulturen und die Wurzelerkennung, insbesondere auf LÖSS.

Nach der Abreife des Getreides wurden der Haupt- und Nebenproduktertrag sowie der Ernteindex (Kornertrag / Gesamtpflanzenenertrag in %) erfasst. Zur Bestimmung der Erntemenge wurde das Erntegut zunächst in einem Trockenschrank (ULE 800, Memmert) für 48 Stunden bei 60°C getrocknet. Der Proteingehalt des Getreides als Qualitätsparameter wurde mittels Nahinfrarotspektroskopie (Infratec 1241, FOSS, Dänemark) bestimmt. Das als Nebenprodukt anfallende Stroh wurde in praxisüblicher Weise in die entsprechenden Gefäße zurückgeführt. Bei der Ernte von Sommergerste und Sommerweizen wurden Zwiewuchs, d.h. grüne Triebe im ansonsten reifen Getreide, zur Auswertung erfasst.

Die Zuckerrübenenernte erfolgte getrennt nach Rübenkörper und Blattmasse. Die Rüben wurden gewaschen und gewogen. Anschließend wurde mit einer handelsüblichen Küchenreibe Rübenbrei hergestellt. Dieser wurde bei -80 °C gelagert und später am Institut für Zuckerrübenforschung in Göttingen analysiert (Wulkow und Hoffmann, 2011). Aus diesen Analysedaten wurden der Bereinigte Zuckerertrag (BZE), der Standardmelasseverlust (SMV) und der Bereinigte Zuckergehalt (BZG) berechnet. Diese Parameter sind wichtige Indikatoren für die Zuckerrübenqualität (Buchholz et al., 1995).

Die Luzerne wurde kurz nach der Blüte 110 Tage (23.03.2022) sowie 158 Tage nach der Aussaat (10.05.2022) ca. 5 cm über der Bodenoberfläche geschnitten. Es wurde die Frisch- und die Trockensubstanz bestimmt und ausgewertet.

2.9 Statistik

Die Tages- und Monatsmittelwerte wurden mit RStudio (Version 1.3.1056) berechnet. Die statistischen Berechnungen wurden mit GraphPad Prism Version 10.1.1 für macOS durchgeführt (GraphPad Software, San Diego, Kalifornien USA, www.graphpad.com).

Die statistische Auswertung aller Pflanzenparameter der Kulturphasen eins bis drei erfolgte mittels zweifaktorieller Varianzanalyse (Two-Way ANOVA, WARM*NIEDERSCHLAG) mit Test auf Wechselwirkung ($n = 2$). Signifikante Ergebnisse werden durch P-Werte $< 0,05$ gekennzeichnet, während bei P-Werten zwischen 0,05 und 0,1 von einer Tendenz gesprochen wird. LÖSS und SAND wurden getrennt ausgewertet. Um statistische Unterschiede zwischen den Faktorstufen festzustellen, wurde der Tukey-Post-hoc-Test für einen „multiplen Vergleich“ gewählt. Die P-Werte hierfür werden nur im Text angegeben. Die Normalverteilung der Residuen wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test und dem Kolmogorov-Smirnov-Test geprüft. Die Heterogenität der Varianzen wurde mit dem Levene-Test geprüft. Die Standardabweichung für die Gruppenmittelwerte in Kapitel 3.3.5 wurde mit der Excel-Funktion STABW.S berechnet.

Da in der vierten Kulturphase die Niederschlagsstufen wegfielen, wurde für die Auswertung ein ungepaarter t-Test inklusive Shapiro-Wilk-Test und Kolmogorov-Smirnov-Test gewählt ($n = 3$). Die Homogenität der Varianzen wurde mit dem F-Test geprüft.

Für die Temperaturverläufe wurden Monatsmittelwerte je Messtiefe und Versuchsglied berechnet. Anschließend wurde für jede Bodentiefe, Bodensubstrat, Kulturphase und Niederschlagsstufenkombination eine dreifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, bei der die Zeit als Variable berücksichtigt wurde (Repeated Measures ANOVA (GLM), WARM*NIEDERSCHLAG*ZEIT, Beispiel: LÖSS oder SAND; 30, 70 oder 110 cm Tiefe; Monatsmittelwerte der jeweiligen Kulturphase; Niederschlagsstufenkombination T-M, T-F oder M-F sowie WARM oder KONT. Insgesamt ergaben sich 72 Kombinationen).

Der Einfluss der Niederschlagsstufen auf die Bodentemperatur in den beheizten Gefäßen wurde für jede Kulturphase einzeln untersucht. Dabei wurden analog zur Auswertung der Temperaturverläufe 72 Kombinationen aus Bodentiefe, Bodenvariante und Niederschlagsstufen miteinander verglichen.

Ähnlich wurde bei der Analyse der Wurzelintensität vorgegangen. Hier wurde eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit den Messzeitpunkten als Variable durchgeführt (Repeated Measures ANOVA (GLM), WARM*NIEDERSCHLAG*ZEIT).

Um die Ertragsdaten der sehr unterschiedlichen Kulturen vergleichbar zu machen und eine statistische Auswertung über alle Kulturphasen zu ermöglichen, wurden die Erträge nach

folgender Formel in „Crop Rotation Values“ (CRV, Fruchtfolge-Werte) umgerechnet und vereinheitlicht:

$$\text{CRV} = \frac{x_{B;W;N;K}}{\bar{x}_K}$$

Die Abkürzung B steht für BODEN, W für WARM, N für NIEDERSCHLAG und K für Kulturphase. Die jeweiligen Einzelwerte in jeder Kulturphase wurden durch den Gesamtmittelwert der Kulturphase dividiert. CRV-Werte unter 1 liegen unter, Werte über 1 liegen über dem Mittelwert der jeweiligen Kulturphase. Der CRV wurde für den Hauptertrag und die Wurzelintensität berechnet und anschließend mit einer dreifaktoriellen Varianzanalyse (Three-Way ANOVA, BODEN*WARM*NIEDERSCHLAG) ausgewertet.

3. Ergebnisse

3.1 Bodentemperaturen in den HAL-M-Versuchsgefäßen

Die konstruierten HAL-Ms funktionierten im praktischen Betrieb zuverlässig und die Wärmeemission an den Boden konnte erfolgreich simuliert werden. Im Folgenden werden die Bodentemperatur zu Versuchsbeginn, der Temperaturverlauf über den gesamten Versuchszeitraum sowie die Temperaturdifferenzen zwischen KONT und WARM dargestellt. Außerdem werden die Ergebnisse zum Einfluss der Niederschlagsstufen auf die Wärmeausbreitung dargestellt.

3.1.1 Bodentemperatur zu Beginn des Versuchs

Der vor Versuchsbeginn durchgeführte Funktionstest bei 40 °C führte in allen beheizten Gefäßen zu einem Anstieg der Bodentemperatur und bestätigte damit die Funktionsfähigkeit. Somit konnte mit der Aussaat und dem Versuch begonnen werden. Innerhalb von drei Tagen kam es zu einem starken Temperaturanstieg in 110 cm Tiefe, wodurch die Bodentemperatur auf ca. 28 °C anstieg (Abbildung 3). Zeitversetzt stieg die Temperatur auch in 70 cm Tiefe auf ca. 17 °C bis 18 °C und in 30 cm Tiefe auf ca. 13 °C bis 13,5 °C an. Auf SAND lagen die Temperaturen etwas höher. Am 2. Dezember wurde auf einen Tag-Nacht-Zyklus umgeschaltet (grauer Bereich in Abbildung 3) mit 16 Stunden bei 60 °C und 8 Stunden bei 40 °C. Dies führte zu starken Temperaturschwankungen zwischen 35 °C und 40 °C in 110 cm Tiefe. Nach der Umstellung der Gewächshaustemperaturen am 19. Dezember stabilisierten sich die Schwankungen um 40 °C (Abbildung 3). Aufgrund angepasster Projektvorgaben wurde der Tag-Nacht-Zyklus ab dem 15. Januar 2020 abgeschaltet und die Heizplatten in der verbleibenden Zeit mit konstant 50 °C betrieben. Dadurch wurde der Energieeintrag reduziert und die Temperaturen sanken. Die geringen Temperaturschwankungen außerhalb des Tag-Nacht-Zyklus spiegeln den Tagesgang der Gewächshaustemperaturen wider.

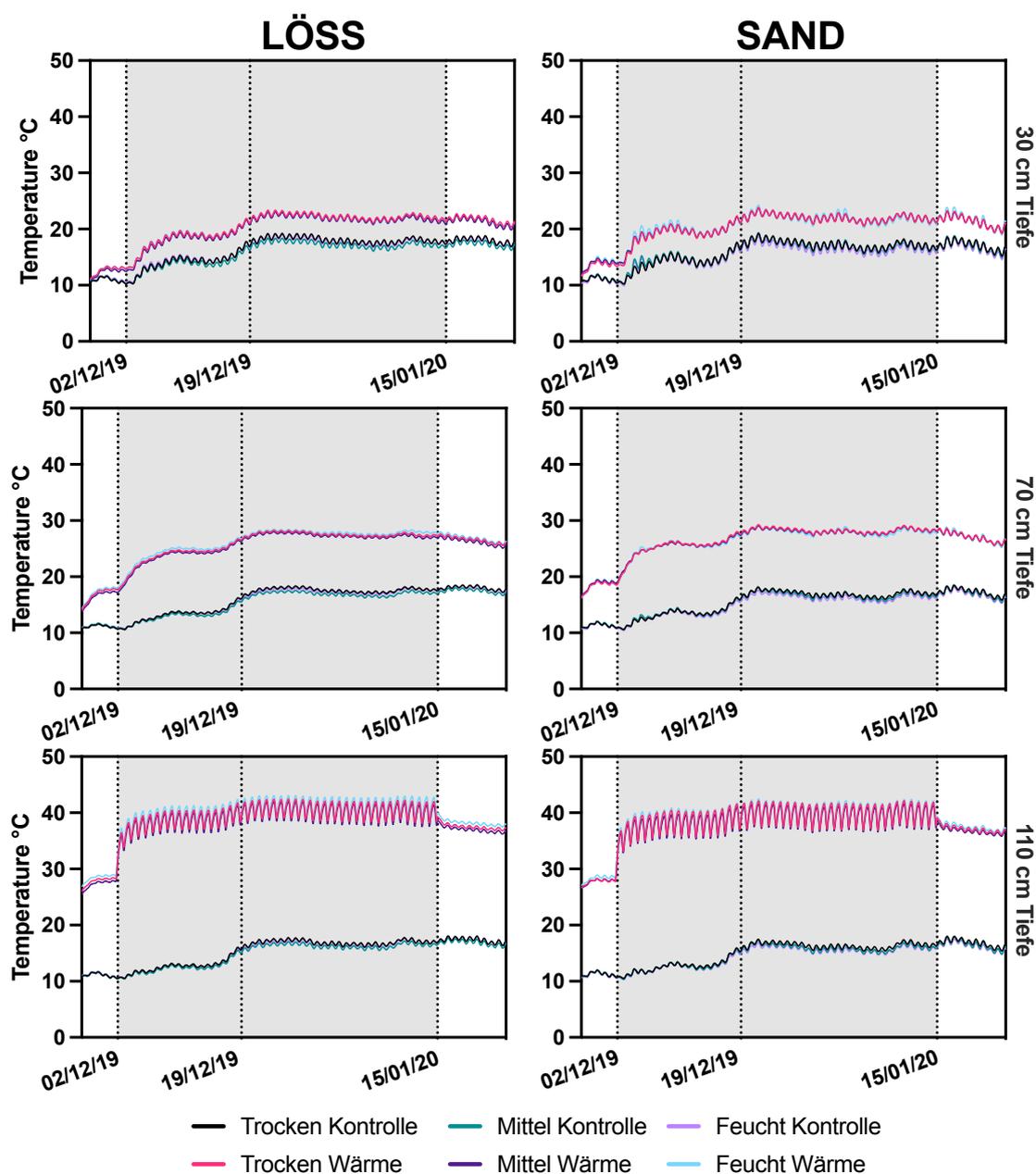


Abbildung 3: Temperaturverlauf des Tag-Nacht-Zyklus

Grau hinterlegt ist der Zeitraum vom 02.12.19 bis 15.01.2020. Stündliche Mittelwerte ($n = 2$) der Versuchsglieder.

3.1.2 Bodentemperaturen im Verlauf des Versuchs

Abbildung 4 zeigt die Tagesmitteltemperatur für LÖSS und SAND sowie für die drei Tiefenbereiche vom Beginn im November 2019 bis zum Ende der verlängerten Versuchsperiode im Juni 2022. Die Raumtemperatur im Gewächshaus ist dunkelgrau hinterlegt und zeigt

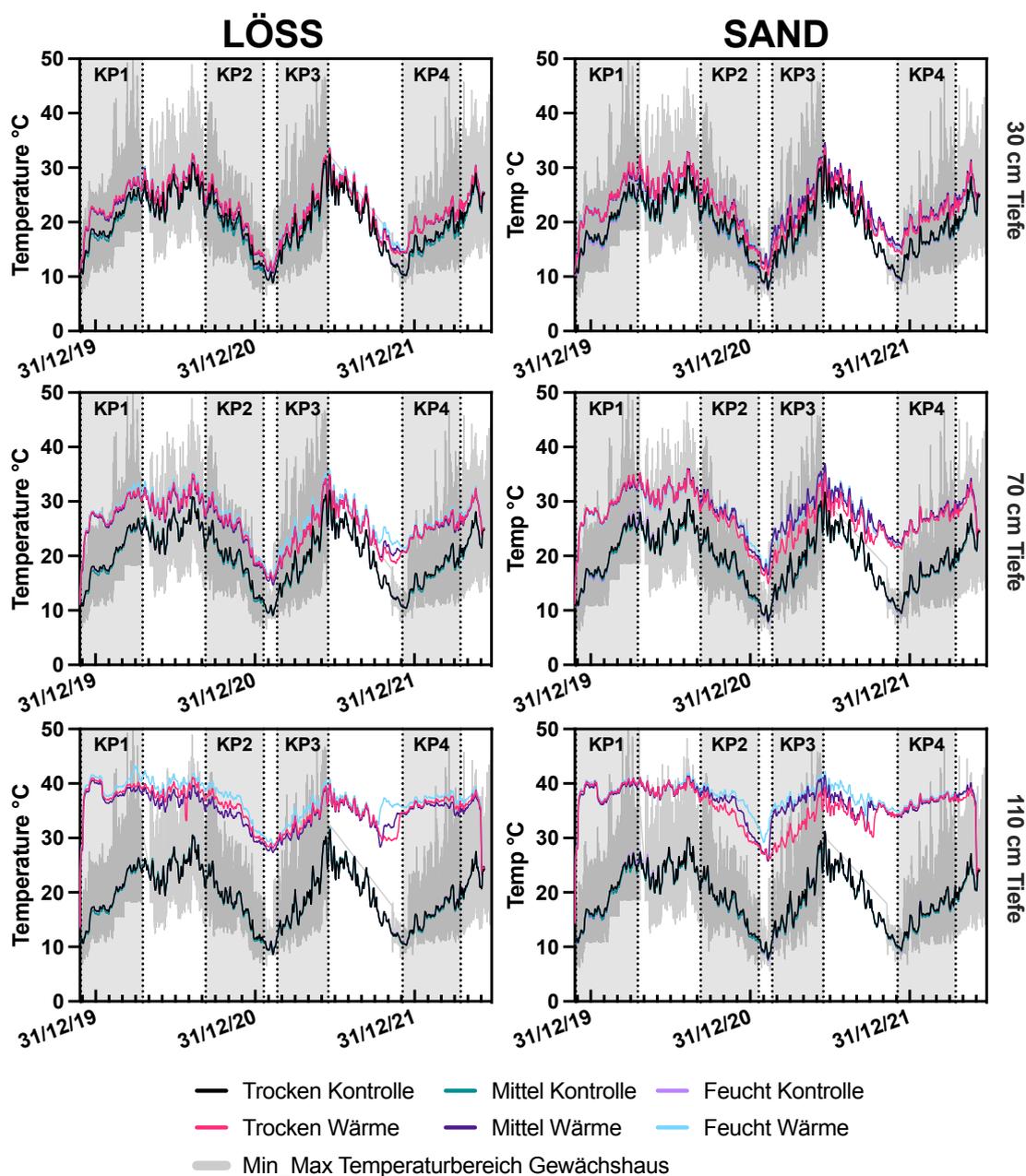


Abbildung 4: Temperaturverlauf über die vier Kulturphasen KP1-KP4

Abgebildet sind die Tagesmittelwerte. Min_Max Temperaturen auf Grundlage stündlicher Mittelwerte. FEUCHT, MITTEL, TROCKEN wurden in KP4 einheitlich auf mittlerer Stufe bewässert.

die täglichen Minima und Maxima. Zwischen KP3 und KP4 wurde die Umgebungstemperatur nicht aufgezeichnet. Die grau schattierten Streifen markieren die einzelnen Kulturphasen KP1 Sommergerste, KP2 Zuckerrübe, KP3 Sommerweizen und KP4 Luzerne/Sommergerste.

In den Kulturphasen zeigte sich für jede Bodentiefe, Bodenvariante und Niederschlagsstufenkombination ein signifikanter Unterschied zwischen WARM und KONT der berechneten

Monatsmittelwerte. Dies ist in Abbildung 4 durch die unterschiedliche Farbgebung verdeutlicht. WARM unterscheidet sich deutlich von KONT, wobei in 30 cm Tiefe bei LÖSS der Unterschied etwas weniger ausgeprägt ist als bei SAND. Mit zunehmender Tiefe steigt die Bodentemperatur unter dem Einfluss von WARM erwartungsgemäß an. Die Temperaturverläufe unterscheiden sich auch zeitlich. In KP1, KP3 und KP4 folgen die Temperaturverläufe im Allgemeinen den angestrebten ansteigenden Umgebungstemperaturen des Gewächshauses. Während der verschiedenen Wachstumsphasen zeigte die Temperatur in den Gefäßen ein zyklisches Auf und Ab, vergleichbar mit der natürlichen Bodentemperatur in ca. 1 m Tiefe (DWD Climate Data Center (CDC), 2019a). Die Temperatur in den Gefäßen unter KONT war jedoch aufgrund der Gewächshausumgebung höher als die natürliche Bodentemperatur. Es gab deutliche Anzeichen dafür, dass die Gewächshausumgebung die Bodentemperaturen aller Gefäße beeinflusst. Die sehr warmen Spätsommertage im Jahr 2020 führten dazu, dass KP2 mit hohen Bodentemperaturen begann, die im Januar 2021 allmählich auf ein Minimum sanken. Dies führte zu einem im Vergleich zu KP1, KP3 und KP4 umgekehrten Temperaturverlauf für die Gewächshausumgebung und die Bodentemperatur in KP2. Die kontrollierte Umgebungstemperatur im Gewächshaus wurde also teilweise von der jahreszeitlich bedingten Außentemperatur bestimmt. Kurzfristig traten im Gewächshaus Temperaturspitzen von über 40 °C auf. Diese waren einerseits auf hohe Außentemperaturen und andererseits auf Sicherheitsvorkehrungen der Gewächshaussteuerung bei sonnigem Wetter und hohen Windgeschwindigkeiten zurückzuführen. Betroffen waren KP1, KP3 und KP4 in der letzten Hälfte sowie KP2 zu Beginn der Kulturphase (Abbildung 4). Im Allgemeinen folgte die Bodentemperatur in den Kontrollgruppen dem Tagesmittel der Gewächshausumgebungstemperatur und stand somit in direktem Zusammenhang.

Das Bodensubstrat hatte einen geringen Einfluss auf die Temperatur in den beheizten Gefäßen, wobei der Unterschied zwischen LÖSS und SAND zwischen 0,3 °C und 2,1 °C lag. In KP3 war der Unterschied aufgrund der etwas höheren Temperaturen im SAND größer.

Der Einfluss der Niederschlagsstufen auf die Bodentemperatur in den beheizten Gefäßen wurde für jede Kulturphase einzeln untersucht. Dabei wurden die Niederschlagsstufen für jede Bodentiefe und Bodenvariante miteinander verglichen. Von den insgesamt 72 statistisch berechneten Kombinationen zeigten nur die in Tabelle 6 dargestellten einen signifikanten ($p < 0,05$) Einfluss der Niederschlagsstufen auf die Bodentemperatur in den jeweiligen Kulturphasen. Signifikant höhere Bodentemperaturen treten unter der jeweilig nächsten Bewässerungsstufe auf, mit dem Schwerpunkt auf FEUCHT. Der Einfluss der

Niederschlagsstufen ergab jedoch kein konsistentes Bild. Mögliche weitere Effekte können daher nicht ausgeschlossen werden.

Tabelle 6: Signifikanter Einfluss der Niederschlagsstufen auf die Bodentemperaturen

Dargestellt sind nur signifikante Stufenvergleiche von TROCKEN (T) MITTEL (M) FEUCHT (F), die einen Einfluss auf die Erwärmung des Bodens hatten. **Fett** markiert sind die Stufen mit höheren Werten (Richtung der Signifikanz)

Kulturphase	Verglichene Niederschlagsstufen		Bodenvariante	Bodentiefe cm	P-Wert
KP2	M	F	LÖSS	110	0,0162
KP2	T	F	SAND	110	0,0017
KP3	M	F	LÖSS	70	0,0163
KP3	T	M	SAND	70	0,0050
KP3	T	F	SAND	70	0,0007
KP3	M	F	LÖSS	110	0,0227
KP3	T	M	SAND	110	0,0087
KP3	T	F	SAND	110	<0,0001
KP4	M	F	LÖSS	110	0,0277

Zum Beispiel gab es in KP2 auf LÖSS einen Unterschied zwischen MITTEL-FEUCHT aber nicht zwischen TROCKEN-FEUCHT. In K3 gab es auf LÖSS einen Unterschied zwischen MITTEL-FEUCHT bei 70 und 110 cm, aber nicht zwischen TROCKEN-FEUCHT. Der Unterschied in K4 zwischen MITTEL-FEUCHT kann nicht durch die Niederschlagsstufen erklärt werden, da in K4 eine gleichmäßige Bewässerung stattfand. Obwohl die monatlichen Temperaturdifferenzen in Abbildung 5 eine leichte Tendenz zu höheren Bodentemperaturen unter der feuchten Niederschlagsstufe aufweisen, konnte der Einfluss der Bewässerung nicht eindeutig statistisch nachgewiesen werden.

3.1.3 Temperaturdifferenz zwischen Wärmeemission und Kontrolle

Die Temperaturdifferenz zwischen WARM und KONT wurde für jede Kulturphase getrennt nach Niederschlagsstufen aus den Monatsmittelwerten berechnet und in Abbildung 5 dargestellt. Werte für die Zeit zwischen den Kulturphasen wurden nicht berechnet. Die ersten Werte der Temperaturdifferenzen im November spiegelten zunächst die geringere Wärmeemission von 40 °C in den ersten Versuchstagen wider. Die Temperaturdifferenzen im Dezember waren mit ΔK von ca. 25 in 110 cm, ca. 11 in 70 cm und ca. 5 in 30 cm Tiefe die höchsten im gesamten Versuchsverlauf. Im weiteren Verlauf von KP1 nahmen die

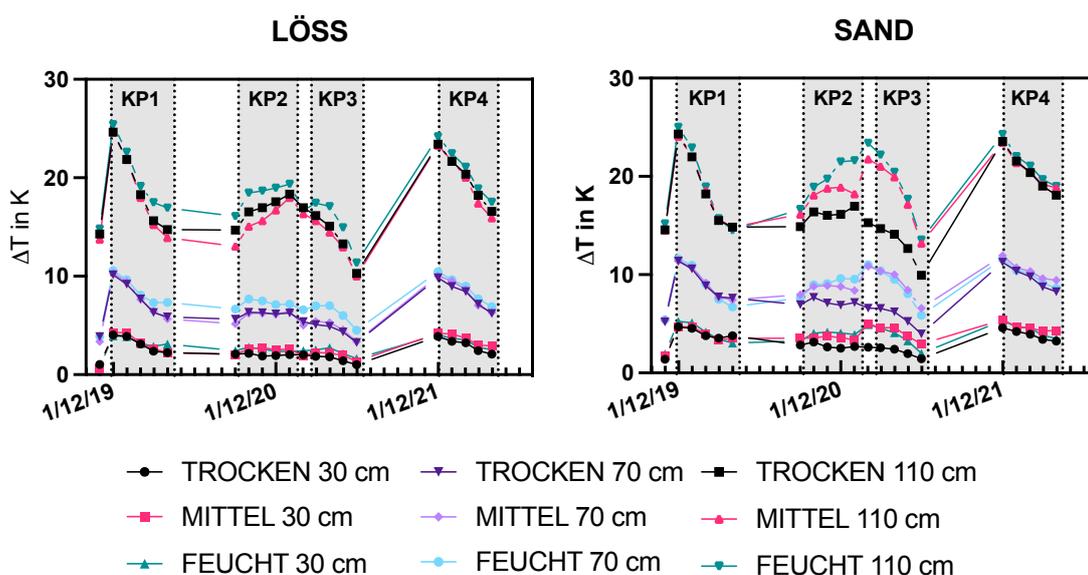


Abbildung 5: Durchschnittliche monatliche Temperaturdifferenz

Temperaturdifferenzen zwischen KONT und WARM für die Kulturphasen Sommergerste (KP1), Zuckerrübe (KP2), Sommerweizen (KP3) und Sommergerste/ Luzerne (KP4). FEUCHT, MITTEL und TROCKEN wurden in KP4 einheitlich mit MITTEL bewässert.

Temperaturunterschiede ab, was auf die geplante schrittweise Erhöhung der Gewächshaus-temperatur zurückzuführen ist. Der im vorherigen Kapitel erwähnte Einfluss der Gewächshaus-temperatur spiegelt sich in den Differenzen wider. Bei höheren Umgebungstemperaturen im Versuchsverlauf, wie z. B. in den Sommermonaten, nahm die Temperaturdifferenz ab. In den Wintermonaten nahm sie wieder zu. Dies führte in K2 zunächst zu geringeren Differenzen aufgrund der noch sehr warmen Spätsommertemperaturen.

Ab Ende der ersten Kulturphase traten bei LÖSS und ab Beginn der zweiten Kulturphase bei SAND Unterschiede in der Niederschlagsstufen auf. In 110 cm Tiefe wiesen FEUCHT in KP2 und KP3 durchweg die höchsten monatlichen Temperaturdifferenzen auf. Auf LÖSS war TROCKEN anfangs etwas höher als MITTEL, bewegte sich aber in KP3 jedoch auf ähnlichem Niveau. SAND zeigte in KP2 eine stärkere Differenzierung zwischen den Niederschlagsstufen, wobei MITTEL und FEUCHT sich in der letzten Phase von KP3 angleichen. Vor KP4 wurden alle Gefäße wieder gleichmäßig auf die vor KP1 erreichten 70 % FK aufgewässert. Es folgten keine unterschiedlichen Niederschlagsstufen und alle Gefäße wurden einheitlich mit MITTEL bewässert. Dies führte zu nahezu identischen Temperaturdifferenzen. In den beiden anderen Tiefen 70 und 30 cm waren die Ausprägungen der Differenzen ähnlich.

3.2 Bodenwassergehalte im Versuchszeitraum

Neben der Bodentemperatur wurde auch der Bodenwassergehalt in den drei Tiefen über den gesamten Versuchszeitraum beobachtet. Im Folgenden werden zunächst die Bodenwassergehalte der ersten bis dritten Kulturphase getrennt nach den Bodenvarianten LÖSS und SAND, den Niederschlagsstufen sowie den Tiefen dargestellt. Anschließend werden die Bodenwassergehalte der vierten Kulturphase betrachtet. In dieser Phase gab es nur eine Niederschlagsstufe, aber zwei unterschiedliche Kulturarten, nach denen die grafische Darstellung getrennt ist.

3.2.1 Bodenwassergehalt in Kulturphase 1-3

Abbildung 6 zeigt die volumetrischen Bodenwassergehalte für die unterschiedlichen Niederschlagsstufen und Bodentiefen für LÖSS und SAND. Die grau schattierten Bereiche markieren die Wachstumsphasen KP1, KP2 und KP3. Die gestrichelten Linien zeigen die im Labor ermittelten FK- und PWP-Werte. Aufgrund der intensiven und ausgiebigen Bewässerung vor Versuchsbeginn ist davon auszugehen, dass die FK-Werte das jeweilige Maximum unter den baulichen Gegebenheiten der Gefäße darstellten. In einer Tiefe von 30 cm auf LÖSS lag der volumetrische Wassergehalt zwischen 25 und 30 vol.%. In den Tiefen 70 und 110 cm betrug der Wassergehalt etwa 30 vol.%. Auf SAND betrug der Wert in einer Tiefe von 30 cm ca. 20 vol. % und in 70 und 110 cm Tiefe zwischen 8 und 15 vol. %.

Zu Versuchsbeginn lag der mittlere volumetrische Wassergehalt der Gefäße bei ca. 70 % der im Labor ermittelten Feldkapazität. Im Allgemeinen waren die Ausgangsniveaus für LÖSS- und SAND-Gefäße ähnlich. Auffällig war bei SAND die Niederschlagsstufe FEUCHT in 110 cm Tiefe. Hier gab es von Anfang an etwas größere Unterschiede zwischen den Wassergehalten von KONT und WARM, die bis zum Versuchsende anhielten.

Im Verlauf der Kulturphasen konnte trotz unterschiedlichen Ausgangswerte des Bodenwassergehaltes für LÖSS und SAND ein interessanter Aspekt in der ersten und zweiten Kulturphase beobachtet werden. In der Mitte der ersten Kulturphase wurde bei beiden Bodensubstraten eine größere Abnahme des Wassergehalts in KONT als in WARM festgestellt. Diese Differenz blieb in fast allen Unterböden unabhängig von der Niederschlagsstufe zunächst bestehen. Die Wasserzufuhr im Zeitraum zwischen erster und zweiter Kulturphase hatte kaum Einfluss auf dieses Phänomen. Im Verlauf der zweiten Kulturphase sank der höhere Wassergehalt der beheizten Varianten auf ein ähnliches Niveau wie in den Kontrollen.

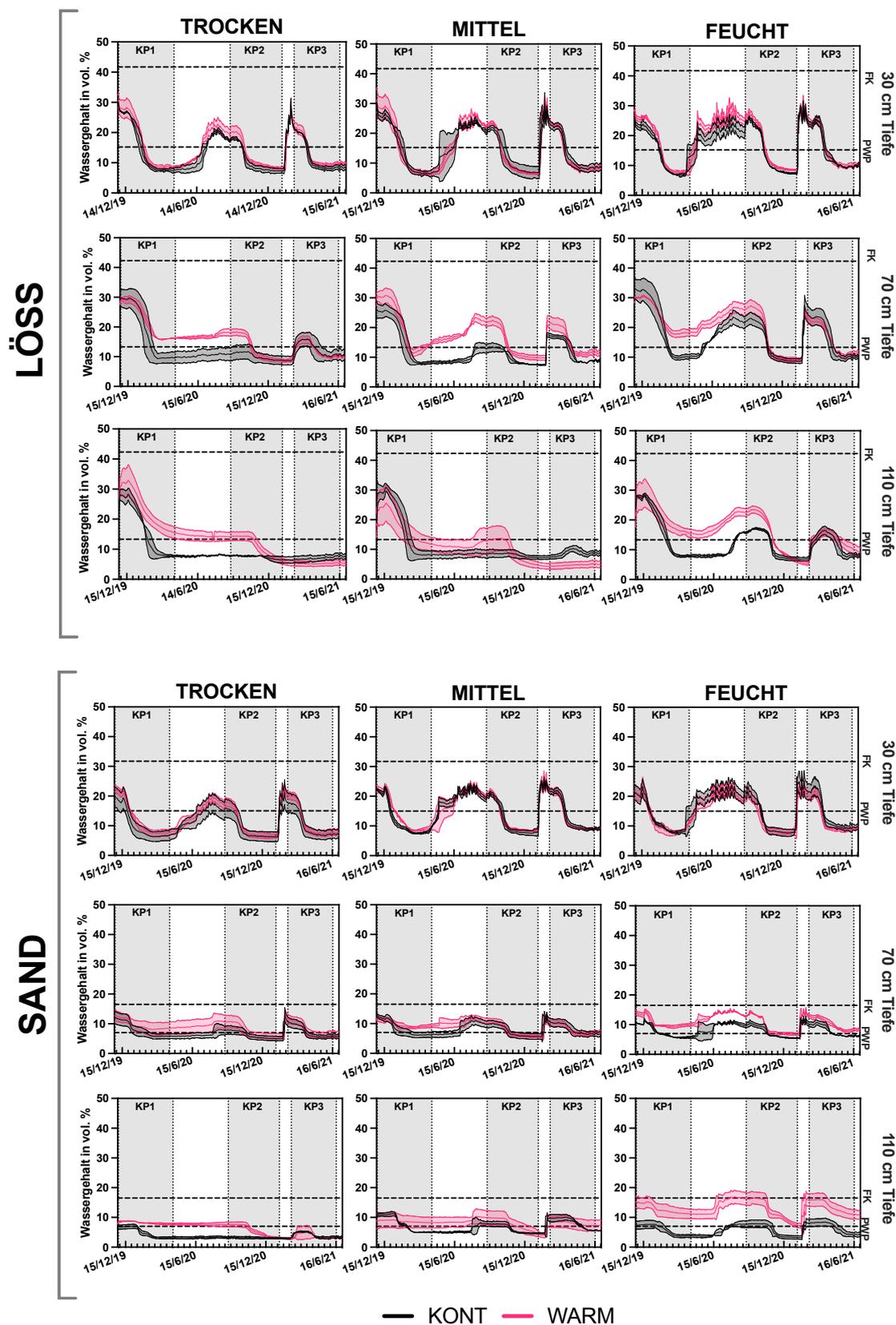


Abbildung 6: Bodenwassergehalt der HAL-Ms über den Versuchszeitraum KP1-KP3

Dargestellt getrennt nach Faktor BODEN und Faktor NIEDERSCHLAG mit den Stufen TROCKEN, MITTEL und FEUCHT. Standardabweichung durch transparenten Bereich abgebildet. Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP) als gestrichelte Linie gekennzeichnet.

In der dritten Kulturphase konnte das Phänomen der unterschiedlichen Wassergehalte in Abhängigkeit von der Wärmeemission in dieser Ausprägung nicht mehr beobachtet werden. Einzelne Messergebnisse wie z.B. bei LÖSS in 110 cm Tiefe oder bei SAND in 70 cm Tiefe weisen auf dieses Phänomen hin. Insgesamt betrachtet ist es jedoch eher vernachlässigbar. Ähnliche Unterschiede in den Bodenwassergehalten zwischen KONT und WARM wie in KP1 wurden auch in KP4 beobachtet, auf die im nächsten Kapitel eingegangen wird.

Die Bodenwassergehalte wurden nach jeder Kulturphase mit der entsprechenden Wassermenge aufgefüllt, die in den Wintermonaten hinzugekommen wäre. Die Wassermenge hing von der Niederschlagsstufe ab. So wurden im Versuch nacheinander drei trockene, mittlere und feuchte Jahre simuliert. Der Bodenwassergehalt im Oberboden (30 cm) konnte in fast allen Varianten in der Pause zwischen zwei Kulturphasen wieder auf das Ausgangsniveau gebracht werden. Allerdings startete TROCKEN mit einem leichten Defizit in die zweite Kulturphase. Die Wiederauffüllung der Bodenwassergehalte in den Pausen war bei LÖSS und SAND gleich.

Im Unterboden (70 und 110 cm) unterscheiden sich die Böden. Auf LÖSS stieg der Wassergehalt bei TROCKEN kaum an, bei MITTEL größtenteils erst in 70 cm Tiefe und auch bei FEUCHT wurden die Ausgangswerte vor Versuchsbeginn nicht erreicht. Durch die Wassergabe in der Pause zwischen KP2 und KP3 erreichten die Bodenwassergehalte zwar bessere Werte, aber ebenfalls nicht die Ausgangswerte vor KP1. Auf SAND wurde im Unterboden eine fast vollständige Auffüllung unter MITTEL und FEUCHT bis in 110 cm Tiefe festgestellt. Begünstigt wurde dies durch die niedrige Feldkapazität von SAND.

3.2.2 Bodenwassergehalt in Kulturphase 4

Abbildung 7 zeigt die Bodenwassergehalte der vierten Kulturphase für Sommergerste und Luzerne. In KP4 wurde einheitlich auf MITTEL bewässert, nachdem die unterschiedlichen Niederschlagsstufen weggefallen waren. Vor Beginn von KP4 wurde eine Bewässerung auf Feldkapazität durchgeführt, um einheitliche Bedingungen für alle Versuchsgefäße zu schaffen. Im Unterschied zu KP2 und KP3 konnte 70 % der Feldkapazität in KP4 wieder erreicht werden.

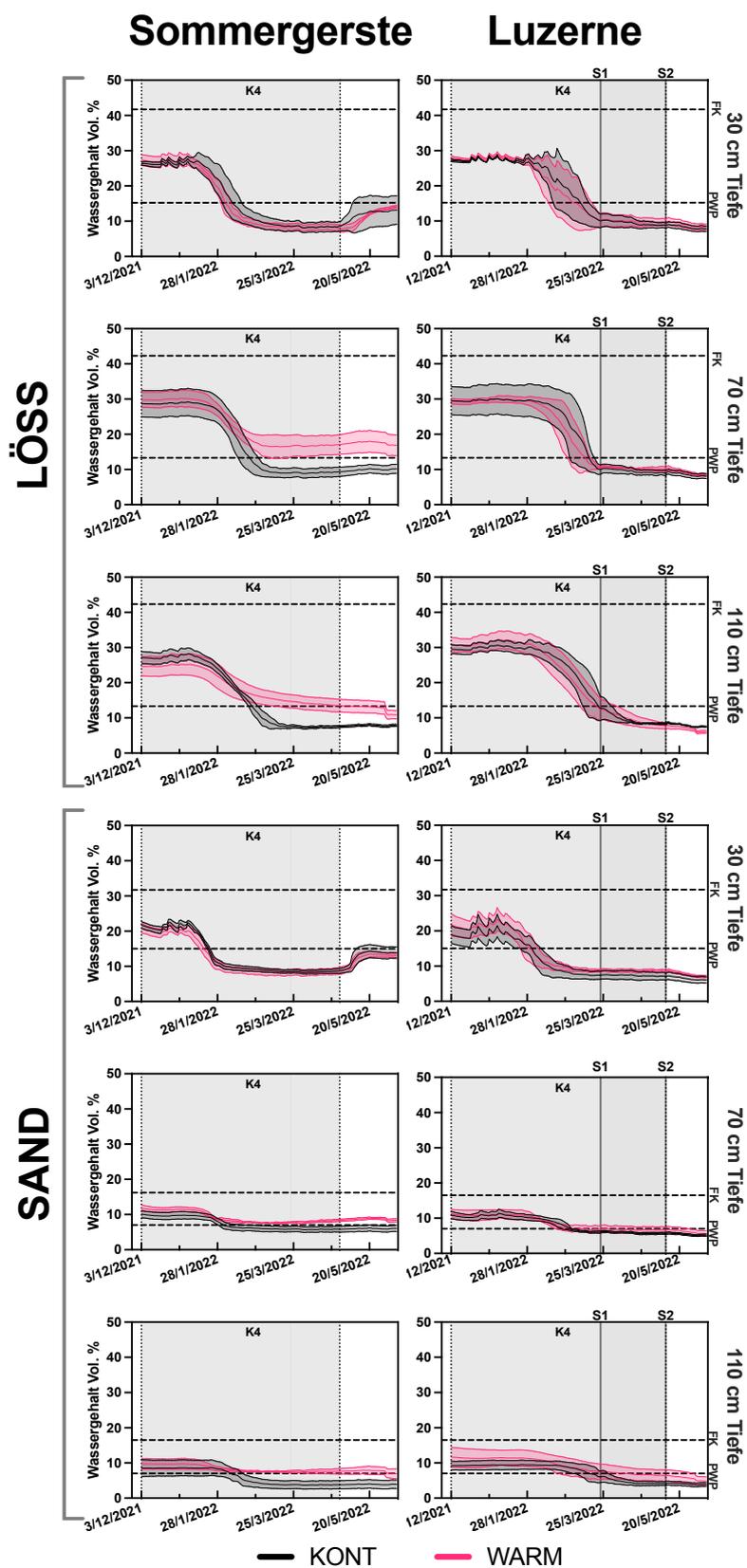


Abbildung 7: Bodenwassergehalt der Versuchsgefäße für die vierte Kulturphase

Dargestellt getrennt nach KULTUR und BODEN. Standardabweichung durch transparenten Bereich dargestellt. Der erste und zweite Schnitt der Luzerne ist mit S1 und S2 gekennzeichnet. Die komplette Kulturphase ist grau markiert. Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP) als gestrichelte Linie gekennzeichnet.

Durch die Änderung des Versuchsplans konnten in KP4 die Bodenwassergehalte unter dem Einfluss von zwei verschiedenen Ackerkulturen beobachtet werden. Dabei fiel auf, dass die Bodenwassergehalte unter Sommergerste deutlich früher abnahmen als unter Luzerne. Dies kann auf das unterschiedliche Wachstumsverhalten der Kulturarten zurückgeführt werden. Die Wassergehalte der Sommergerste nahmen in den Tiefen 70 und 110 cm ab Mitte der Kulturphase unter KONT wieder stärker ab als unter WARM. Dieser Effekt war auf LÖSS deutlich ausgeprägter als auf SAND und bestätigte die Beobachtung aus KP1. Die Bodenwassergehalte der Luzerne wurden durch die Wärme nicht beeinflusst. Lediglich in 110 cm Tiefe war auf SAND ein leichter Trend erkennbar. Weder bei Sommergerste noch bei Luzerne gab es in 30 cm Tiefe Unterschiede zwischen WARM und KONT.

3.3 Auswirkungen der Wärmeemission auf die Kulturpflanzen

Die Sommerfruchtfolge konnte unter Gewächshausbedingungen in ca. 2 Jahren erfolgreich angebaut werden. Die entwickelten beheizten Versuchsgefäße waren ausreichend groß, so dass die Pflanzen alle BBCH-Stadien von der Keimung bis zur Reife durchliefen und erfolgreich geerntet werden konnten.

Nachfolgend werden die Ertrags- und Qualitätsparameter der einzelnen Kulturen nach Kulturphasen getrennt vorgestellt. Die graphische Darstellung ist für jede Kulturphase gleich aufgebaut und zeigt die jeweiligen Ergebnisse getrennt für die Bodenvarianten LÖSS und SAND. Die Ergebnisse der unbehandelten Kontrolle sind schwarz dargestellt und werden als KONT bezeichnet. Die Ergebnisse der Gefäße mit Wärmeemission sind rot dargestellt und werden als WARM bezeichnet. Die Ergebnisse der einzelnen Niederschlagsstufen TROCKEN, MITTEL und FEUCHT sind auf der Abszisse mit T, M und F bezeichnet. Die Ordinate zeigt die zu vergleichenden Parameter und die Fehlerbalken geben die jeweilige Standardabweichung an. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) werden direkt in den Diagrammen mit den entsprechenden P-Werten angegeben. Dabei steht W (WARM) für signifikante Unterschiede zwischen WARM und KONT und R (NIEDERSCHLAG) für Unterschiede zwischen den Niederschlagsstufen. Abschließend werden die Haupterträge über alle Anbauphasen verglichen.

3.3.1 Kulturphase 1 – Sommergerste (*Hordeum vulgare*)

Während der ersten Kulturphase mit Sommergerste wurden in den Gefäßen mit simulierter Wärmeemission im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle Unterschiede in verschiedenen Parametern festgestellt. Im Vergleich zu KONT führte WARM generell zu niedrigeren Kornerträgen (Abbildung 8). Der Unterschied war auf SAND signifikant, auf LÖSS hingegen nur tendenziell ausgeprägt ($p = 0.0901$). Insgesamt lagen die Kornerträge auf beiden Bodensubstraten auf vergleichbarem Niveau und im praxisüblichen Bereich. Auf SAND hatten die Niederschlagsstufen einen signifikanten Einfluss auf den Kornertrag. Der Strohertrag lag unter WARM in beiden Bodenvarianten signifikant unter KONT. Weiterhin konnten auf SAND signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Niederschlagsstufen festgestellt werden. Der Strohertrag war auf LÖSS fast doppelt so hoch wie auf SAND, was wahrscheinlich auf die höheren N_{\min} -Werte zu Beginn der Kulturphase zurückzuführen war. Der Harvestindex gibt das Verhältnis zwischen Korn- und Strohertrag an. Zwischen den

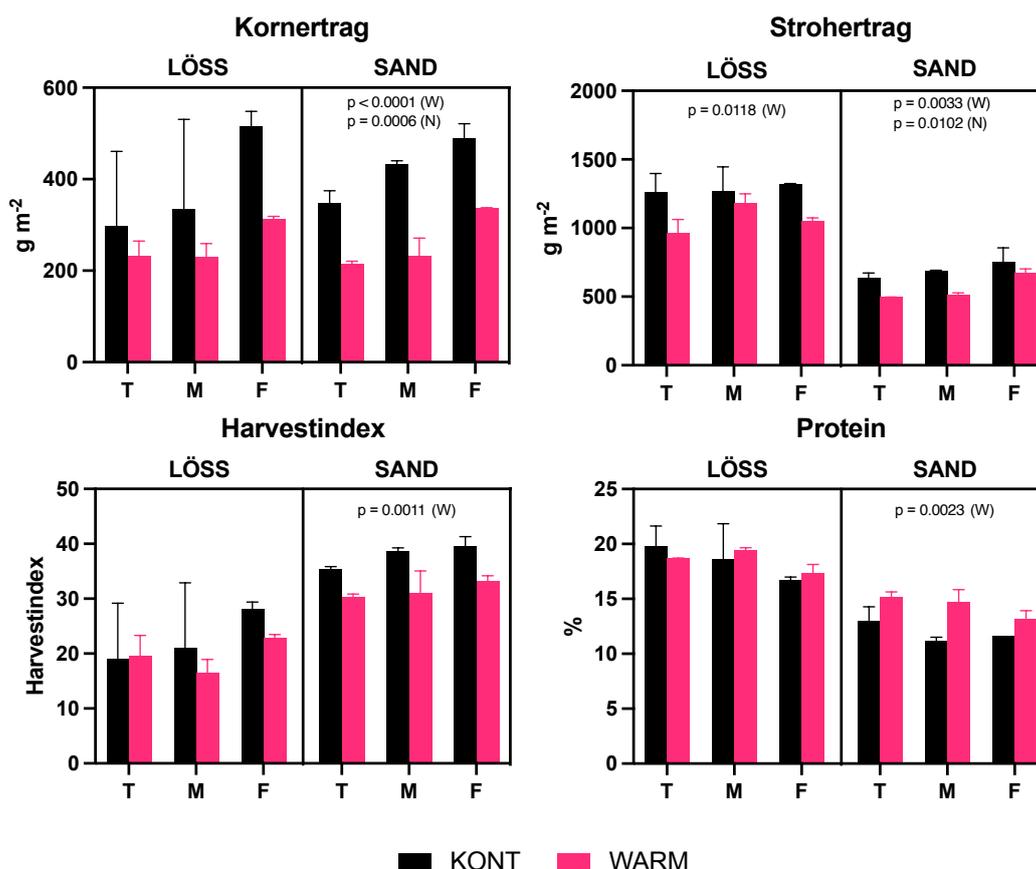


Abbildung 8: Mittelwerte wichtiger Ertragsparameter für Sommergerste KPI

Getrennt nach LÖSS und SAND und nach Niederschlagsstufen TROCKEN (T), MITTEL (M) und FEUCHT (F) geordnet. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

Niederschlagsstufen sowie WARM und KONT wurden für LÖSS keine signifikanten Unterschiede im Harvest Index festgestellt. Auf SAND hingegen war er signifikant niedriger als auf KONT und die Niederschlagsstufen hatten einen tendenziellen Einfluss ($p = 0,0914$). Der Rohproteingehalt war auf LÖSS generell höher als auf SAND und zeigte keine Unterschiede zwischen den Faktoren. Auf SAND war er signifikant höher als auf KONT und unter trockenen Bedingungen etwas höher. Die Niederschlagsstufen hatten auf den Rohproteingehalte auf SAND einen tendenziellen Einfluss ($p = 0,0640$).

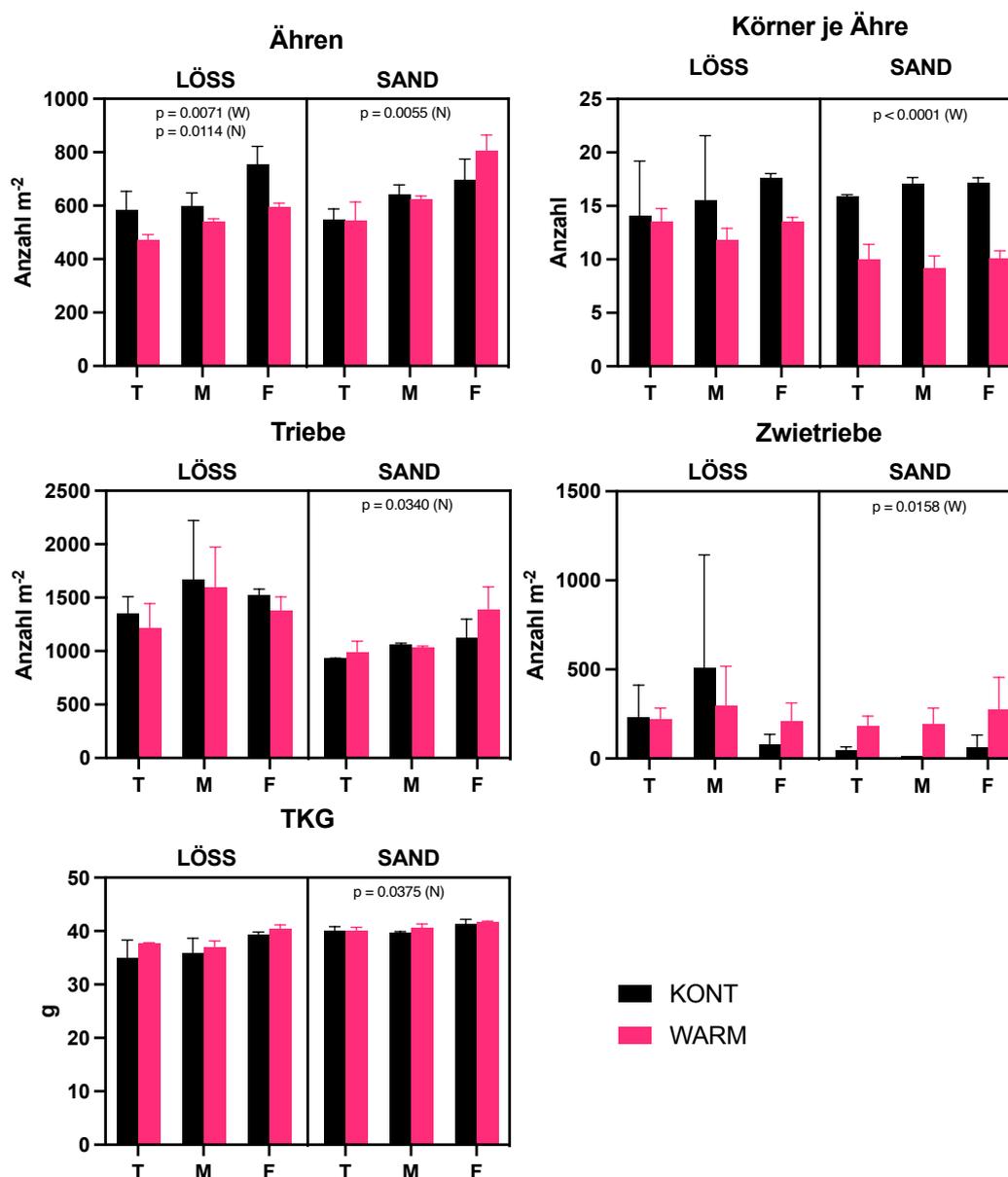


Abbildung 9: Mittelwerte ertragsbeschreibender Parameter der Sommergerste in KP1

Getrennt nach LÖSS und SAND und nach Niederschlagsstufen TROCKEN (T), MITTEL (M) sowie FEUCHT (F) geordnet. TKG = Tausendkorngewicht. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

Die Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Anzahl an Ähren pro m², Körner pro Ähre, Triebe und Zwietriebe je m² sowie das Tausendkorngewicht (TKG). Diese Merkmale dienen dazu, die Ertragsstruktur genauer zu untersuchen und festzustellen, welche Ertragsmerkmale zu den niedrigeren Erträgen unter WARM geführt haben können.

Die Ährenzahl wurde auf beiden Böden signifikant von den Niederschlagsstufen beeinflusst. Nur auf LÖSS führte WARM zu einer signifikant geringeren Ährenzahl. Auf SAND konnte kein Unterschied zwischen WARM und KONT festgestellt werden. Bei der Niederschlagsstufe F war die Ährenzahl bei WARM höher als bei KONT und damit entgegen dem Trend. Die Kornzahl pro Ähre auf SAND war bei WARM signifikant niedriger. Auf LÖSS konnten keine Unterschiede zwischen den Niederschlagsstufen oder zwischen WARM und KONT festgestellt werden. Die Auswertung der Triebe pro Quadratmeter zeigte für SAND einen signifikanten Einfluss der Niederschlagsstufen. Generell war die Anzahl der Triebe auf SAND etwas geringer als auf LÖSS. Die Anzahl der Zwiewuchstriebe, d.h. grüne Triebe, die nach der Abreife wieder austrieben, war unter KONT auf SAND signifikant geringer. Das Tausendkorngewicht wurde durch WARM nicht beeinflusst. Nur auf SAND war ein Einfluss der Niederschlagsstufen zu erkennen.

3.3.2 Kulturphase 2 – Zuckerrübe (*Beta vulgaris* subsp. *Vulgaris*)

Auch in der zweiten Kulturphase waren Unterschiede zwischen den Gefäßen mit simulierter Wärmeemission und der unbehandelten Kontrolle erkennbar. Im Vergleich zur Sommergerste waren die Ergebnisse jedoch teilweise gegenläufig. Der Frischmasseertrag der Rüben war auf LÖSS unter WARM signifikant höher als in der Kontrolle, während auf SAND keine Unterschiede festgestellt wurden (Abbildung 10). Die Niederschlagsstufen hatten einen signifikanten Einfluss auf die Ertragsleistung beider Bodenvarianten. Die Blatttrockenmasse wurde durch WARM nicht beeinflusst. Es wurden jedoch signifikante Unterschiede in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge auf beiden Böden festgestellt. Die Ergebnisse des Bereinigten Zuckerertrages zeigten eine identische Ausprägung. Der Bereinigte Zuckergehalt wurde durch die Niederschlagsstufen nicht beeinflusst. Auf LÖSS wurde ein signifikanter Einfluss von WARM mit einer Wechselwirkung mit den Niederschlagsstufen festgestellt ($p = 0,0109$). Der Tukey-Test zeigte signifikante Unterschiede zwischen KONT und WARM für die Niederschlagsstufen TROCKEN und MITTEL, jedoch nicht für FEUCHT.

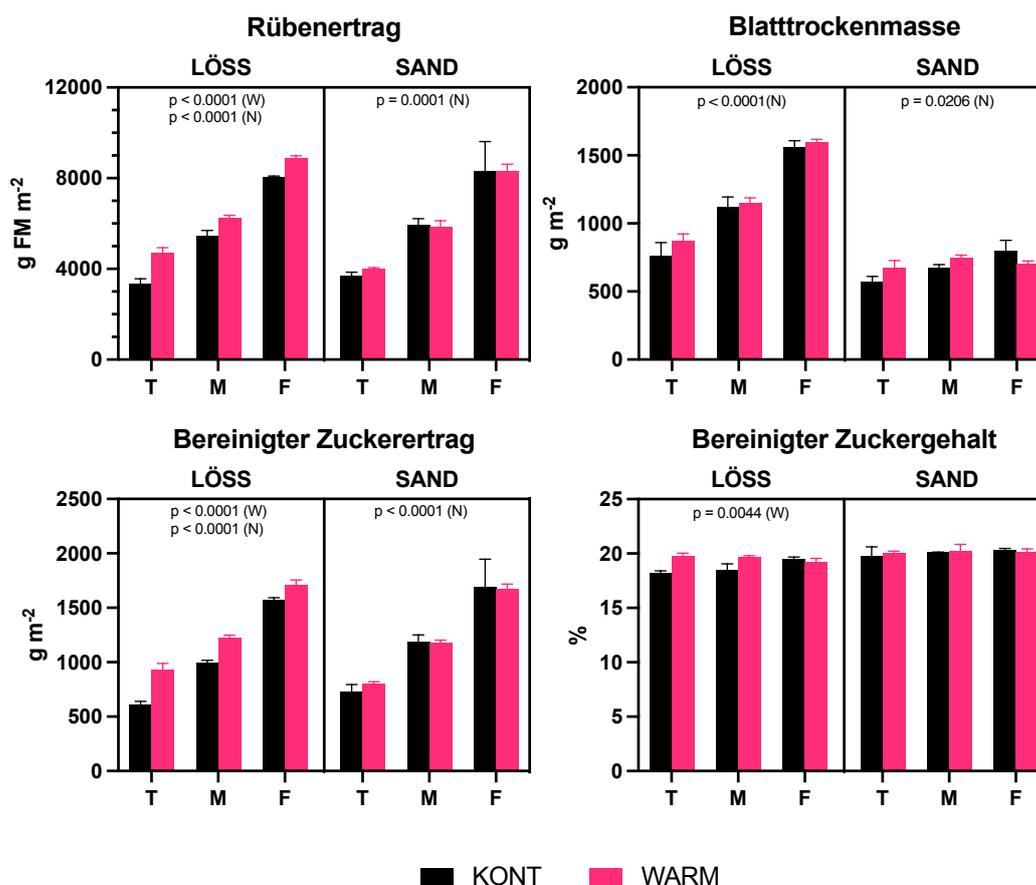


Abbildung 10: Mittelwerte wichtiger Ertragsparameter für Zuckerrübe in KP2

Getrennt nach LÖSS und SAND und nach Niederschlagsstufen TROCKEN (T), MITTEL (M) sowie FEUCHT (F) geordnet. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

Der Standardmelasseverlust (SMV), der zur objektiven Qualitätsbeurteilung dient, schwankte leicht auf LÖSS und war homogener und niedriger auf SAND. Signifikante Unterschiede wurden nicht festgestellt. Der Kalium- und Natriumgehalt (K + Na) sowie der Aminostickstoffgehalt (AmN) bilden die Grundlage für die Berechnung des SMV. Betrachtet man die einzelnen Komponenten, so zeigen sich im Vergleich zu den SMV-Werten signifikante Unterschiede bei AmN durch WARM auf SAND (Abbildung 10). Unter trockenen Bedingungen war der Wert deutlich höher. K + Na waren auf SAND unter WARM tendenziell niedriger ($p = 0,0755$).

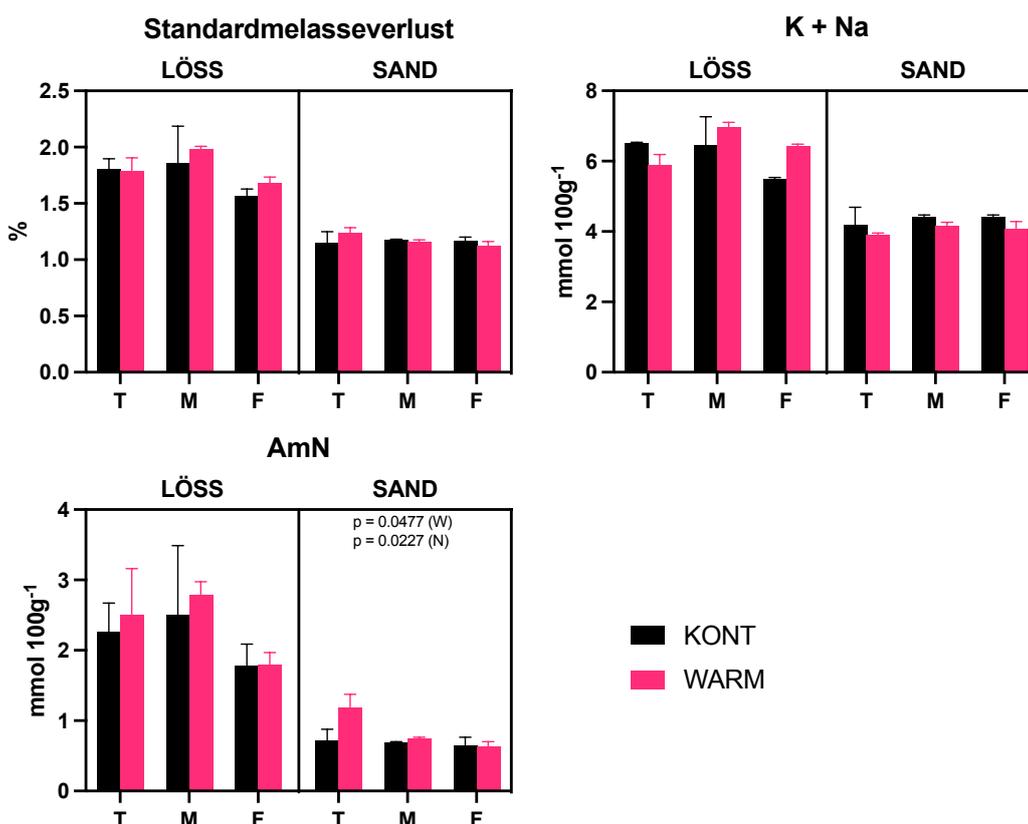


Abbildung 11: Mittelwerte der Qualitätsparameter der Zuckerrübe in KP2

Getrennt nach LÖSS und SAND und nach Niederschlagsstufen TROCKEN (T), MITTEL (M) sowie FEUCHT (F) geordnet. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

3.3.3 Kulturphase 3 – Sommerweizen (*Triticum aestivum*)

Die simulierte Wärmeemission im Boden hatte keinen signifikanten Einfluss auf das Wachstum des Sommerweizens in der dritten Kulturphase. Signifikante Unterschiede im Korn- und Strohertrag wurden bei LÖSS und SAND in Abhängigkeit von der Niederschlagsstufe beobachtet (Abbildung 12). Die höchsten Erträge wurden unter FEUCHT und die niedrigsten unter TROCKEN erzielt. Die Niederschlagsstufen hatten einen signifikanten Einfluss auf den Harvest Index für SAND. Bei TROCKEN lag WARM deutlich unter KONT, bei MITTEL war der Unterschied geringer und bei FEUCHT lag WARM leicht über KONT. Bei LÖSS waren die Unterschiede im Harvest Index nur tendenziell ausgeprägt ($P = 0.0835$).

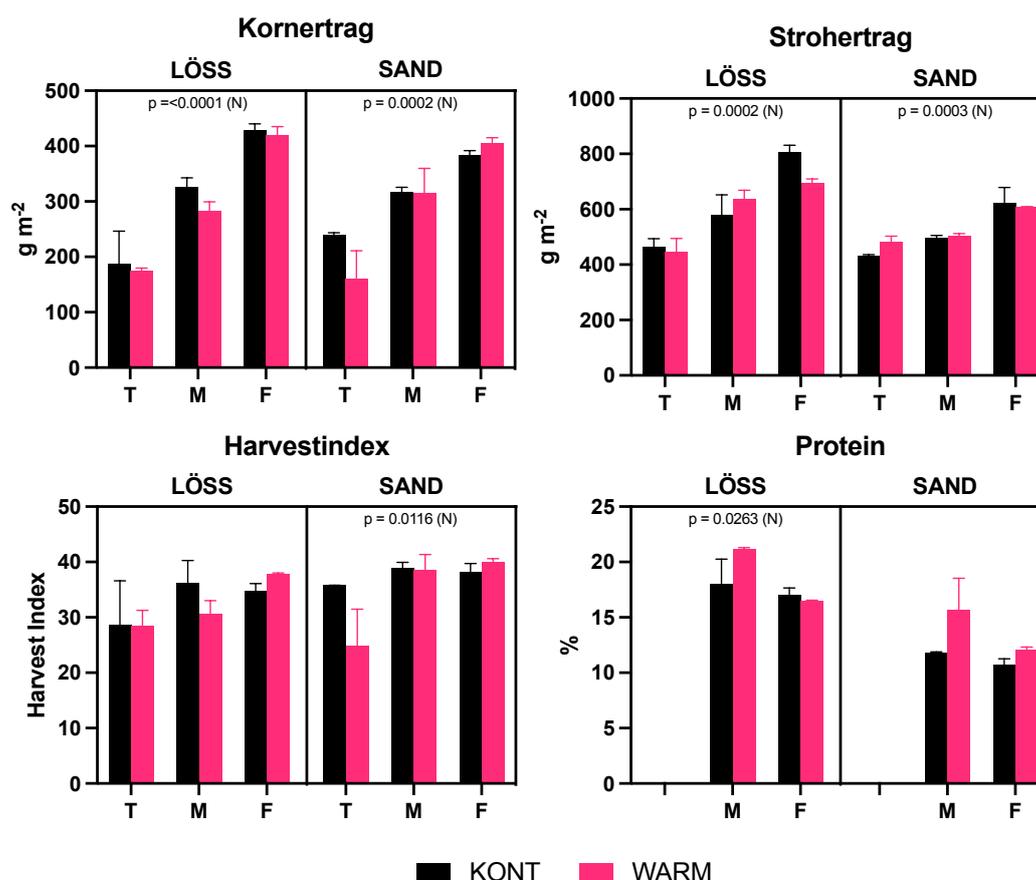


Abbildung 12: Mittelwerte wichtiger Ertragsparameter für Sommerweizen in KP3

Getrennt nach LÖSS und SAND und nach Niederschlagsstufen TROCKEN (T), MITTEL (M) sowie FEUCHT (F) geordnet. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W). Auf Grund einer geringen Erntemenge konnte der Proteingehalt für TROCKEN teilweise nicht ermittelt werden.

Ähnlich wie bei der Sommergerste in KP1 wurde unter WARM fast durchweg höhere Proteingehalte als unter KONT festgestellt. Auf SAND war der Unterschied tendenziell ausgeprägt ($p = 0,0680$). Signifikante Unterschiede gab es zwischen den Niederschlagsstufen auf LÖSS, wobei die höchsten Gehalte auf MITTEL gemessen wurden. Für die Niederschlagsstufe TROCKEN konnte aufgrund der sehr geringen Erntemengen kein Proteingehalt ermittelt werden.

Die Ährenzahl unterschied sich nur auf LÖSS signifikant zwischen den Niederschlagsstufen, im Gegensatz zum Stroh- und Korn-ertrag (Abbildung 13). Der Tukey-Test ergab nur unter FEUCHT eine signifikant höhere Ährenzahl durch WARM ($p = 0,0029$). Darüber hinaus hatte WARM einen tendenziellen Einfluss ($p = 0,0898$). Die Anzahl der Körner pro Ähre variierte signifikant in Abhängigkeit von der Niederschlagsstufe, wobei die Anzahl von

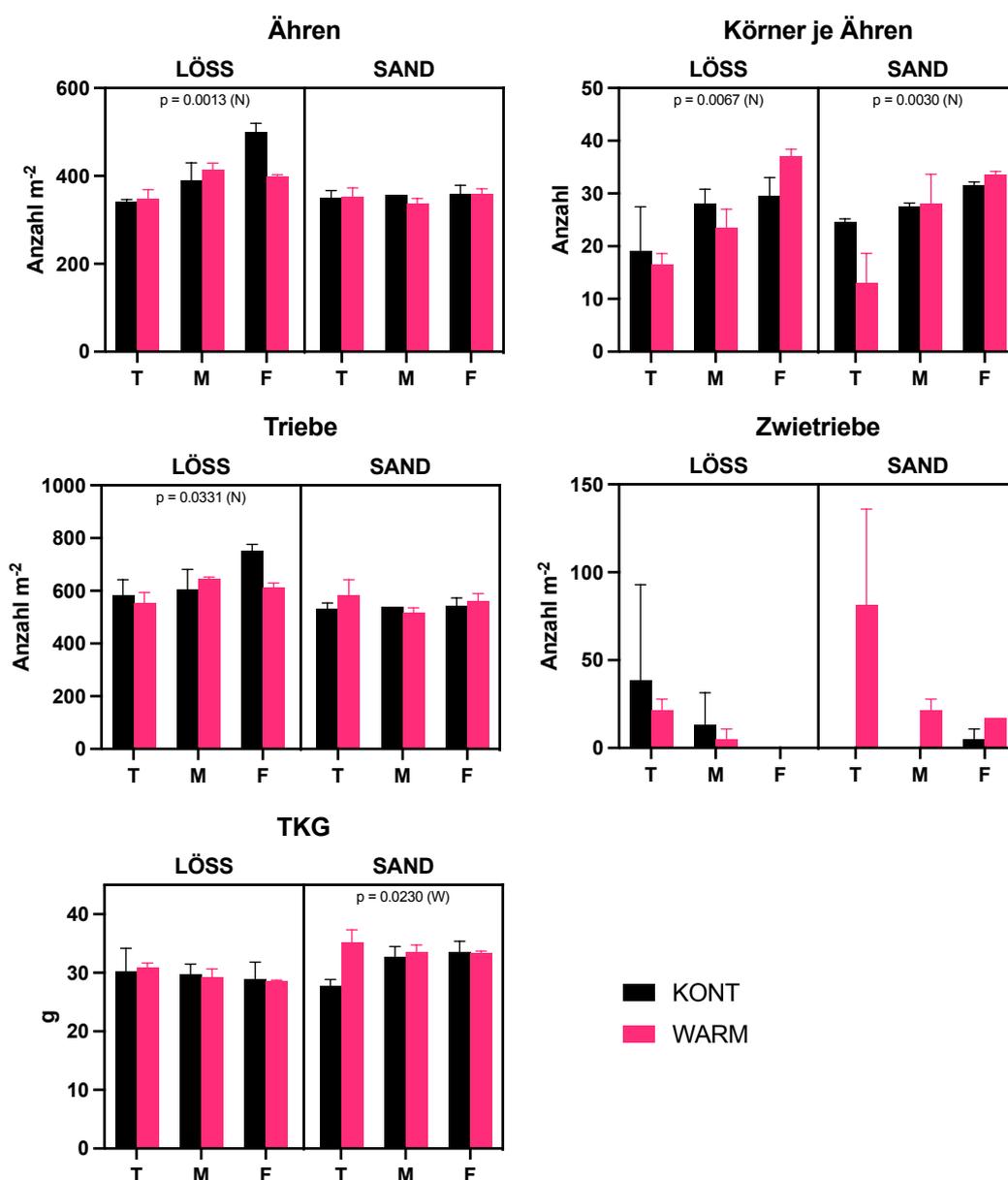


Abbildung 13: Mittelwerte ertragsbeschreibender Parameter für Sommerweizen in KP3

Getrennt nach LÖSS und SAND und nach Niederschlagsstufen TROCKEN (T), MITTEL (M) sowie FEUCHT (F) geordnet. TKG = Tausendkorngewicht. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

TROCKEN zu FEUCHT zunahm. Die Anzahl der Triebe wurde auf LÖSS signifikant durch die Niederschlagsstufen beeinflusst, ähnlich wie die Anzahl der Ähren. Die Anzahl der Zwietriebe war auf SAND unter WARM signifikant erhöht ($p = 0,0253$). Eine zuverlässige statistische Auswertung war aufgrund der fehlenden Normalverteilung der Residuen (Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov) nicht möglich. Das Tausendkorngewicht war auf SAND unter WARM signifikant höher als unter KONT. Der Tukey-Post-hoc-Test bestätigte

den signifikanten Unterschied zwischen WARM und KONT nur unter TROCKEN ($p = 0,0030$). Die Niederschlagsstufen hatten keinen Einfluss auf das TKG.

3.3.4 Kulturphase 4 – Sommergerste und Luzerne (*Medicago sativa*)

Wie in Kapitel 2.6 erläutert wurden die Niederschlagsstufen in KP4 auf 527 mm vereinheitlicht. Der Faktor C (NIEDERSCHLAG) wurde durch die Kulturarten (KULTUR) Sommergerste (SG) und Luzerne (LU) als neuer Faktor D (KULTUR) in den Versuchsablauf integriert (Tabelle 2). Sommergerste wurde erneut angebaut, um die Ergebnisse der ersten Anbauphase zu validieren, und mit Luzerne wurde eine weitere wichtige Fruchtart angebaut. Durch diese Änderung ergaben sich drei Wiederholungen pro Versuchsglied statt wie bisher zwei Wiederholungen. Die graphische Darstellung für die vierte Kulturphase unterscheidet sich insofern, als keine Niederschlagsstufen vorhanden sind. Die Ergebnisse werden weiterhin getrennt für die Bodenvarianten LÖSS und SAND dargestellt. Die unbehandelten Kontrollen sind schwarz und mit KONT gekennzeichnet. Die Ergebnisse unter Wärmeemission sind rot und mit WARM gekennzeichnet.

3.3.4.1 Sommergerste

Abbildung 14 zeigt die Ertragsparameter der Sommergerste aus der vierten Kulturphase. Ähnlich wie in der ersten Kulturphase waren die Stroherträge auf LÖSS höher als auf SAND. Es konnte kein Unterschied zwischen WARM und KONT festgestellt werden. Anders hingegen beim Kornertrag auf SAND. Hier zeigte sich eine deutliche Tendenz ($p = 0,0883$) zu geringeren Erträgen unter WARM. Auf LÖSS wurden im Mittel ähnlich reduzierte Erträge unter WARM beobachtet, jedoch ohne statistische Sicherheit. Der Kornertrag in der vierten Kulturphase war generell auf einem ähnlichen Niveau wie in der ersten. Als Resultat der Kornerträge war der Harvest Index unter WARM geringer als unter KONT, aber auch hier ohne statistische Sicherheit. Der Proteingehalt war erneut höher auf LÖSS als auf SAND, jedoch generell bei beiden Böden um ca. 3-5% niedriger als in der ersten Kulturphase. Die Ährenanzahl war aufgrund der Wärmeemission auf LÖSS erneut signifikant geringer als unter KONT. Generell stieg die durchschnittliche Ährenanzahl in KP4 im Vergleich zu KP1

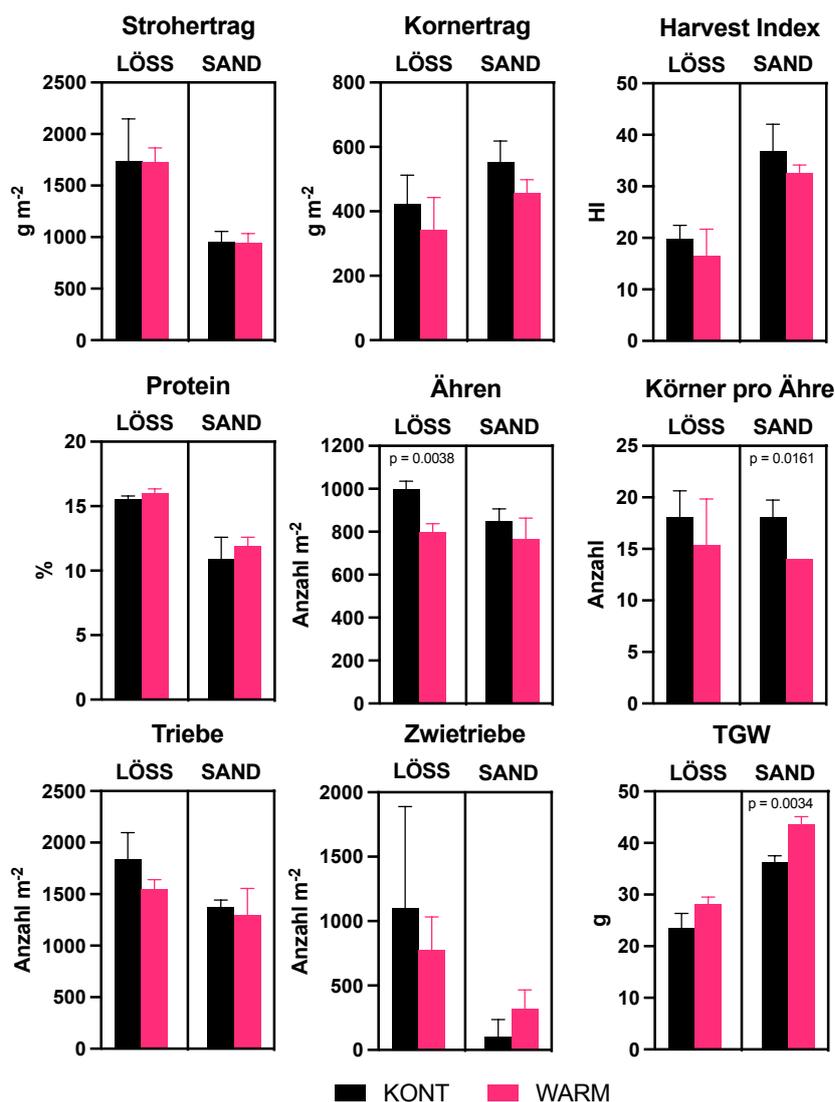


Abbildung 14: Mittelwerte der Ertragsparameter für die Sommergerste in KP4

Getrennt nach LÖSS und SAND. TKG = Tausendkorngewicht. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

und war unter KONT signifikant höher als unter WARM. Ähnlich wie in der ersten Kulturphase war die Anzahl der Körner je Ähre unter Wärmeeinfluss auf SAND signifikant geringer. Die Anzahl der Triebe unterschieden sich nicht signifikant, waren auf LÖSS aber etwas höher. Auf LÖSS waren die Zwiertriebe unter WARM geringer, auf SAND hingegen unter KONT. Es gab dabei kein signifikanten Unterschied. Das Tausendkorngewicht auf SAND war vergleichbar mit dem der Sommergerste in KP1, WARM lag jedoch signifikant über KONT. Auf LÖSS zeigte sich ein tendenzieller Unterschied ($p = 0,0583$) und das TKG lag unter dem Niveau der ersten Kulturphase.

3.3.4.2 Luzerne

Die Luzerne wurde zu einem frühen Schnitftermin 110 Tage und zu einem späteren 158 Tage nach der Aussaat geerntet (Abbildung 15). Der Ertrag des ersten Schnittes war deutlich höher als der des zweiten Schnittes. Beim ersten Schnitt war der Trockenmasseertrag auf LÖSS etwa doppelt so hoch wie auf SAND, beim zweiten Schnitt waren die Erträge auf beiden Böden gleich. Auf SAND war der Ertrag unter WARM signifikant geringer beim ersten Schnitt. Für die gesamte Biomasse ergab sich auf SAND mit $p = 0,0864$ eine Tendenz zu geringeren Biomasseerträgen unter WARM. Auf LÖSS konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

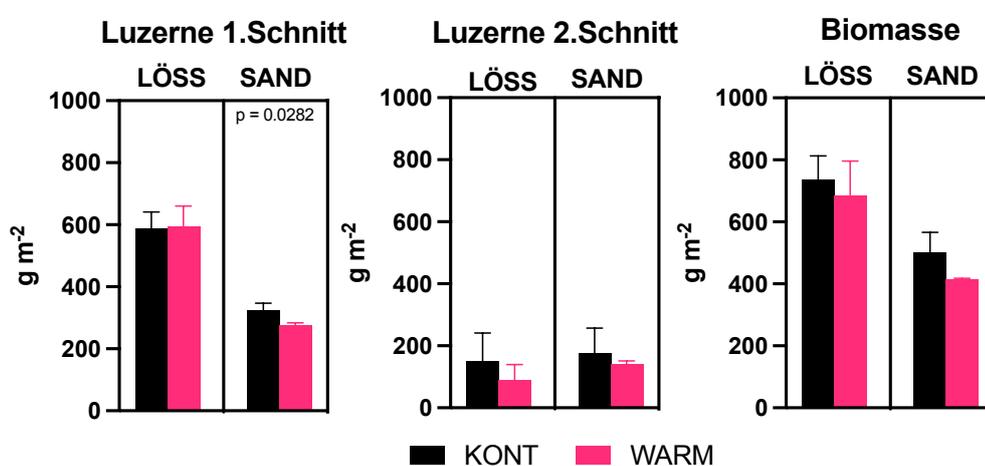


Abbildung 15: Mittelwerte der Trockenmassegewichte für Luzerne in KP4

1. Schnitt 110 Tage nach der Aussaat. 2. Schnitt 158 Tage nach der Aussaat. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. P-Werte kennzeichnen Signifikanz.

3.3.5 Kulturphasenübergreifende Ertragsauswertung

Die kulturphasenübergreifende statistische Auswertung der CRV-Werte erfolgte nur für den Hauptertrag und die Wurzelintensität. Daher sind vorab als Übersicht in Tabelle 7 nochmals die mittleren Erträge der Fruchtfolge für die verschiedenen Faktoren WARM und NIEDERSCHLAG zusammen mit den p-Werten für die 4 Kulturphasen dargestellt. Der Ertrag der Sommergerste in KP1 wurde auf SAND durch WARM von 423,6 auf 261,9 g m⁻² reduziert. NIEDERSCHLAG hatte ebenfalls einen großen Einfluss auf den Ertrag. Die höchsten Werte wurden bei FEUCHT verzeichnet und nahmen über MITTEL bis TROCKEN ab. WARM verringerte tendenziell den Ertrag bei LÖSS mit $p = 0,0901$. Eine Wechselwirkung zwischen BEHANDLUNG und NIEDERSCHLAG konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 7: Ertrags- und p-Werte für KP1-KP4

Mittelwerte für Faktor B WARM (WARM und KONT, $n = 6$) und für NIEDERSCHLAG (T, M, F, $n = 4$) mit Standardabweichung in Klammern. P-Werte der Zwei-Wege-ANOVA WARM*NIEDERSCHLAG. Fettgedruckte p-Werte sind signifikant mit $P < 0,05$

		Ertrag g m ⁻²					p-Werte		
		KONT	WARM	T	M	F	Faktor B WARM	Faktor C NIEDERSCHLAG	Faktor B* Faktor C
KP1 Sommergerste	LÖSS	382,6 (154,7)	258,8 (46,1)	265,3 (103,0)	283,2 (129,0)	413,8 (118,2)	0,0901	0,1785	0,6612
	SAND	423,6 (66,8)	261,9 (61,3)	281,6 (78,0)	333,2 (117,8)	413,5 (90,0)	<0,001	<0,001	0,1884
KP2 Zucker rübe	LÖSS	5609,0 (2118,0)	6608,0 (1906,1)	4023,0 (801,0)	5824,0 (498,8)	8479,0 (487,2)	<0,001	<0,001	0,1460
	SAND	5972,0 (2160,7)	6055,0 (1941,5)	3848,0 (224,7)	5872,0 (250,0)	8320,0 (765,3)	0,8092	<0,001	0,8542
KP3 Sommerweizen	LÖSS	314,1 (112,3)	292,4 (110,2)	181,0 (35,3)	304,3 (28,9)	424,4 (12,3)	0,2200	<0,001	0,6270
	SAND	313,3 (64,6)	293,7 (115,2)	199,8 (54,5)	316,3 (26,2)	394,4 (14,9)	0,2762	<0,001	0,0982
KP4 Sommergerste	LÖSS	423,1 (89,2)	341,8 (101,1)				0,3556		
	SAND	554,7 (63,4)	456,3 (41,9)				0,0883		
KP4 Luzerne	LÖSS	735,6 (77,1)	683,2 (112,8)				0,5430		
	SAND	500,9 (65,6)	415,1 (3,2)				0,0864		

Im Vergleich zur Sommergerste in KP1 waren die Zuckerrübenenerträge auf LÖSS aufgrund der Wärmeemission mit 6608,0 g m⁻² signifikant höher als auf KONT. Die Erträge auf SAND wurden durch WARM nicht beeinflusst. NIEDERSCHLAG hatte ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf den Ertrag in KP2. Die Erträge von FEUCHT waren mit 8479,0 und 8320,0 g m⁻² mehr als doppelt so hoch wie die von TROCKEN. MITTEL lag mit 5824,0 und 5872,0 eher im Durchschnitt. Eine Wechselwirkung zwischen BEHANDLUNG und NIEDERSCHLAG konnte auch hier nicht festgestellt werden. Der Sommerweizen in KP3 zeigte keine statistischen Unterschiede zwischen KONT und WARM, weder für LÖSS noch für SAND. Allerdings waren die Erträge unter WARM etwas geringer als unter KONT. NIEDERSCHLAG beeinflusste den Ertrag ähnlich wie in den vorangegangenen Kulturphasen,

mit den höchsten Werten unter FEUCHT und etwa halb so hohen unter TROCKEN. Zwischen BEHANDLUNG und NIEDERSCHLAG auf SAND wurde eine tendenzielle Wechselwirkung festgestellt ($p = 0,0982$). Beim erneuten Anbau von Sommergerste in KP4 gab es nur eine Niederschlagsstufe, die MITTEL von KP1 entsprach. Die Durchschnittserträge in KP4 lagen im Allgemeinen über denen von KP1 und waren unter WARM niedriger als unter KONT. Ein signifikanter Einfluss von WARM auf die Erträge konnte nicht beobachtet werden. Auf SAND reduzierte die Wärmeemission tendenziell ($p = 0,0883$) die Erträge. Der summierte Biomasseertrag der Luzerne unter WARM auf SAND war tendenziell niedriger als unter KONT. Auf LÖSS konnte kein Einfluss der Wärmeemission festgestellt werden. Um die Ertragsdaten der verschiedenen Kulturen vergleichbar zu machen und eine statistische Auswertung über alle Kulturphasen zu ermöglichen, wurden die Erträge gemäß Kapitel 2.8 in CRV-Werte (Crop Rotation Values) umgerechnet. Werte kleiner als 1 liegen unter dem Durchschnitt und Werte größer als 1 liegen darüber (Abbildung 16). Der CRV-Wert unter WARM lagen fast ausnahmslos und unabhängig von der Bodenvariante unter denen von KONT. Nur auf LÖSS unter der Variante TROCKEN waren beide Werte im Mittel gleich auf. Statistisch gesehen lagen die Erträge über den gesamten Versuchszeitraum unter WARM signifikant unter KONT. Der Einfluss der unterschiedlichen Niederschlagsstufen ist hoch signifikant. Die Erträge unter TROCKEN lagen deutlich unter und die der Variante FEUCHT deutlich über dem Durchschnitt. Die Bodenvarianten hatten keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

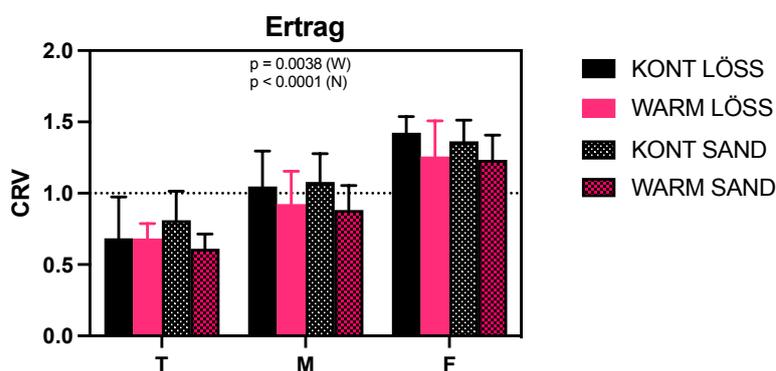


Abbildung 16: Erträge von KP1-KP4 umgerechnet in CRV-Werte

Werte kleiner als 1 liegen unter dem Durchschnitt und Werte größer als 1 darüber. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

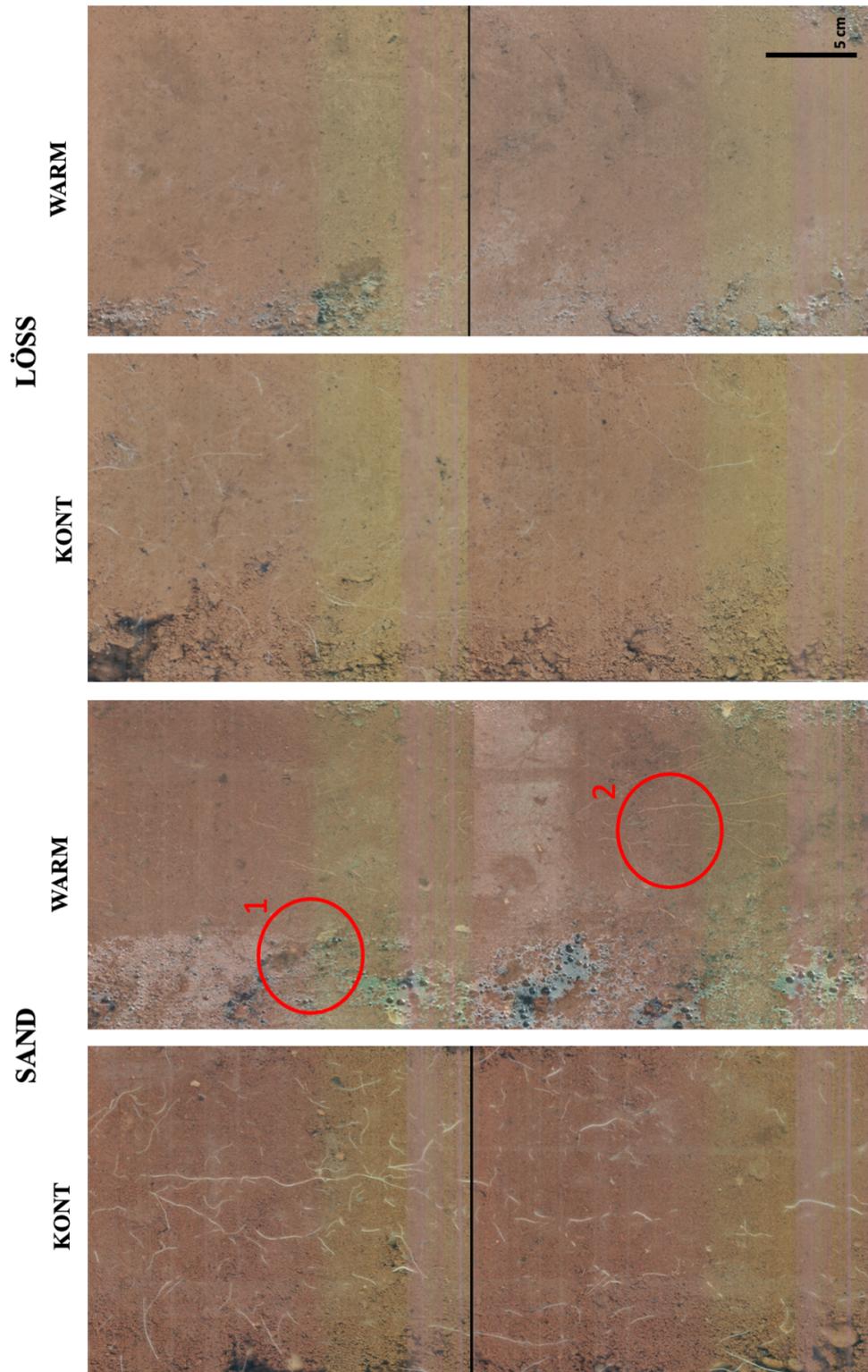


Abbildung 17: Beispielhafte Wurzelscans aus KP1

Scans für den Tiefenbereich von ca. 71-101 cm. Kreis 1 markieren Kondensation an der Außenseite der transparenten Röhren, Kreis 2 einen Bereich mit bräunlichen Wurzeln

3.3.6 Wurzelwachstum

Die Berechnung der Wurzelintensität basiert auf Wurzelscans, die mit einem Mini-Rhizotron-Scanner aufgenommen wurden. Abbildung 17 zeigt beispielhaft Scans für den Tiefenbereich von ca. 71 bis 101 cm aus der ersten Kulturphase 56 Tage nach der Aussaat. Es sind Farbunterschiede zwischen den Bodensubstraten LÖSS und SAND zu erkennen. Generell waren die Wurzeln auf LÖSS etwas schwerer zu erkennen als auf SAND. Die Wurzeln auf WARM wiesen häufiger bräunliche Verfärbungen auf als die Wurzeln der Kontrollgruppe. Dieser Punkt wurde nicht weiter untersucht, war aber auch bei der Auswertung der geöffneten Gefäße auffällig (siehe Kapitel 3.4).

Die folgenden Abbildungen in diesem Kapitel zeigen die Mittelwerte über die Niederschlagsstufen, da die Niederschlagsstufen nur einen untergeordneten Einfluss hatten. Signifikante Unterschiede zwischen den Niederschlagsstufen traten nur bei LÖSS auf. In KP2 traten diese zwischen TROCKEN und FEUCHT in einer Tiefe von 86-101 cm auf, in KP3 jeweils in einer Tiefe von 71 bis 86 cm zwischen TROCKEN und MITTEL bzw. TROCKEN und FEUCHT. Abbildung 40 im Anhang zeigt die entsprechenden Grafiken.

Die Wurzelintensität ist auf der Ordinate und die Tage nach der Aussaat (DAS) auf der Abszisse aufgetragen. Die schwarzen Punkte in den Diagrammen zeigen die Wurzelintensität unter KONT und die roten Quadrate zeigen WARM an. Die transparenten Flächen zeigen die Standardabweichung. Bei signifikanten Unterschieden zwischen WARM und KONT sind die P-Werte angegeben. Die Grafiken sind für die Bodenvarianten LÖSS und SAND sowie für die vier Tiefenstufen getrennt dargestellt.

Wurzelintensität in Kulturphase 1

Die Messungen der Wurzelintensität begannen in KP1 56 Tage nach der Aussaat. Auf SAND wurde das Maximum bereits eine Woche später erreicht, auf LÖSS etwa nach drei Wochen. In der ersten Kulturphase führte WARM zunächst nur auf SAND im Oberboden zu einer signifikant geringeren Wurzelintensität (Abbildung 18). Zwischen 37 und 52 cm Tiefe wurden keine Unterschiede festgestellt. In beiden Bodenvarianten wurde ab einer Tiefe von 71 cm ein signifikant geringeres Wurzelwachstum festgestellt. Die Wurzelintensität war unter KONT dabei teilweise bis zu 4-mal höher. Auffallend gering war das Wurzelwachstum im Bereich von 86 bis 101 cm auf LÖSS.

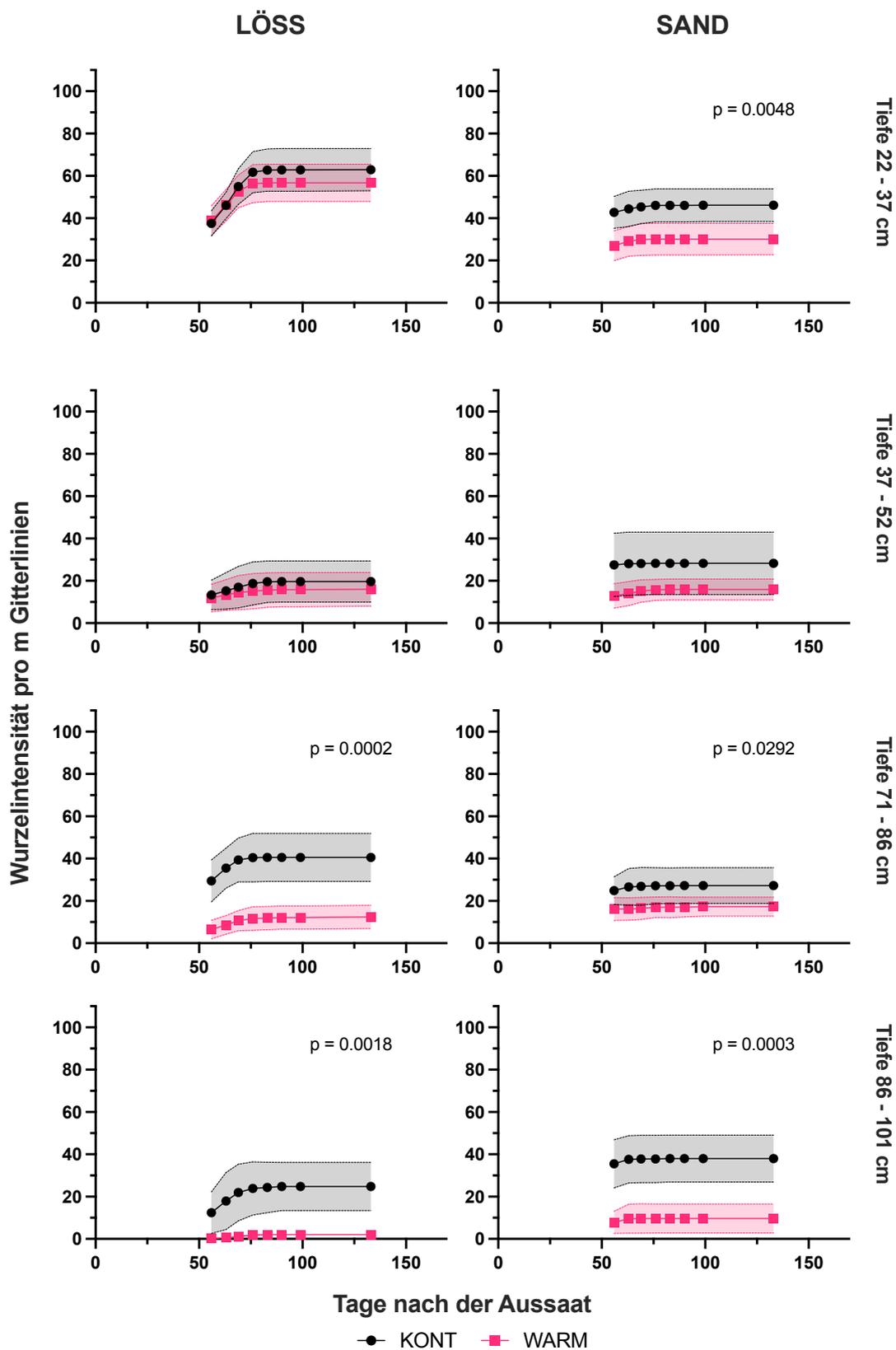


Abbildung 18: Wurzelintensität für Sommergerste in KP1

Dargestellt getrennt nach LÖSS und SAND ohne Berücksichtigung der Niederschlagsstufen. Standardabweichung durch transparenten Bereich markiert. P-Werte kennzeichnen statistisch gesicherte Unterschiede zwischen KONT und WARM.

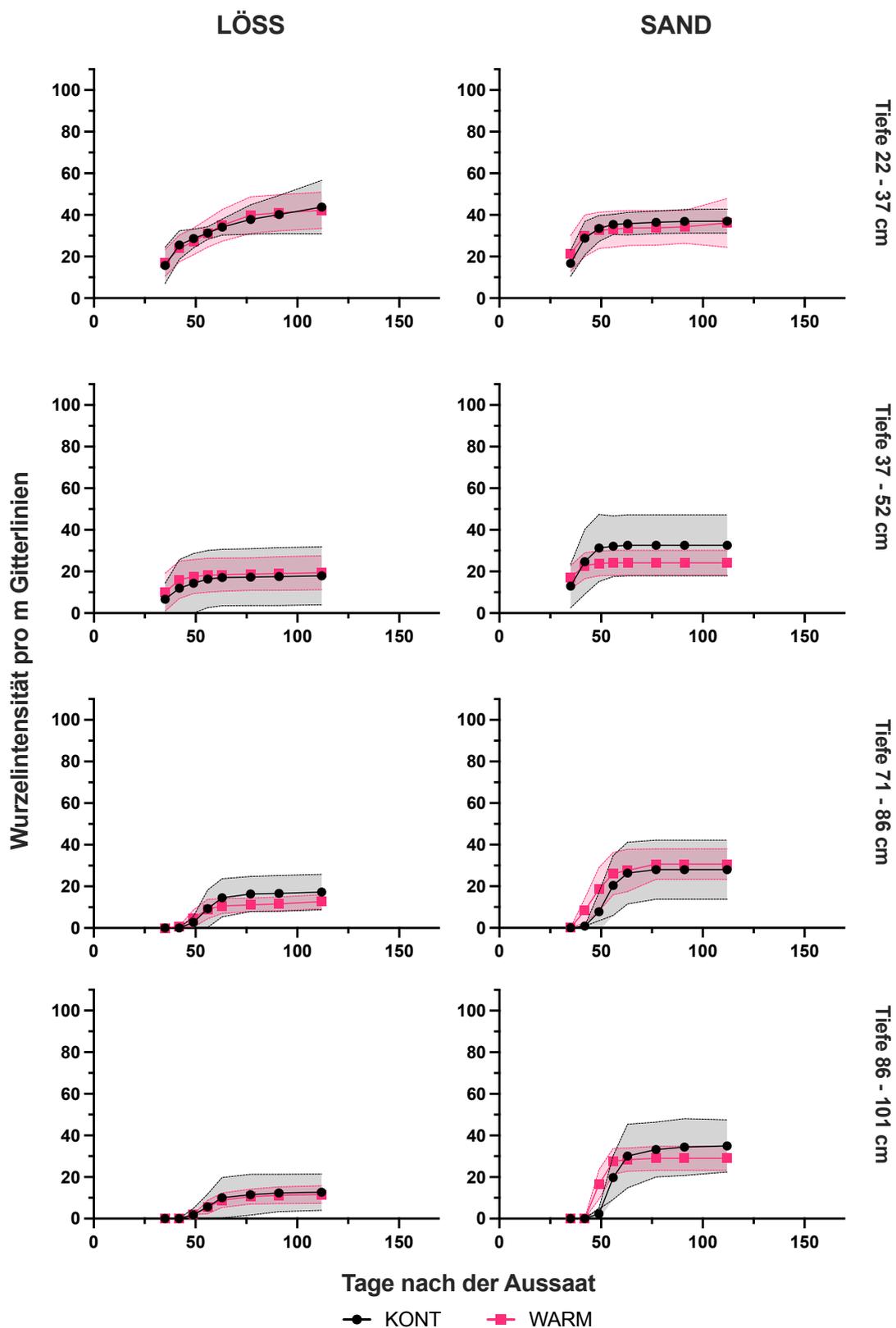


Abbildung 19: Wurzelintensität für Zuckerrübe in KP2

Dargestellt getrennt nach LÖSS und SAND ohne Berücksichtigung der Niederschlagsstufen. Standardabweichung durch transparenten Bereich markiert. P-Werte kennzeichnen statistisch gesicherte Unterschiede zwischen KONT und WARM.

Wurzelintensität in Kulturphase 2

In der zweiten Kulturphase wurden keine signifikanten Unterschiede in der Wurzelintensität zwischen WARM und KONT beobachtet (Abbildung 19). Auf LÖSS wurde allerdings ein signifikanter Unterschied in den Niederschlagsstufen zwischen TROCKEN und FEUCHT im Bereich von 86 bis 101 cm Tiefe beobachtet (Anhang, Abbildung 40). Die Messungen der Wurzelintensität begannen in KP2 etwas früher als in KP1, wodurch der zeitliche Verlauf der Durchwurzelungstiefe erkennbar wurde. Im Bereich von 22 bis 52 cm konnte zu den ersten beiden Messzeitpunkten eine Zunahme der Wurzelintensität beobachtet werden. Das Wurzelwachstum im Bereich 71 bis 101cm setzte erst ca. zwei Wochen später ein. In KP2 war die Wurzelintensität im Allgemeinen ähnlich wie in KP1.

Wurzelintensität in Kulturphase 3

Auch in der dritten Kulturphase wurden keine signifikanten Unterschiede in der Wurzelintensität zwischen WARM und KONT beobachtet (Abbildung 20). Es konnte jedoch ein signifikanter Unterschied bei der Wurzelintensität auf LÖSS in Abhängigkeit der Niederschlagsstufen festgestellt werden. Dieser Unterschied trat in einer Tiefe von 71 bis 86 cm zwischen TROCKEN und MITTEL sowie in 86 bis 101 cm zwischen TROCKEN und FEUCHT auf (Anhang, Abbildung 40). Die Wurzeln sind auch in KP3 mit ca. 14 Tagen Verzögerung in den Bereich von 71 bis 101 cm vorgedrungen.

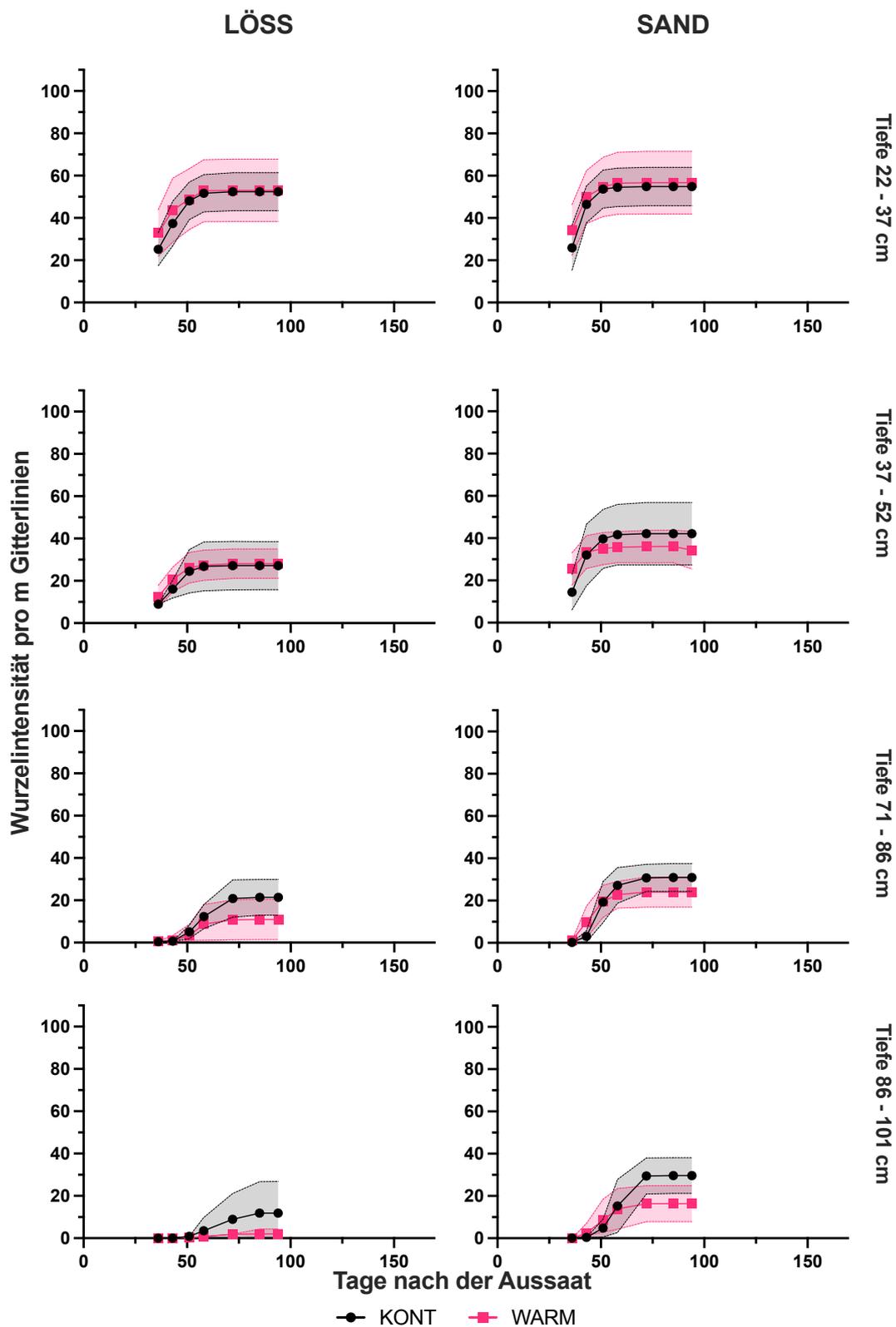


Abbildung 20: Wurzelintensität für Sommerweizen in KP3

Dargestellt getrennt nach LÖSS und SAND ohne Berücksichtigung der Niederschlagsstufen. Standardabweichung durch transparenten Bereich markiert. P-Werte kennzeichnen statistisch gesicherte Unterschiede zwischen KONT und WARM.

Wurzelintensität in Kulturphase 4

Die statistischen Unterschiede aus KP1 konnten beim erneuten Anbau der Sommergerste in der vierten Kulturphase nicht bestätigt werden (Abbildung 21). In KP4 wurde die Wurzelintensität nur bis Tag 89 erfasst, da sich in KP1 gezeigt hatte, dass ab diesem Zeitpunkt keine Zunahme des Wurzelwachstums mehr zu erwarten war. Die Wurzelintensität unter KONT auf SAND im Bereich von 71 bis 101 cm lag auf ähnlich Niveau wie in KP1, aber über den Werten für WARM. Im Vergleich zu KP1 wurde in KP4 im Schnitt eine ähnliche Wurzelintensität erreicht. Allerdings erreichte die Wurzelintensität im Bereich von 71 bis 101 cm unter KONT nicht das Niveau wie unter KP1.

Auch die Luzerne in der vierten Kulturphase zeigte keine statistischen Unterschiede in der Wurzelintensität zwischen KONT und WARM (Abbildung 22). Es wurde beobachtet, dass die Luzerne erst etwa 14 Tage nach der Sommergerste in den Bodenbereich von 71 bis 101 cm eingedrungen war.

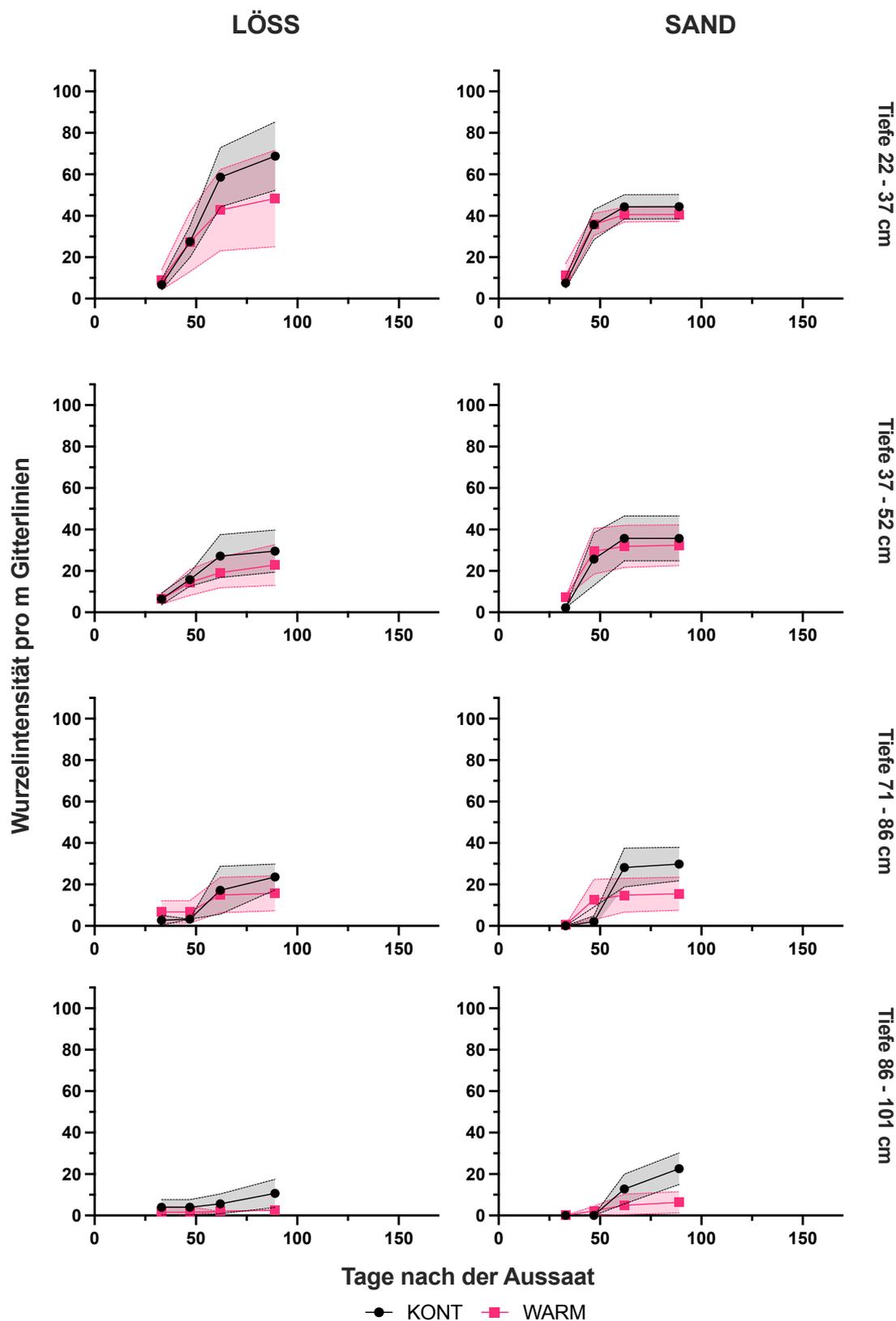


Abbildung 21: Wurzelintensität für Sommergerste in KP4

Dargestellt getrennt nach LÖSS und SAND ohne Berücksichtigung der Niederschlagsstufen. Standardabweichung durch transparenten Bereich markiert. P-Werte kennzeichnen statistisch gesicherte Unterschiede zwischen KONT und WARM.

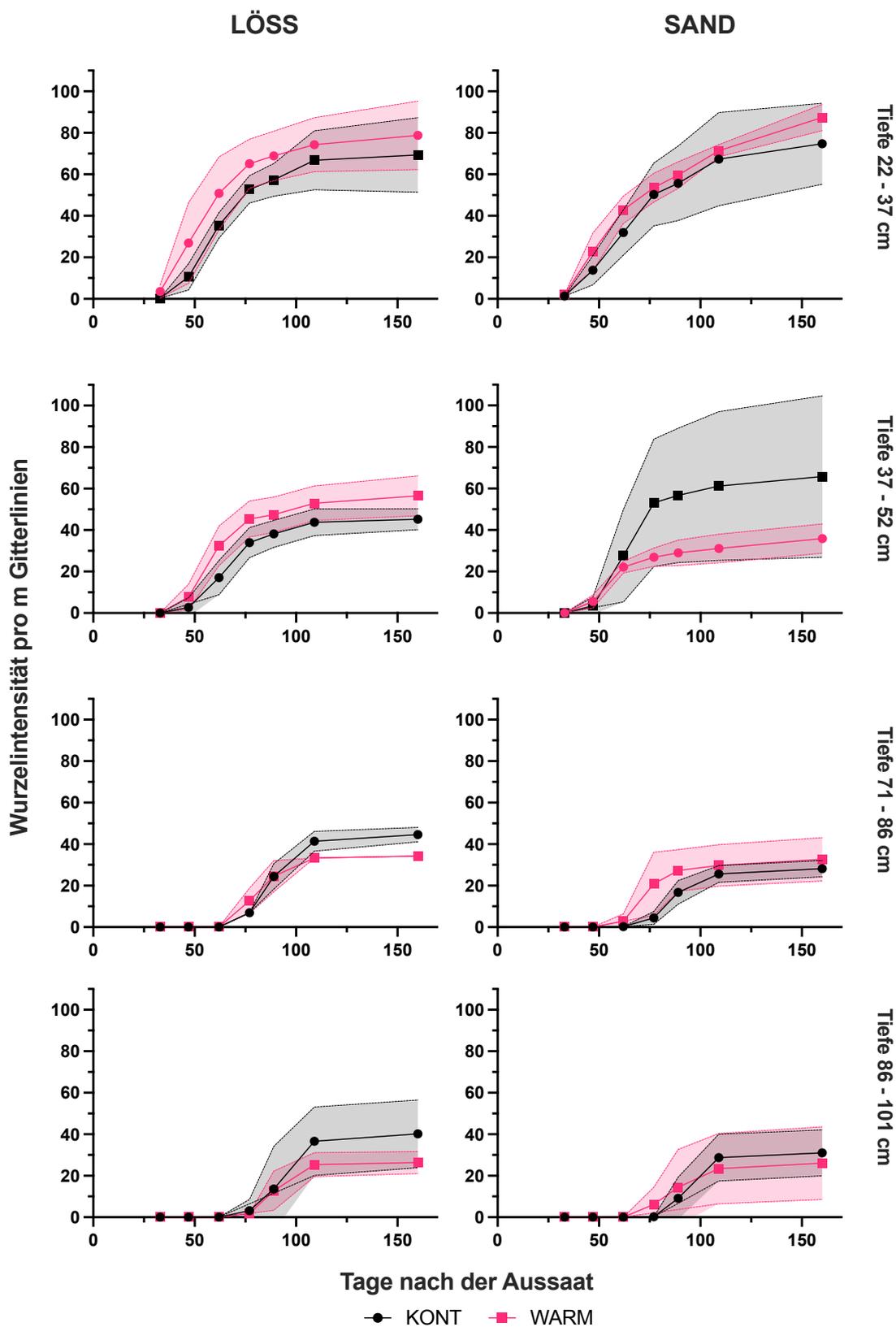


Abbildung 22: Wurzelintensität für Luzerne in KP4

Dargestellt getrennt nach LÖSS und SAND ohne Berücksichtigung der Niederschlagsstufen. Standardabweichung durch transparenten Bereich markiert. P-Werte kennzeichnen statistisch gesicherte Unterschiede zwischen KONT und WARM.

Kulturphasenübergreifende Auswertung

Für die Wurzelintensität wurden ähnlich wie für den Ertrag CRV-Werte ermittelt. Als Basis dienten die maximal aufgetretenen Wurzelintensitäten jeder Tiefenzone in einer Kulturphase, die dann gemittelt und in CRV-Werte umgerechnet wurden (Abbildung 23).

Die Wurzelintensität ist unter KONT im Vergleich zu WARM über alle Niederschlagsstufen und Bodenvarianten hinweg signifikant höher. Auch die Bodenvariante hatte einen signifikanten Einfluss auf die Wurzelintensität, wobei SAND höhere Werte aufwies als LÖSS. Die Wurzelintensität für KONT lag generell über dem Durchschnitt (CRV<1). Eine Ausnahme bildete lediglich die Variante TROCKEN auf LÖSS. Die Niederschlagsstufen hatten keinen Einfluss auf das Wurzelwachstum.

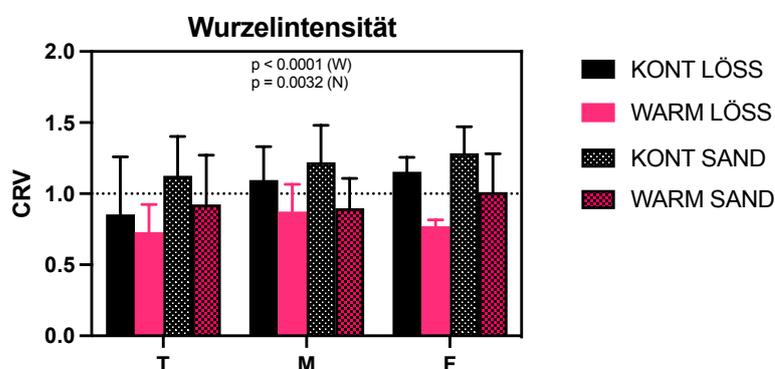


Abbildung 23: Wurzelintensität von KP1-KP4 umgerechnet in CRV-Werte

Werte kleiner als 1 liegen unter dem Durchschnitt und Werte größer als 1 darüber. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

3.3.7 Auswirkungen auf pflanzenphysiologische Prozesse

Neben den agronomisch relevanten Ertragsparametern wurden auch pflanzenphysiologische Daten erhoben, um mögliche wärmebedingte Auswirkungen auf das Wachstum zu dokumentieren. Erfasst wurden der Feldaufgang zu verschiedenen Zeitpunkten, die Wuchshöhe sowie die BBCH-Stadien der Pflanzen, der Chlorophyllgehalt der Blätter und die Chlorophyllfluoreszenz. Die Wärmeemission zeigte dabei einen stärkeren Einfluss auf den Feldaufgang der verschiedenen Kulturen.

3.3.8 Feldaufgang im zeitlichen Verlauf

Der zeitliche Verlauf des Feldaufgangs, d.h. die Anzahl der gekeimten Pflanzen nach einer bestimmten Anzahl von Tagen nach der Aussaat, unterschied sich in den meisten Kulturphasen zwischen KONT und WARM. Abbildung 24 zeigt die einzelnen Kulturphasen

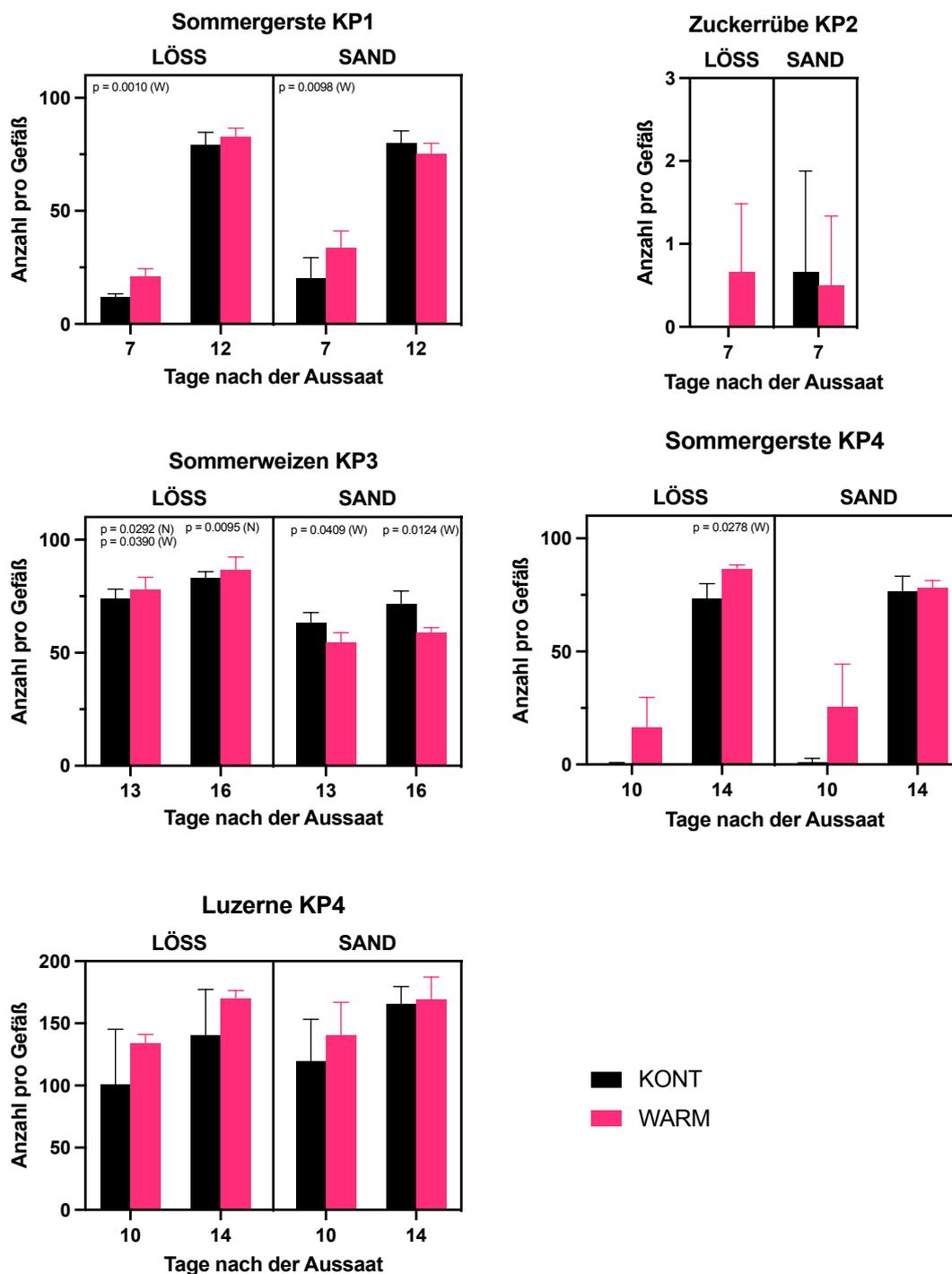


Abbildung 24: Feldaufgang in den einzelnen Kulturphasen.

Anzahl der gekeimten Pflanzen in Abhängigkeit der Tage nach der Aussaat. P-Werte kennzeichnen Signifikanz für NIEDERSCHLAG (N) oder WARM (W).

zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Aussaat. Die unterschiedlichen Niederschlagsstufen in KP1-KP3 sind nicht dargestellt, wurden aber statistisch berücksichtigt und die entsprechenden p-Werte sind angegeben.

In KP1 war die Anzahl der Keimlinge unter WARM nach 7 Tagen signifikant höher, sowohl auf LÖSS als auch auf SAND. Nach 12 Tagen konnte kein Unterschied mehr festgestellt werden. Auf SAND änderte sich der Trend und nach 12 Tagen waren unter KONT etwas mehr Keimlinge zu sehen als unter WARM. Die Zuckerrübe in KP2 wurde nach wenigen Tagen vereinzelt, daher ist nur ein Zeitpunkt dargestellt. Für LÖSS zeigte sich wieder ein früheres Auflaufen unter Wärmeeinwirkung, während die Keimlinge auf SAND unter KONT zügiger keimten. Das Ergebnis ist jedoch statistisch nicht belastbar, da keine Normalverteilung und keine Varianzhomogenität vorlagen. In KP3 waren nach 13 Tagen unter WARM signifikant mehr Keimlinge auf LÖSS zu finden als unter KONT. Nach 16 Tagen war mit einem p-Wert von 0,0650 immer noch eine starke Tendenz zu besseren Keimraten unter WARM zu erkennen. Auf SAND hingegen keimten 13 und 16 Tage nach der Aussaat signifikant weniger Pflanzen unter WARM als unter KONT. In der dritten Kulturphase wurde auf LÖSS die Anzahl der Keimlinge zusätzlich signifikant durch die Niederschlagsstufen beeinflusst, mit $p = 0,0292$ nach 13 Tagen und $p = 0,0095$ nach 16 Tagen. Für KP4 wurde aufgrund der einheitlichen Bewässerung nur der Unterschied zwischen KONT und WARM statistisch geprüft. Die Sommergerste keimte in KP4 unter WARM auf beiden Bodenvarianten eher und nach 14 Tagen auf LÖSS signifikant. Eine statistische Absicherung nach 10 Tagen war ähnlich wie in K2 aufgrund fehlende Varianzhomogenität nicht möglich. Die Wärmeemission hatte keinen Einfluss auf den Feldaufgang der Luzerne, auch wenn im Durchschnitt mehr Keimlinge unter WARM beobachtet werden konnten.

3.3.9 Chlorophyllgehalt, BBCH und Wuchshöhe.

Die Messungen der Chlorophyllfluoreszenz für die Kulturphasen KP1-KP3 zu verschiedenen Zeitpunkten der Wachstumsphase ergaben keine Unterschiede zwischen den Varianten. Die Ergebnisse der Messungen des Chlorophyllgehaltes, der Bewertung der BBCH-Stadien sowie der Wuchshöhe für die Getreidearten zeigten nur vereinzelt aufgetretene signifikanten Unterschiede. Auch die beiden simulierten Standorte LÖSS und SAND beeinflussten die Ergebnisse in unterschiedlicher Weise. Im Folgenden werden nur die signifikanten Ergebnisse dargestellt.

Die Wuchshöhe der Sommergerste in KP1 unterschied sich zunächst nicht. Jedoch fiel auf SAND die endgültige Wuchshöhe für KONT signifikant höher aus als für WARM, was sich

nach ca. 70 Tagen nach der Aussaat abzeichnete (Abbildung 25). Auf LÖSS war der Unterschied weniger ausgeprägt und nicht signifikant. Der Sommerweizen in KP3 und die Sommergerste in KP4 zeigten keine Unterschiede in der Wuchshöhe.

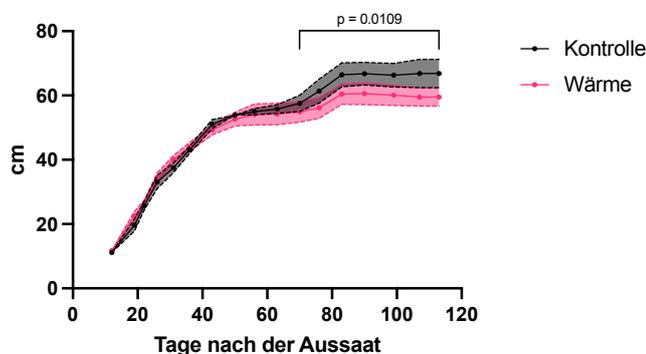


Abbildung 25: Wuchshöhe der Sommergerste in KP1 auf SAND.

P-Wert kennzeichnet signifikanten Unterschied zwischen WARM und KONT. Transparenter Bereich markiert die Standardabweichung.

Die Zuckerrüben auf LÖSS entwickelten sich unter WARM schneller und erreichte 40 Tage nach der Aussaat höhere BBCH-Stadien als unter KONT. Ähnliche Entwicklungsvorsprünge traten jedoch bei keiner anderen Kultur auf (Abbildung 26).

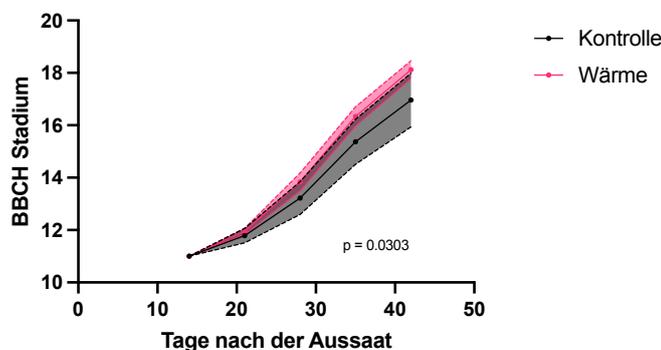


Abbildung 26: Entwicklungsstadien der Zuckerrübe in KP2 auf LÖSS.

P-Wert kennzeichnet signifikanten Unterschied zwischen WARM und KONT. Transparenter Bereich markiert die Standardabweichung.

Wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, war der Chlorophyllgehalt des Sommerweizens auf SAND unter WARM zunächst höher als in KONT, näherte sich jedoch nach ca. 85 Tagen nach der Aussaat wieder KONT an. Der Chlorophyllgehalt der anderen Kulturen wurde durch die Wärmeeinwirkung nicht beeinflusst.

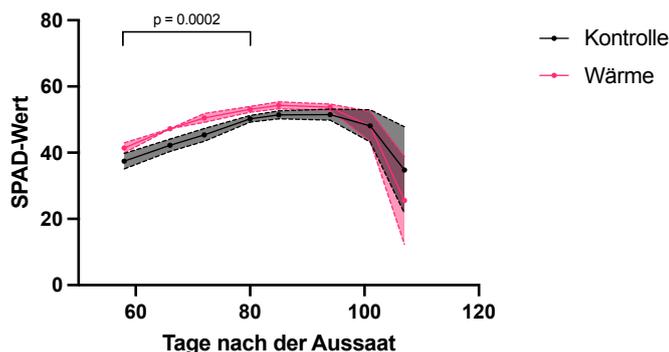


Abbildung 27: Chlorophyllgehalt für Sommerweizen in KP3 auf SAND.

P-Wert kennzeichnet signifikanten Unterschied zwischen WARM und KONT. Transparenter Bereich markiert die Standardabweichung.

3.4 Methodenkontrolle der HAL-Ms nach Versuchsabschluss

Zur Überprüfung der entwickelten Methode wurden nach Abschluss der letzten Kulturphase im November 2022 zwei der LÖSS-Gefäße geöffnet und auf die Auswirkungen der Wärmeemission untersucht. Dabei wurden ein WARM und ein KONT HAL-M geöffnet und verglichen. Ein statistischer Vergleich war aufgrund fehlender Wiederholungen nicht möglich. In Abbildung 28 **a_w** und **d_k** ist der Oberboden mit einem ca. 10 cm tiefen Bearbeitungshorizont zu erkennen, in dessen Bereich die Bodenbearbeitung und Stroheinbringung erfolgte. Im Bild **e_k** sind im Abstand von 15 cm zueinander die Wurzelsperren zu erkennen, die bis in eine Tiefe von 100 cm eingebaut wurden. Bis zu den Tiefen mit eingebauten Wurzelsperren konnte in den untersuchten HAL-Ms kein Wurzelwachstum an der Gefäßwand festgestellt werden, was für die erfolgreiche Funktion der Wurzelsperren spricht. Im Gefäßkern konnte generell ein gutes Wurzelwachstum beobachtet werden. Der Unterboden und das Bettungsmaterial bildeten aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Textur und Lagerungsdichte keine Verbindung. Wie auf Bild **c_w** und **f_k** in Abbildung 28 gut zu erkennen ist, konnte das Unterbodenmaterial auch nach über zwei Jahren Versuchszeit noch sehr gut von der Bettung gelöst werden.

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen den unteren Abschnitt der beiden geöffneten Gefäße. Bautechnisch konnten in der Tiefe noch keine Wurzelsperren installiert werden, weshalb am Rand der Gefäße Wurzelwachstum zu erkennen ist. Unter KONT (Abbildung 29, Kreis 1) fielen helle, vital wirkende Wurzeln auf, während die Wurzeln unter WARM durchweg braun waren (Abbildung 30, Kreis). Das frühere und häufigere Auftreten von braun verfärbten Wurzeln konnte auch bei der Auswertung der Wurzelscans beobachtet werden. Ebenfalls

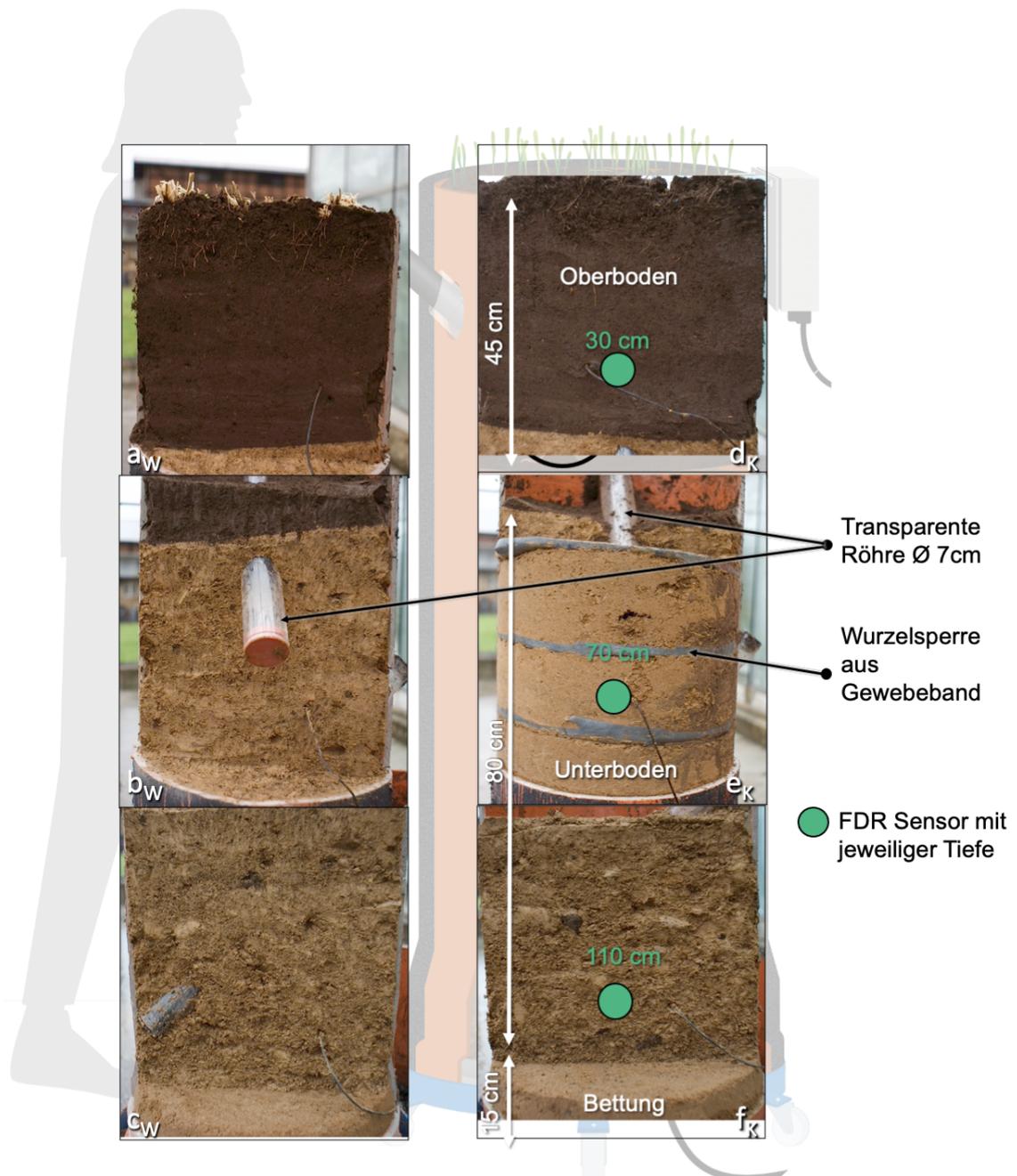


Abbildung 28: Einblick in geöffneten HAL-M-Gefäße.

Links das Gefäß unter Wärmeeinfluss (W), rechts die Kontrolle (K)

gut erkennbar war die Regenwurmaktivität in KONT, die jedoch nicht in das Bettungsmaterial eindrang.

Unter KONT drangen vereinzelt Wurzeln in das Bettungsmaterial ein (Abbildung 29, Kreis 2). Im Gegensatz dazu zeigte das Gefäß unter Wärmeemission keine Regenwurmaktivität oder Wurzelwachstum in den untersten Bereichen (Abbildung 30).



Abbildung 29: Geöffnetes HAL-M-Gefäß unter KONT

Gefäß mit LÖSS der Kontrolle in ca. 90-130 cm Tiefe. Gefäßwand wurde entfernt und das unberührte Bodenmaterial freigelegt. Kreis 1 markiert einen Bereich mit hellen Wurzeln, Kreis 2 Regenwurmgänge am Übergang zum Bettungsmaterial. Wurzelwachstum im Bettungsmaterial ist zu sehen.

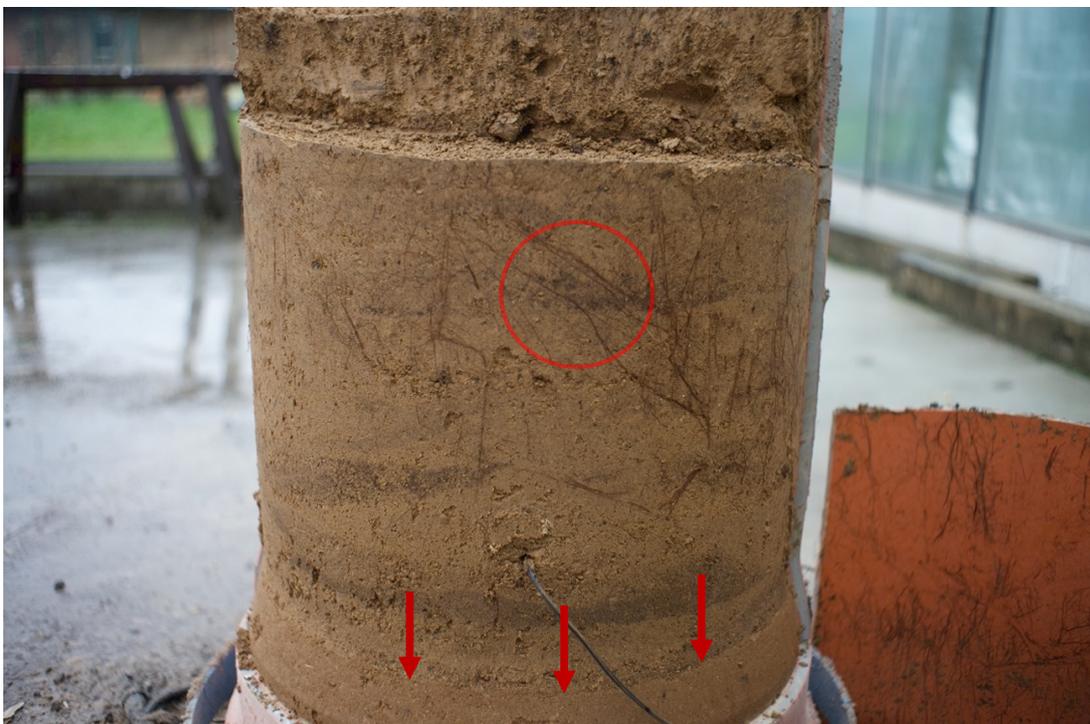


Abbildung 30: Geöffnetes HAL-M-Gefäß unter WARM

Gefäß mit LÖSS unter WARM in ca. 90-130 cm Tiefe. Gefäßwand wurde entfernt und das unberührte Bodenmaterial freigelegt. Der Kreis markiert den Bereich mit braunen Wurzeln, Pfeile den Übergang zum Bettungsmaterial.

In Tabelle 8 sind die bodenphysikalischen Parameter im Vergleich zwischen KONT und WARM zu Versuchsbeginn und Versuchsende dargestellt. Für die Trockenrohddichte (TRD) und das Gesamtporenvolumen (PV_{ges}) konnten keine Auffälligkeiten nach 3 Jahren Versuchszeit unter WARM festgestellt werden. Der leichte Anstieg der Luftkapazität (LK) im Jahr 2022 im Vergleich zu 2019 kann mit der Regenwurmaktivität und dem Wurzelwachstum in Verbindung gebracht werden. Dadurch hat die Feldkapazität im Jahr 2022 etwas abgenommen. Der kf-Wert, der die Infiltrationskapazität des Bodens beschreibt, hat sich in der Kontrollgruppe fast verdoppelt. Unter Wärmeeinfluss war die Veränderung weniger ausgeprägt.

Tabelle 8: Stichprobenartiger Vergleich bodenphysikalische Parameter

Trockenrohddichte (TRD), Gesamtporenvolumen (PV_{ges}), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK), gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Wert)

Bodensubstrat	Variante und Zeit	TRD (g cm⁻³)	PV_{ges}. (Vol.%)	LK (Vol.%)	FK (Vol.%)	k_f cm d⁻¹
LÖSS Oberboden Uu	2019 Einbau	1,22	53,4	11,7	41,7	26,6
	2022 KONT	1,25	52,1	14,8	37,3	46,7
	2022 WARM	1,25	52,2	15,1	37,1	36,6
LÖSS Unterboden Ut2	2019 Einbau	1,40	46,3	4,0	42,3	9,9
	2022 KONT	1,44	44,9	8,7	36,2	18,8
	2022 WARM	1,47	43,6	6,4	37,2	10,1

4. Diskussion

4.1 Methodische Aspekte der Versuchsdurchführung

4.1.1 Boden- und Gewächshaustemperaturen

Es ist bekannt, dass der Wassergehalt des Bodens in der Nähe einer Wärmequelle aufgrund des Dampfstroms abnimmt (Moya et al., 1999). Der Dampfstrom kann dabei bis zu 50 % der Energie und 25 % der Feuchtigkeit transportieren (Cahill und Parlange, 1998). Zur Bestimmung des Dampfstroms ist die Messung des Wärmestroms notwendig, die mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden kann (Lu et al., 2016). Aus anderen Experimenten ist bekannt, dass der Bodenwassergehalt den Wärme- und Dampfstrom positiv beeinflusst (Evet et al., 2012). Die beobachtete Kondensation von Wasser an der Außenseite der transparenten Röhren für die Wurzelbeobachtung weist auf den Dampfstrom im Boden in den HAL-Ms hin (Abbildung 7). Messungen des Wärme- und Dampfstroms wurden jedoch nicht durchgeführt. Die Ergebnisse aus den HAL-Ms zeigen tendenziell den Einfluss der Niederschlagsstufen und damit des Bodenwassergehalts auf den Wärmestrom. Die in Tabelle 6 dargestellten signifikanten Unterschiede lassen jedoch keine eindeutige Interpretation zu. Insbesondere auf SAND in KP2 und KP3 traten in allen Bodentiefen größere Unterschiede der Bodentemperatur in Abhängigkeit von der Niederschlagsstufe auf. Unter TROCKEN waren die Temperaturunterschiede zwischen WARM und KONT am geringsten, während MITTEL und FEUCHT deutlich höhere Differenzen aufwiesen. Ab Beginn von KP2 zeigte die Niederschlagsstufe FEUCHT grundsätzlich die höchsten Temperaturdifferenzen, insbesondere in den Tiefen 110 und 70 cm. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Feuchtigkeit eine bessere Abfuhr der Wärmeemissionen in den HAL-M begünstigt. In KP4 glichen sich die Temperaturunterschiede wieder an, nachdem die unterschiedlichen Niederschlagsniveaus verschwunden waren. Dies unterstützt die obige Erklärung. Dagegen spricht jedoch, dass es in KP3 auf SAND keinen Unterschied zwischen MITTEL und FEUCHT gab und dass auf LÖSS in 110 cm die Variante MITTEL geringere Temperaturdifferenzen aufwies als die Variante TROCKEN. Eine eindeutige Interpretation wird durch mögliche bauliche Unterschiede der Gefäße oder die geringe Anzahl der Wiederholungen pro Variante erschwert. Die mittleren Temperaturdifferenzen in den HAL-Ms lagen in ähnlichen Bereichen wie in vergleichbaren Freilandversuchen. Im „Freiburger Experiment“ von Trüby lag bei gleicher simulierter Kabeltemperatur die Differenz zwischen Wärmebehandlung und Kontrolle in 105 cm Tiefe zwischen 10 und 20 °C und in 40 cm Tiefe zwischen 5 und 10 °C (Trüby, 2014). In einem weiteren Versuch von Trüby (2014, „Kabeltest Osterath“) betrug die Temperaturdifferenz in 20 cm Tiefe je nach verwendetem Bettungsmaterial zwischen 3,5 und

4,2 °C. Die Temperatur direkt über dem Kabel war in dieser Versuchsanordnung deutlich niedriger als die für HAL-Ms angenommenen 50 °C. Unveröffentlichte Temperaturdaten aus aktuellen Freilandversuchen wie CHARGE der Universität Hohenheim und dem Projekt der Universität Göttingen weisen in eine ähnliche Richtung wie die Temperaturunterschiede bei den HAL-Ms. Eine projektübergreifende Auswertung der Daten wäre nach Veröffentlichung interessant. Festzuhalten ist, dass die simulierte Temperatur in den HAL-Ms zu realistisch erhöhten Bodentemperaturen in den darüber liegenden Schichten geführt hat.

Tabelle 9: Durchschnittliche Temperaturdifferenzen

Angabe in Kelvin je Kulturphase, Bodenvariante und Tiefe sowie als Mittelwert (M) über die gesamte Laufzeit

Tiefe	KP1		KP2		KP3		KP4		M
	LÖSS	SAND	LÖSS	SAND	LÖSS	SAND	LÖSS	SAND	
30 cm	2,9	3,7	2,3	3,4	1,9	3,4	3,3	4,3	3,2
70 cm	7,4	8,6	6,5	8,2	5,2	8,0	8,4	10,0	7,8
110 cm	18,5	18,4	17,0	18,0	14,7	17,2	19,8	20,6	18,0

Der Bodenwassergehalt ist der dominierende Faktor für die Wärmeleitfähigkeit und eine Verringerung führt zu einem erhöhten Wärmewiderstand (Dong et al., 2015; Singh und Devid, 2000). Die Simulation der Wärmeemission erfolgte in den HAL-Ms temperaturgesteuert (PID-Regler) anstelle eines kontinuierlichen Wärmeflusses (W m^{-1}). Für die Wärmesimulation könnte dies bedeuten, dass der sinkende Bodenwassergehalt aufgrund des Wurzelwachstums den thermischen Widerstand erhöhte. Die temperaturgesteuerte Wärmesimulation verbrauchte infolgedessen weniger Energie, um die voreingestellte Temperatur von 50 °C aufrechtzuerhalten, als es bei einem Betrieb mit konstantem Wärmefluss (W m^{-1}) der Fall gewesen wäre. Im August 2020 betrug der durchschnittliche monatliche Energieverbrauch eines Fassheizrollers 32 W pro Stunde im Vergleich zu 45 W pro Stunde im Januar. Dieser Unterschied kann auf die temperaturgesteuerte Wärmesimulation zurückzuführen sein. Weiterhin deuten die Ergebnisse darauf hin, dass auch die erhöhten Temperaturen im Gewächshaus die temperaturgesteuerte Wärmesimulation beeinflusst hat. Mit steigender Umgebungstemperatur in den Kulturphasen sank die Differenz zwischen HEAT und CTRL, was in KP1, KP2 und KP3 gut zu beobachten war. Aufgrund der fehlenden Klimatisierung der Gewächshäuser konnte die Temperatur in den wärmeren Monaten nicht wie geplant reguliert werden (Abbildung 31). Außerdem spielten die ungewöhnlich hohen Außentemperaturen und die Notwendigkeit, das Gewächshaus bei starkem Wind zu schließen, eine Rolle. Um optimale Startbedingungen für die Bodentemperatur in KP3 zu gewährleisten, wurde

auf höhere Sollwerte in den letzten Tagen von KP2 verzichtet. Aufgrund der suboptimalen Bedingungen und der bereits relativ hohen Temperaturen im Gewächshaus wurde im weiteren Versuchsverlauf weitgehend auf die Einhaltung der Solltemperaturen verzichtet.

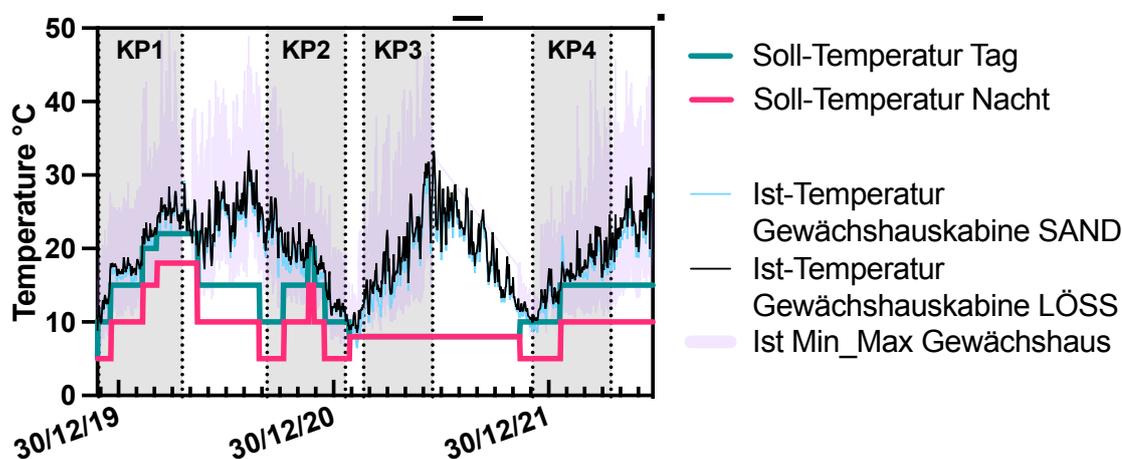


Abbildung 31: Soll-Ist Umgebungstemperatur im Gewächshaus.

Zwischen KP3 und KP4 wurde keine Soll-Temperatur eingestellt

Die Befürchtung, dass der Boden in den beheizten Gefäßen austrocknen könnte, hat sich nicht bestätigt. Experimente haben zwar gezeigt, dass der Boden in der Nähe von Wärmequellen einen Bodenwassergehalt von nahezu 0 % erreichen kann, dies war jedoch auf einen kleinen Bereich sehr nahe an der Wärmequelle beschränkt (Moya et al., 1999). Eine Messung des Bodenwassergehalts direkt an der Wärmequelle war in den HAL-M nicht erforderlich, da in der Regel kein Wurzelwachstum in das Bettungsmaterial eindringt und somit für die Kulturpflanzen nicht von Bedeutung ist.

4.1.2 Wurzelbeobachtung

Die transparenten Röhren zur Beobachtung des Wurzelwachstums mit Hilfe des Minirhizotrons wurden während des Versuchs-Gefäßbaus installiert. Der Boden wurde um die Rohre herum sorgfältig aufgefüllt und verdichtet, um einen dichten Bodenanschluss zu gewährleisten, ohne die Oberfläche der Rohre zu zerkratzen. Dies kann normalerweise bei der Verlegung im Feld passieren, was sich negativ auf die Beobachtung der Wurzeln auswirken kann. Svane et al. (2019a) installierten in ihrem Versuch die Röhren mit einem Neigungswinkel von weniger als 45° , um ein präferenzielles Wurzelwachstum zu verhindern. Andere Studien kamen zu dem Ergebnis, dass es keinen Unterschied zwischen verschiedenen

Neigungswinkeln gibt (Ephrath et al., 1999). Bei der vertikalen Installation sind 45° und 30° die am häufigsten verwendeten Neigungswinkel (Vamerali et al., 2012). Daher wurde in den HAL-Ms einen Winkel von 45° verwendet und als Neuerung zwei Rohre versetzt zueinander eingebaut. Dadurch wurde der Beobachtungsbereich pro Gefäß vergrößert und Störungen durch das jeweils darüberliegende Rohr reduziert. In den HAL-Ms konnten keine Probleme mit präferenziellem Wurzelwachstum aufgrund des 45° Winkels beobachtet werden.

Die Schwierigkeiten bei der Unterscheidung von neuen und alten Wurzeln sowie die Schwierigkeiten bei der Erkennung von Wurzeln auf LÖSS konnten durch eine angepasste Zählmethode überwunden werden, bei der das jeweilige Wurzelwachstum mit dem vorherigen Scan verglichen wurde. Diese Methode verhinderte falsch positive Wurzelzählungen und ermöglichte auch die Erkennung kleinerer Wurzelteile. Schwierigkeiten bei der Erkennung von Wurzeln, die durch Kondenswasser an der Außenseite der durchsichtigen Röhren der Gefäße mit simulierter Wärmeemission verursacht wurden, konnten auf diese Weise ebenfalls umgangen werden.

Im Allgemeinen können mit der Rhizotronmethode nur Ausschnitte des Wurzelwachstums im Boden untersucht werden. Detailliertere Untersuchungen des Wurzelwachstums könnten mit großflächigen Röntgen-Computertomographen durchgeführt werden, um das gesamte Wurzelsystem in HAL-Ms zu erfassen (Li et al., 2018; Metzner et al., 2015).

4.1.3 Sensortechnik

Der Bodenwassergehalt in den Gefäßen wurde über den gesamten Zeitraum kontinuierlich in drei Tiefen gemessen. Zur Überwachung der Bodenfeuchte gibt es verschiedene Sensoren und Methoden, die in der landwirtschaftlichen Forschung eingesetzt werden. Tensiometer, die in der Nähe der Wurzeln installiert werden, sind besonders geeignet, um den Wasserstress der Pflanzen durch Messung des Matrixpotenzials zu bestimmen. Da jedoch vor Projektbeginn die Gefahr der Austrocknung des Bodens durch die Wärmeemission postuliert wurde, kamen Tensiometer nicht in Betracht. Tensiometer funktionieren nur, wenn eine hydraulische Verbindung zum Boden besteht. Bei ständigem Einsatz besteht die Gefahr der Austrocknung und die Sensoren müssen daher regelmäßig wieder befeuchtet werden (Hardie, 2020).

Eine zuverlässige und wartungsarme Methode zur Bestimmung des Bodenwassergehalts bieten „Frequency Domain Reflectometry (FDR) Sonden (Nieberding et al., 2023). FDR-Sonden bestimmen den Feuchtegehalt indirekt, indem sie die Dielektrizitätskonstante des

Bodens aus den Frequenzänderungen eines sich im Boden ausbreitenden elektromagnetischen Impulses ermitteln. Um Messfehler zu vermeiden, ist bei diesen Sonden eine bodenspezifische Kalibrierung und ein sorgfältiger Einbau ohne Lufteinschlüsse erforderlich. In Übereinstimmung mit der von Berthelin et al. (2020) in ihrer Publikation beschriebenen Methodik fokussierte sich die Untersuchung der HAL-Ms jedoch primär auf die Dynamik des Bodenwassergehalts und weniger auf die Ermittlung absoluter Werte. Eine wissenschaftliche Evaluation der werkseitigen Kalibrierung von 700 Sonden des in den HAL-Ms verwendeten Typs SMT 100 zeigte, dass eine ausgezeichnete Sonden-zu-Sonden-Kalibrierung besteht (Bogena et al., 2017). Für die Untersuchung der Bodenfeuchtedynamik war daher eine aufwändige Kalibrierung nicht erforderlich. Darüber hinaus konnte in einer Studie von Kang et al. (2019) gezeigt werden, dass das Wurzelwachstum bei der Messung mit den FDR-Sonden zu einer Differenz von bis zu 8,7 Volumenprozent führen kann, was die aufwändige Kalibrierung hinfällig gemacht hätte. Das Wurzelwachstum in den HAL-M hätte langfristig einen unvermeidbaren Störfaktor dargestellt und die Aussagekraft der absoluten Bodenfeuchtwerte konterkariert. Die Fokussierung auf die Dynamik der Veränderung des Bodenwassergehaltes in Abhängigkeit vom Pflanzenwachstum kann daher als valide Alternative angesehen werden.

Die in Abbildung 6 dargestellten Bodenwassergehalte zeigen vereinzelt Auffälligkeiten, die durch den Einbau und mögliche Lufteinschlüsse um die Sonde verursacht sein können. So lagen die Bodenwassergehalte für die beheizten Gefäße auf SAND in 110 cm Tiefe bei der Niederschlagsstufe FEUCHT durchweg um ca. 10 Vol.-% höher als bei der Kontrolle. Auf LÖSS unter MITTEL in 110 cm Tiefe zeigte sich eine größere Varianz der beiden gemessenen Gefäße für WARM. Die Heterogenität der Trockenrohddichte in den HAL-M und die begrenzte Anzahl von nur zwei Wiederholungen erschweren genaue Berechnungen. Die wesentliche Dynamik der Bodenwassergehalte ist jedoch gut erkennbar. Ähnliche Auffälligkeiten konnten in der vierten Kulturphase nicht festgestellt werden. Dies könnte u.a. auf die einheitliche Bewässerung und die Neuverteilung der Versuchsglieder zurückzuführen sein.

4.1.4 Änderung des Versuchsdesigns

Änderungen im Versuchsdesign sollten grundsätzlich wohlüberlegt sein und nicht ohne wissenschaftliche Begründung vorgenommen werden. Sie können in bestimmten Fällen aber notwendig sein (Poulton et al., 2024). Daher wurde nach Abschluss der dreigliedrigen Fruchtfolge im Herbst 2021 über eine vierte Kulturphase und deren konkrete Ausgestaltung

diskutiert. Da die Niederschlagsstufen bis zu diesem Zeitpunkt zwar einen deutlichen Einfluss auf den Ertrag, aber nur eine untergeordnete Rolle auf die Wärmeausbreitung im Boden hatten, wurde anstelle des Faktors C (NIEDERSCHLAG) die Kulturart (KULTUR) mit Sommergerste (SG) und Luzerne (LU) als neuer Faktor D (KULTUR) in den Versuchsablauf integriert.

Dadurch konnte das Spektrum der untersuchten Kulturen erweitert werden, wobei zur Validierung der Ergebnisse aus KP1 erneut Sommergerste angebaut wurde.

4.2 Auswirkung der Wärmeemission auf das Pflanzenwachstum

Anhand der CRV-Werte für den Ertrag war zu sehen, dass sich die Wärmeemission über die gesamte Fruchtfolge betrachtet überwiegend negativ auf den Ertrag der Kulturen auswirkte. Dabei gab es kulturspezifische Unterschiede, auf die im Folgenden eingegangen wird und die auch vom simulierten Standort abhingen. Weiterhin ist zu erwähnen, dass die im Versuch gewählten Niederschlagsstufen mit Ausnahme der Sommergerste auf LÖSS in KP1 generell einen signifikanten Einfluss auf den Ertrag hatten. Mehr pflanzenverfügbares Wasser führt in der Regel zu höheren Erträgen, was sowohl durch Niederschlag als auch durch künstliche Bewässerung beeinflusst wird (Cossani et al., 2009; Gulati und Murty, 1979; Kenter et al., 2006; Peltonen-Sainio et al., 2011).

In den ersten drei Kulturphasen konnte keine Wechselwirkung zwischen NIEDERSCHLAG und WARM festgestellt werden. Um sicherzustellen, dass die Effekte der Wärmeemission nicht durch die Niederschläge überlagert werden, wurde in der vierten Kulturphase nur eine Niederschlagsstufe gewählt. Die unterschiedlichen Niederschlagsstufen spielen bei der nachfolgenden Betrachtung der Erträge nur eine untergeordnete Rolle. Der Fokus liegt deutlich auf dem Einfluss der Wärmeemission.

4.2.1 Erträge und Qualitätsparameter

Die Erträge der Kontrolle waren vergleichbar mit den Erträgen unter Feldbedingungen in Sachsen-Anhalt (Statistisches Landesamt von Sachsen-Anhalt, 2023). Das HAL-M-System hat sich somit als zuverlässig und überzeugend erwiesen, so dass nach Abschluss der ursprünglichen Projektlaufzeit von drei Kulturphasen eine Verlängerung um eine weitere Kulturphase finanziert wurde. Diese zusätzlichen Ergebnisse konnten die bis dahin widersprüchlichen Daten weiter klären.

4.2.1.1 Sommergerste (*Hordeum vulgare*)

Die Sommergerste in KP1 reagierte von allen Kulturen am stärksten auf die Wärmeemission. Die Kornerträge lagen mit 181,6 bis 538,6 g m⁻² in KP1 und 345,3 bis 604,9 g m⁻² in KP4 im Bereich der Durchschnittserträge der letzten Jahre für Sachsen-Anhalt (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, 2023).

Zweizeilige Gerste, wie sie im vorliegenden Versuch verwendet wurde, produziert normalerweise 15 bis 30 Körner pro Ähre (Whitehouse, 1979). Im Vergleich dazu lag die Kornzahl unter KONT im unteren Bereich. Möglicherweise ist dies auf die höheren Umgebungstemperaturen im Gewächshaus im Vergleich zum Freiland zurückzuführen. Bereits eine Erhöhung der Umgebungstemperatur um 5 °C führte bei Versuchen mit Sommergerste in klimatisierten Phytotronen zu Ertragseinbußen (Clausen et al., 2011). In einem anderen Versuch führten kurzzeitige Lufttemperaturspitzen von 40 °C zu einer Ertragsminderung bei Gerste von 13 % (Savin und Nicolas, 1999). Höhere Umgebungstemperaturen sowie vergleichbare Temperaturspitzen traten auch bei der Kultivierung auf den HAL-Ms auf. Die Auswertung eines Langzeitfeldversuchs in Finnland zeigt jedoch, dass solche Temperatureinflüsse auf den Ertrag nicht nur im Gewächshaus beobachtet werden können. Unter wärmeren Bedingungen zeigte Sommergetreide in einem anderen Versuch einen um ca. 5-6 % geringeren Ertrag (Peltonen-Sainio et al., 2011). Die suboptimale Umgebungstemperatur könnte also bereits zu einer allgemeinen Stresssituation für die Sommergerste geführt haben. Es ist daher möglich, dass WARM nur in Kombination mit dieser Stresssituation zu Unterschieden führte.

Obwohl die Umgebungstemperatur nicht optimal war, waren die Bedingungen für alle Varianten gleich und der Einfluss der Wärmeemission im Boden war teilweise signifikant. Der Kornertrag war auf SAND unter WARM signifikant geringer, der Strohertrag sogar auf SAND und LÖSS. WARM führte auf SAND zu einer signifikant geringeren Kornanzahl, wobei sich die Ährenzahl zwischen WARM und KONT nicht signifikant unterschied. Im Gegensatz dazu war die Ährenzahl auf LÖSS unter WARM signifikant geringer, was aber letztendlich keinen Einfluss auf den Ertrag hatte.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit Sommergerste in KP4 zeigt ein ähnliches Bild. Auch hier war die Ährenzahl unter WARM auf LÖSS signifikant geringer und die Kornzahl pro Ähre auf SAND negativ beeinflusst. Der Ertrag wurde nicht signifikant beeinflusst, aber es zeigte sich eine Tendenz zu geringeren Erträgen unter Wärmeeinwirkung. Trotz der Unterschiede

im Ertragsniveau können die Ergebnisse von KP4 somit als Bestätigung der Ergebnisse von KP1 angesehen werden.

Der Einfluss der verschiedenen Niederschlagsstufen in KP1 spiegelt sich in der Ährenzahl und im TKG wider. Diese Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse anderer Versuche, in denen der Einfluss der Bewässerung auf mehrere Genotypen beobachtet wurde und signifikant niedrigere Werte für die Ährenzahl und den TKG unter Trockenstress festgestellt wurden (González et al., 2007). Die in anderen Versuchen beobachteten negativen Auswirkungen einer Bodenerwärmung auf die TKG konnten nicht bestätigt werden (Högy et al., 2013).

Als Zwiewuchs bezeichnet man das Nachwachsen von Trieben während der Abreife des Getreides. Grüne Triebe in ansonsten reifem Getreide können zu Qualitätsverlusten und Lagerproblemen führen. Unter WARM traten unter SAND signifikant mehr Zwiewuchs auf als unter KONT. In Freilandversuchen in Japan führten höhere Temperaturen zu vermehrtem Zwiewuchs bei Gerste (Tanaka und Nakano, 2019). Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass der Temperaturanstieg unabhängig von der Luft- oder Bodentemperatur eine Rolle spielt. In KP4 zeigte die Sommergerste jedoch keinen Unterschied zwischen WARM und KONT.

Der Proteingehalt der Sommergerste hat einen großen Einfluss auf die Bierqualität und sollte idealerweise zwischen 10,5 und 11,7 % liegen (Váňová et al., 2006). Für die Sommergerste auf den HAL-Ms mit LÖSS waren die Proteingehalte aufgrund der hohen N_{\min} Gehalte des Bodens sehr hoch. Auf SAND lagen die Proteingehalte etwas über dem Optimum, jedoch mit signifikant höheren Werten unter WARM. Ähnlich wie bei den Zwietrieben konnte beim erneuten Anbau in KP4 kein Unterschied zwischen WARM und KONT festgestellt werden. Es ist unklar, ob die Erhöhung der Bodentemperatur allein oder in Kombination mit anderen Faktoren einen Einfluss auf den Proteingehalt hatte. Ein Anstieg der Lufttemperatur kann z.B. bei Gerste zu einem signifikanten Anstieg des Proteingehaltes führen (Peltonen-Sainio et al., 2011). Die Ergebnisse aus dem HAL-M-System stimmen mit den Ergebnissen des Agrotherm-Versuches mit verschiedenen Wintergerstensorten überein. Auch hier wurde ein Ertragsverlust festgestellt, während der Proteingehalt 1977 von 11,5 % auf 16,5 % und 1978 von 11,8 % auf 13,8 % anstieg. Dagegen konnte beim Anbau von Sommergerste in den Jahren 1980 und 1981 unter erwärmten Böden eine deutliche Ertragssteigerung beobachtet werden (Reinken und Werning, 1982). Inwieweit der Einfluss des Jahres zu den unterschiedlichen Ergebnissen geführt haben könnte, wird nicht näher erläutert.

Es gibt verschiedene Erklärungsansätze, warum die Sommergerste in der ersten Kulturphase stärker reagierte als die anderen Kulturen. So ist es möglich, dass die künstliche

Bodenstruktur mit gestörten Makro- und Bioporen unmittelbar nach der Pflanzung in Kombination mit der Wärmeemission zu Ertragseinbußen geführt hat (Passioura, 1991). Das Wurzelwachstum und damit der Ertrag könnten beeinträchtigt worden sein.

Baubedingte Bodenverdichtungen durch schwere Transport- und Baufahrzeuge stellen eine gravierende Beeinträchtigung des Bodens beim Trassenbau dar (Feldwisch, 2015). Obwohl beim Bau der HAL-M keine vergleichbaren Baumaßnahmen durchgeführt wurden und die gewünschten Lagerungsdichten in den HAL-Ms erreicht wurden, könnte der schichtweise Einbau und die Verdichtung zu Problemen beim kapillaren Aufstieg und damit bei der Wasserversorgung, insbesondere in der ersten Kulturphase, geführt haben.

Abschließend ist zu erwähnen, dass in den ersten Versuchswochen der simulierte Tag-Nacht-Zyklus von 60/40 °C im Vergleich zu den später konstanten 50 °C möglicherweise einen unerwünschten Einfluss auf das Wachstum der Sommergerste hatte. Forschungen zur circadianen Uhr von Pflanzen deuten darauf hin, dass äußere zeitliche Einflüsse das Wachstum von Pflanzen beeinflussen können (Dakhiya et al., 2017; Hotta, 2021). Dies könnte den stärkeren Effekt auf den Ertrag der Sommergerste in KP1 unter WARM erklären. Der erneute Anbau von Sommergerste bei konstant 50 °C zeigte nur noch einen tendenziellen Einfluss von WARM auf den Ertrag.

4.2.1.2 Zuckerrübe (*Beta vulgaris subsp. vulgaris*)

Die Rübenerträge auf den HAL-Ms lagen im Vergleich zu ähnlichen Standorten im Freiland in Sachsen-Anhalt insgesamt auf einem vergleichbaren Niveau und reichten von ca. 3.200 bis 9.200 kg Frischmasse je m² (Deumelandt et al., 2010). Der Ertrag in der zweiten Anbauphase wurde signifikant von den Niederschlagsstufen beeinflusst, wobei die höchsten Erträge unter FEUCHT und die niedrigsten unter TROCKEN erzielt wurden. Gleiches galt für den Bereinigten Zuckerertrag. Wie bereits eingangs erwähnt, stellt die Bodenwasserverfügbarkeit eine wesentliche Ertragskomponente dar, was in verschiedenen Zuckerrübenfeldversuchen bereits bestätigt wurde und auch auf den HAL-Ms beobachtet werden konnte (Kenter et al., 2006). Auch die Blattmasse hing signifikant von den Niederschlagsstufen ab und war auf LÖSS deutlich höher als auf SAND. Dies lässt sich neben den Niederschlagsstufen auch auf die unterschiedlichen Feldkapazitäten der beiden simulierten Standorte zurückführen (Hanse et al., 2011).

Bezüglich des Einflusses der simulierten Wärmeemission verhielt sich die Zuckerrübe in KP2 standortabhängig gegenläufig zur Sommergerste. Unter WARM wurden auf LÖSS

signifikant höhere Erträge erzielt als in der Kontrolle. Auf SAND hingegen gab es keine Ertragsunterschiede. In einem Versuch mit der verwandten Kultur Mangold (*Beta vulgaris* L. var. *flavescens*) in Japan wurden höhere Erträge beobachtet, wenn der Boden mit verschiedenen Mulchauflagen bedeckt wurde, die zu einer Erhöhung der Bodentemperatur führten (Zhang et al., 2009). Dies könnte darauf hindeuten, dass die Wärmeemission die Erträge steigern kann. Da jedoch auf SAND keine Ertragssteigerung beobachtet werden konnte, spielt wahrscheinlich der durch die Vorfrucht veränderte Bodenwassergehalt eine größere Rolle. Darauf wird in Kapitel 4.5 näher eingegangen.

Die Ergebnisse zu den Qualitätsparametern, insbesondere zum Amino-N-Gehalt der Zuckerrüben, sind im Vergleich zur bestehenden Literatur eindeutiger. Auf den HAL-Ms ergab sich eine signifikante Erhöhung unter WARM, insbesondere unter TROCKEN auf SAND. Auf LÖSS gab es keine signifikanten Unterschiede, aber Tendenzen, die den bereinigten Zuckergehalt auf LÖSS signifikant beeinflusst haben könnten. Auch im eingangs erwähnten Agrotherm-Versuch konnte eine Erhöhung der Amino-N-Gehalte in verschiedenen Rübensorten durch Wärmeemission im Boden festgestellt werden (Reinken und Werning, 1982). Freilandversuche ohne künstliche Erwärmung des Bodens zeigen, dass der Amino-N-Gehalt im Rübenkörper in trockenen und warmen Jahren deutlich erhöht ist (Demmers-Derks et al., 1998; Mäck und Hoffmann, 2006). Daraus lässt sich ableiten, dass höhere Boden- oder Lufttemperaturen zu höheren Amino-N-Gehalten führen können.

Der bereinigte Zuckergehalt auf LÖSS lag unter WARM signifikant über der Kontrolle. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen des Agrotherm-Versuches, in dem für alle Standorte, Sorten und Jahre eine signifikante Abnahme des Zuckergehaltes gemessen wurde, wobei sich der Unterschied mit zunehmender Vegetationsdauer noch verstärkte (Reinken und Werning, 1982).

4.2.1.3 Sommerweizen (*Triticum aestivum*)

Die Niederschlagsstufen hatten einen signifikanten Einfluss auf den Korn- und Strohertrag von Sommerweizen in der dritten Kulturphase. Die Spanne reichte von 175 bis 430 g m⁻² für den Kornertrag und von 430 bis 805 g m⁻² für den Strohertrag. Bei der Auswertung eines langjährigen Freilandversuchs wurde auch bei Sommergerste unter vergleichbaren Bodenbedingungen eine Ertragssteigerung in feuchteren Jahren gegenüber trockenen Jahren beobachtet (Schilling et al., 2016). Die Niederschlagsstufe FEUCHT der HAL-Ms hatte einen signifikant positiven Einfluss auf die Ährenzahl, die Kornzahl pro Ähre und die Triebzahl

auf LÖSS. Dies stimmt mit anderen Versuchen überein, die die Auswirkungen von Trockenstress auf Sommerweizen untersuchten (Moustafa et al., 1996). Die Wassermenge, die der Pflanze zur Verfügung steht, ist ein entscheidender Ertragsfaktor, so auch beim Sommerweizen auf den HAL-M.

WARM hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Erträge oder die ertragsbestimmenden Parameter von Sommerweizen in der dritten Wachstumsperiode, außer für TKG auf SAND. Unter Freilandbedingungen konnte im Agrotherm-Versuch zumindest teilweise ein von jahreszeitlichen Effekten abhängiger Ertragszuwachs nachgewiesen werden (Reinken und Werning, 1982). In anderen Gefäßversuchen mit zwei Sommerweizensorten und drei verschiedenen Bodentemperaturen von 7, 13 und 18 °C führten die wärmeren Temperaturen zwar zu einer Zunahme der Biomasse, aber es gab keinen Temperaturgradienten im Boden und keine Zunahme der Bodentemperatur während der Vegetationsperiode, was einen deutlichen Unterschied zu den Bedingungen in den HAL-Ms darstellt (Whitfield und Smika, 1971). Der Versuch von Whitfield und Smika (1971) sowie der Agrotherm-Versuch zeigen jedoch, dass Sommerweizen positiv auf wärmere Bodentemperaturen reagieren kann. Dies konnte jedoch mit den HAL-M-System nicht nachgewiesen werden.

Ähnlich wie bei der Sommergerste in KP1 traten unter WARM auf SAND vermehrt Zwiewuchs auf. Eine statistische Auswertung war jedoch aufgrund fehlender Zwietriebe und damit fehlender Werte unter KONT nicht möglich. Die hohe Anzahl an Zwiewuchs, insbesondere unter TROCKEN, könnte jedoch darauf hindeuten, dass die Bewässerung in Kombination mit WARM einen Effekt hatte. In Versuchen von Stallmann et al. (2018) zu Trockenstress bei Weizen traten mehr Zwiewuchs auf, wenn die Bewässerung in größeren Abständen erfolgte und der Boden zwischenzeitlich abtrocknen konnte. Im Vergleich dazu trat weniger Zwiewuchs auf, wenn die gleiche Wassermenge in kürzeren Abständen gegeben wurde (Stallmann et al., 2018). Die unterschiedlichen Wassermengen der Niederschlagsstufen können zu unterschiedlichen Austrocknungsgraden der Bodensubstrate geführt haben und damit zu den beobachteten Ergebnissen.

Der Proteingehalt von Sommerweizen wurde auf LÖSS signifikant von den Niederschlagsstufen beeinflusst. Eine leichte Zunahme unter wärmeren Klimabedingungen, wie sie von Peltonen-Sainio et al. (2011) bei der Auswertung eines Langzeitversuches festgestellt wurde, konnte auf den HAL-Ms vor allem in der mittleren Niederschlagsstufe unter WARM beobachtet werden. Erhöhte Proteingehalte werden auch auf den beheizten Agrotherm-Flächen für verschiedene Sommerweizensorten erwähnt, jedoch ohne weitere Erläuterungen (Reinken und Werning, 1982).

4.2.1.4 Luzerne (*Medicago sativa*)

Im Rahmen der Untersuchungen in KP4 wurde Luzerne als Vertreterin der Futterpflanzen, bei denen die gesamte oberirdische Pflanze als Ernteorgan dient, untersucht. Silomais, der als Futterpflanze in Sachsen-Anhalt eine größere Bedeutung im Anbauumfang hat, konnte aufgrund seiner Wuchshöhe im Versuchsaufbau leider nicht angebaut werden. Unter Berücksichtigung der sich ändernden umweltpolitischen Rahmenbedingungen sowie der Ausweitung des ökologischen Landbaus ist davon auszugehen, dass der Anteil der Luzerne in Zukunft weiter zunehmen wird. Damit erhält sie eine hohe Relevanz für die hier definierten Fragestellungen.

Der erste Schnitt der Luzerne erfolgte zu einem frühen Blühzeitpunkt 110 Tage nach der Aussaat, was einem konventionellen Schnittzeitpunkt entspricht (Tabacco et al., 2002). Er lieferte mit ca. 260 bis 660 g m⁻² deutlich höhere Trockenmasseerträge als der zweite Schnitt mit 40 bis 250 g m⁻² 158 Tage nach der Aussaat. Die Erträge und die Anzahl der Schnitte lagen jedoch auf dem Niveau von Feldversuchen auf ähnlichen Standorten in der Region (Fester et al., 2014). WARM reduzierte den Ertrag auf SAND beim ersten Schnitt signifikant. Im Allgemeinen produziert Luzerne während der Vegetationsperiode weniger Biomasse (Teixeira et al., 2007). Berücksichtigt man jedoch den Rückgang des Bodenwassergehaltes kurz nach dem ersten Schnitt, so könnte der Wassermangel die Ursache für den starken Ertragsrückgang beim zweiten Schnitt sein. Betrachtet man die Gesamtbiomasse der beiden Schnitte, so zeigt sich nur bei SAND eine Tendenz zu geringeren Erträgen unter WARM mit einem um 7 % geringeren Trockenmasseertrag auf LÖSS und einem um 13 % geringeren Trockenmasseertrag auf SAND. Im Agrotherm-Versuch brachte die Luzerne auf den beheizten Freilandflächen im Mittel von drei Anbaujahren 7 % weniger Trockenmasseertrag (Reinken und Werning, 1982). Die Ertragsminderung der Gesamttrockenmasse bei Luzerne auf HAL-M ist nicht signifikant, entsprach aber den Ergebnissen von Reinken und Werning (1982) aus dem Freilandversuch. Weitere Versuche mit verschiedenen Sorten, Standorten und Jahresniederschlägen sind jedoch erforderlich, um einen eindeutigeren Trend zu erhalten.

Im Gegensatz zu den drei bisher untersuchten Kulturen ist die Luzerne in der Lage, eine symbiotische Beziehung mit stickstofffixierenden Rhizobienbakterien einzugehen. Diese Pflanze-Mikroben-Interaktion führt zur Bildung sogenannter Knöllchen, in denen die Rhizobien atmosphärischen Stickstoff in pflanzenverfügbare Form umwandeln (Ferguson et al.,

2019). Ihr volles Potential entfaltet die Luzerne jedoch in Kombination mit einer weiteren Symbiose mit Pilzen der Familie Endogonaceae, die vesikulär-arbuskuläre Formen bilden (De Aguilar et al., 1979). Eine Inokulation von Luzernesaatgut mit Rhizobienstämmen kommerzieller Anbieter wurde im vorliegenden Versuch nicht durchgeführt (Wigley et al., 2015). Die Oberböden stammten von landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Region, bei denen davon ausgegangen werden konnte, dass eine Inokulation nicht notwendig ist (Gandee et al., 1999; Neumann et al., 2011).

Außerdem wäre eine Kontrolle des Inokulationserfolges aufgrund der geringen Versuchsfläche pro Gefäß nicht ohne größere Störungen des Versuches möglich gewesen. Bei der Auswertung der Rhizotron-Scans konnten keine Knöllchenstrukturen nachgewiesen werden. Eine Inokulation mit Kontrolle derselben in weiteren Versuchen mit Leguminosen unter WARM wäre interessant, da in anderen Veröffentlichungen eine signifikante Reduktion der Überlebensrate der Inokula von *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* bei Bodentemperaturen von 30 bis 50 °C festgestellt wurde, was der simulierten Temperatur direkt in Kabelnähe in den HAL-MS entspricht (Evans et al., 1993). Dagegen wurde die Infektion der Wurzeln von *Medicago truncatula* und *Trifolium subterraneum* durch Mykorrhizapilze und Rhizobien durch höhere Bodentemperaturen mit einem Optimum bei ca. 16 °C positiv stimuliert (Smith und Bowen, 1979). Die kritischen Bereiche für die N-Fixierungsleistung hängen stark von der Wirtspflanze und dem Rhizobienstamm ab (Zahran Hamdi Hussein, 1999). Detailliertere Untersuchungen in diesem Bereich mit regional angebauten Leguminosen und Rhizobienstämmen unter WARM wären notwendig, um Aussagen über die Auswirkungen der Wärmeemission von HGÜ-Erdkabeln auf das Leguminosenwachstum treffen zu können.

Der bereits erwähnte Futtermais, der in Sachsen-Anhalt eine größere Anbaufläche einnimmt, brachte im Agrotherm-Versuch auf den beheizten Flächen im dreijährigen Mittel je nach Sorte 15 bis 33 % mehr Trockenmasseertrag. Mehrerträge wurden unter anderem auch bei Rotklee (17 %), Einjährigem Weidelgras (10 %) oder Perserklee (5 %) erzielt. Unter der Voraussetzung, dass die genannten Ertragssteigerungen unter HGÜ-Bedingungen konsistent sind und die Kulturen in den Betrieb passen, wäre eine Anpassung des Futteranbaus auf den von der HGÜ-Leitung betroffenen Flächen eine mögliche Lösung, um Ertragseinbußen bei Luzerne zu vermeiden.

4.2.2 Pflanzenphysiologische Aspekte

Die Auswirkungen von WARM auf die pflanzenphysiologische Entwicklung waren sowohl negativ als auch positiv und traten zum Teil isoliert und standortabhängig auf. Unter dem Einfluss von WARM verringerte sich die Wuchshöhe von Sommergerste in KP1 auf SAND, während die Entwicklungsstadien von Zuckerrüben in KP2 verfrüht und der Chlorophyllgehalt von Sommerweizen in KP3 auf SAND erhöht waren. Außerdem wurde der Feldaufgang durch WARM beeinflusst und es traten Unterschiede im Zwiewuchs auf.

Zeitlicher Verlauf des Feldaufgangs

WARM hatte einen großen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Feldaufgangs der verschiedenen Kulturen. Versuche von Dubetz et al. (1961) mit 19 Kulturen und vier Bodentemperaturen (6, 13, 18, 24 °C) zeigten, dass die meisten Kulturen bei steigenden Temperaturen besser keimten, darunter Luzerne, Gerste, Sommerweizen und Zuckerrüben, die auch in der Fruchtfolge auf HAL-M angebaut wurden (Dubetz et al., 1961). Das Temperaturoptimum für die Keimung von Nutzpflanzen variiert, liegt aber überwiegend zwischen 15 und 25 °C (Singh und Dhaliwal, 1972). Die Reaktion ist nicht linear, sondern eher exponentiell ansteigend bis zu einem Optimum und wurde entsprechend für verschiedene Kulturarten wie z.B. Weizen modelliert (Jame und Cutforth, 2004). Auf den HAL-Ms konnte festgestellt werden, dass die Anzahl gekeimter Sommergerste pro Gefäß in den ersten sieben Tagen unter WARM auf beiden Böden in KP1 signifikant höher war. Nach 12 Tagen konnte jedoch kein statistischer Unterschied mehr festgestellt werden. In KP4 keimte die Sommergerste ebenfalls besser und lag auf LÖSS auch nach 14 Tagen noch über KONT. Diese Beobachtung deckt sich mit anderen Versuchen, bei denen eine künstlich erhöhte Bodentemperatur von ca. 2 °C in 4 cm Tiefe eingesetzt wurden. Dabei wurde ein beschleunigtes Wachstum der Gerste insbesondere in den ersten Tagen beobachtet (Drebenstedt et al., 2020). Die Zuckerrübe in KP2 wurde bereits nach wenigen Tagen auf drei Pflanzen pro Gefäß reduziert, sodass lediglich sieben Tage nach der Aussaat Werte existieren. Unter WARM keimten die Zuckerrüben auf LÖSS bereits zu diesem Zeitpunkt im Vergleich zu KONT, während auf SAND die Anzahl der Pflanzen unter KONT höher war. Das Optimum für den Aufgang von Zuckerrüben wurde von Campbell bei ca. 22 °C ermittelt (Campbell und Enz, 1991). Die Bodentemperatur in den HAL-Ms lag zu Beginn von KP2 über diesem Optimum. Es ist denkbar, dass bereits die Erhöhung um wenige Grad auf SAND im Vergleich zu LÖSS zu diesem negativen Trend geführt haben könnte. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass die Bodentemperatur in den HAL-Ms höher war als im Freiland.

Modellrechnungen zum Klimawandel, die von einer Erhöhung der Saatbetttemperatur um ca. 2 °C ausgehen, weisen generell auf einen positiven Einfluss der Wärme hin (Lamichhane et al., 2019). Dies ist auch beim Auflaufen auf eine unterirdische HGÜ-Trasse zu erwarten. Die Ergebnisse des Sommerweizens in KP3 zeigen deutlich standortspezifische Unterschiede im Keimverhalten. Dies stimmt mit anderen Versuchen überein, in denen die Bodenart einen wesentlichen Einfluss auf die Keimung von Weizen hatte (Jessop und Stewart, 1983). Auf den HAL-MS konnte unter WARM auf SAND (13 und 16 Tage nach der Aussaat) eine signifikant geringere Anzahl gekeimter Sommerweizen im Vergleich zu KONT beobachtet werden. Auf LÖSS hingegen konnte nur am Tag 13 ein positiver Effekt von WARM festgestellt werden.

Im Gegensatz zu Sommergerste in KP1 und Zuckerrüben in KP2 zeigte sich auf LÖSS bei Sommerweizen in KP3 ein signifikanter Einfluss der Niederschlagsstufen. Obwohl davon auszugehen ist, dass die verschiedenen Niederschlagsstufen zumindest in den obersten 10 cm zu gleichen Wassergehalten führen sollten, zeigten sich in 30 cm Tiefe Unterschiede von wenigen Prozentpunkten. Aufgrund der kurzen Zeitspanne zwischen KP2 und KP3 erfolgten die einzelnen Wassergaben der Niederschlagsstufen in größeren Mengen. Die letzte Beregnung erfolgte neun Tage vor der Aussaat des Sommerweizens und unterschied sich mit 4,5, 6,1 und 8,5 Liter deutlich zwischen den Niederschlagsstufen. Der Zeitpunkt der Beregnung war also wahrscheinlich für den signifikanten Unterschied ausschlaggebend und nicht die Niederschlagsmenge an sich, da der OB bei einer Gabe von 4,5 l schneller austrocknet als bei 8,5 l. Generell ist wie bei anderen Kulturen davon auszugehen, dass unter Feldbedingungen und wärmeren Temperaturen positive Effekte zu erwarten sind (Buriro et al., 2011; Dubetz et al., 1961).

WARM beeinflusste den Feldaufgang der Luzerne in KP4 durchweg positiv, auch wenn keine statistisch signifikanten Unterschiede ermittelt werden konnten. Auch wenn die Bodentemperatur in den HAL-MS bereits im optimalen Bereich lag (Ahmed et al., 2019), führte die erhöhte Bodentemperatur unter WARM, wie auch aus anderen Versuchen bekannt, zu besseren Keimraten (Butler et al., 2014; Dubetz et al., 1961).

Wuchshöhe

Die auf den HAL-MS beobachtete reduzierte Wuchshöhe der Sommergerste in KP1 auf SAND konnte in KP4 nicht erneut beobachtet werden. Bei der Auswertung eines langjährigen Freilandversuchs in Finnland wurde jedoch auch bei verschiedenen Sommergetreidearten wärmebedingt einer Reduktion der Wuchshöhe beobachtet, die jedoch auf höhere

Lufttemperaturen zurückzuführen war (Peltonen-Sainio et al., 2011). Im Gegensatz dazu konnte in einem Experiment an der Universität Hohenheim bei einer künstlichen Bodenerwärmung von 2,5 °C in 4 cm Tiefe ein signifikant höheres Gerstenwachstum festgestellt werden (Drebenstedt et al., 2020). Obwohl sich die Wärmequellen im Vergleich zu den HAL-Ms stark unterschieden, zeigen die Feldversuche in Finnland und Hohenheim, dass höhere Temperaturen die Wuchshöhe von Gerste beeinflussen können.

Entwicklungsstadien

Die Zuckerrüben auf LÖSS entwickelten sich unter WARM schneller als unter KONT, was sich auch auf den Ertrag ausgewirkt haben könnte. Stibbe und Marlander (2002) konnten in Feldversuchen mit Zuckerrüben zeigen, dass Pflanzen, die früher keimten, diesen Entwicklungsvorsprung während der Vegetationsperiode beibehielten und mehr Biomasse produzierten. Dies deckt sich mit dem beobachteten früheren Keimen unter WARM und dem damit verbundenen Entwicklungsvorsprung und den höheren Erträgen. Ähnliche Entwicklungsvorsprünge wurden jedoch bei keiner anderen Kultur auf HAL-Ms beobachtet.

Chlorophyllgehalt

Wie weiterhin gezeigt, war der Chlorophyllgehalt des Sommerweizens auf SAND ähnlich wie in einer anderen Veröffentlichung unter Wärmeeinfluss anfänglich etwas höher als in der Kontrolle (Barutçular et al., 2016). In dem bereits erwähnten Versuch von Drebenstedt et al. (2020) führte die künstliche Bodenerwärmung ebenfalls nur 70 und 77 Tage nach der Aussaat zu höheren SPAD-Werten, in dem Fall jedoch bei Gerste. In den anderen Kulturphasen gab es keine Auffälligkeiten des Chlorophyllgehalts.

4.2.3 Wurzelwachstum

Das Wurzelwachstum in den HAL-Ms wurde durch WARM nur in der ersten Kulturphase signifikant negativ beeinflusst. Der erneute Anbau der gleichen Sommergerstensorte in KP4 konnte dieses Ergebnis nicht bestätigen. Somit könnten neben der Wärmeemission auch andere Faktoren eine Rolle gespielt haben, die das Wurzelwachstum negativ beeinflussten.

Die Bodenstruktur ist ein wichtiger Aspekt für das Wurzelwachstum und die Durchdringung des Bodens durch die Wurzeln (Bronick und Lal, 2005). Durch die künstliche Auffüllung und Verdichtung des Bodens in den HAL-Ms fehlten zunächst die natürlich vorkommenden biogenen Makroporen. Die Sommergerste in KP1 fand durch das Fehlen dieser Poren

erschwerte Wachstumsbedingungen vor, die in Kombination mit der Wärmeemission zu einer geringeren Wurzelintensität und Ertragsminderung geführt haben könnten. In Gefäßversuchen konnte z.B. beobachtet werden, dass sich Gerste besser entwickelt, wenn durch Vorfrüchte wie Luzerne oder Italienisches Weidelgras (*Lolium multiflorum*) ein Netz von Makroporen geschaffen wird (Stirzaker et al., 1996). Stone et al. (1987) postulierten in ihrer Arbeit mit einem Freilandversuch eine bessere Durchwurzelung von Mais mit der Vorfrucht Luzerne, was vermutlich auf die entstandenen Makroporen zurückzuführen war. Diese Ergebnisse konnten in Lysimeterversuchen bestätigt werden, in denen 41 % der Maiswurzeln die Makroporen der Vorfrucht Luzerne rekolonisiert hatten (Rasse und Smucker, 1998). Die Rekolonisierung von Wurzelkanälen bzw. das Wachstum neuer Wurzeln entlang sich zurückbildender Wurzeln konnte auch in den weiteren Kulturphasen des HAL-M-Systems auf den Scans des Rhizotrons beobachtet werden, wurde aber nicht erfasst bzw. ausgewertet. Die Pflanzen in den Kulturphasen 2 bis 4 hatten also durch die geschaffenen biogenen Makroporen der jeweiligen Vorfrucht natürlichere Bedingungen als die Sommergerste in KP1. Die Ergebnisse zum reduzierten Wurzelwachstum in KP1 sollten daher nicht überinterpretiert werden.

Die drei Niederschlagsstufen im HAL-M-System zeigten nur vereinzelt einen signifikanten Einfluss auf das Wurzelwachstum. Es zeigte sich, dass die Wurzelintensität unter TROCKEN im Vergleich zu MITTEL oder FEUCHT reduziert war. Dies steht jedoch im Widerspruch zu anderen Versuchen, in denen gezeigt wurde, dass Trockenstress zu einem verstärkten Wurzelwachstum führen kann. Boudiar et al. (2020) konnten für verschiedene Gersensorten zeigen, dass diese unter Trockenstress tendenziell mehr Wurzelbiomasse produzieren. Auch in Versuchen mit verschiedenen Zuckerrübensorten führte Trockenstress zu einer Veränderung des Wurzelwachstums, in diesem Fall zu einer signifikanten Zunahme der Wurzellänge (Shehata et al., 2000). Außerdem ist das Wurzelwachstum stark vom verwendeten Genotyp abhängig. Beispielsweise zeigen trockenstressresistente Weizensorten ein verbessertes Wurzelwachstum in die Tiefe (Palta und Turner, 2019). Allgemeine Aussagen über die Wechselwirkungen zwischen WARM und NIEDERSCHLAG sowie eine genauere Beurteilung des Einflusses von NIEDERSCHLAG sind ohne Berücksichtigung verschiedenen Genotypen schwer zu beurteilen.

In der Züchtungsforschung besteht zudem ein Interesse an tiefwurzelnden Nutzpflanzen, um im Rahmen der Nachhaltigkeitsziele hitze- und trockenstressresistentere Pflanzen zu züchten (Thorup-Kristensen et al., 2020). Daher könnten in weiteren Versuchen solche Genotypen getestet werden, da diese über einem Erdkabel besonders beeinflusst werden könnten.

Zum einen durch die physikalische Barriere des Kabels und zum anderen durch das tiefere Eindringen der Wurzeln in den durch die Wärmeabstrahlung beeinflussten Bodenbereich. Vor diesem Hintergrund sollten neue, klimaangepasste Sorten bei der Beurteilung möglicher Beeinträchtigungen von Kulturpflanzen durch eine HGÜ-Erdkabeltrasse berücksichtigt werden.

Neben dem Wurzelwachstum könnte auch die Wasseraufnahme der Wurzeln durch die Wärmeemission beeinflusst worden sein. Mögliche Änderungen der diffusiven und hydraulischen Durchlässigkeit der Wurzeln in Abhängigkeit von Temperatur und Kulturart wurden schon früh diskutiert (Clarkson, 1976; Kuiper, 1964). Versuche mit Reispflanzen zeigten beispielsweise eine verbesserte Wasseraufnahme bei höheren Temperaturen (Murai-Hatano et al., 2008). Übertragen auf die Versuchsergebnisse von HAL-M könnte dies eine mögliche Erklärung dafür sein, dass die Wurzelintensität in KP4 bei Luzerne keine Reaktion auf WARM zeigte, der Ertrag aber dennoch beeinflusst wurde.

4.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse

4.3.1 Gefäßversuch

Der Anbau von Pflanzen im Gewächshaus ist durch verschiedene abiotische Faktoren gekennzeichnet, die sich von den Bedingungen im Freiland unterscheiden. Diese wurden von Poorter et al. (2016) ausführlich diskutiert. So unterschieden sich beispielsweise das photosynthetisch aktive Licht und die UV-B-Strahlung in den Kulturphasen auf den HAL-Ms von den Freilandbedingungen. Außerdem gab es im Gewächshaus keine größeren Luftströmungen oder Turbulenzen, die das Pflanzenwachstum beeinflussten (Gardiner et al., 2016). Die Raumtemperatur wurde kontrolliert, um den Feldbedingungen während der verschiedenen BBCH-Phasen zu entsprechen, konnte jedoch bei bestimmten Wetterbedingungen, wie wolkenlosem Sonnenschein und hohen Windgeschwindigkeiten, nicht erreicht werden, da die Lüftungen aus Sicherheitsgründen geschlossen wurden, um Schäden am Gewächshaus zu vermeiden. Dies führte im Spätsommer 2020 in KP2 zu Temperaturspitzen von teilweise über 40 °C. Derartige Temperaturspitzen wurden im Freiland in Sachsen-Anhalt bisher nicht beobachtet (DWD Climate Data Center (CDC), 2019b). Es ist nicht auszuschließen, dass diese Temperaturspitzen zu einer zusätzlichen thermischen Belastung der Kulturpflanzen geführt und damit die Ergebnisse in gewissem Maße beeinflusst haben. Zur Klärung dieser Problematik könnten weitere Versuche in klimatisierten Gewächshäusern oder besser noch unter Freilandbedingungen durchgeführt werden.

Ein weiterer Faktor, der das Pflanzenwachstum im Gewächshaus beeinflusst, ist die Wurzelumgebung. Die Größe des Versuchsgefäßes beeinflusst die Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanze sowie die Bodenbedingungen und die Bodentemperatur. Die Lagerungsdichte des Bodens spielt eine wichtige Rolle für das Wurzelwachstum und die Wasserversorgung. In Gefäßversuchen wird dies jedoch nicht immer ausreichend berücksichtigt. Porter et al. (2012) konnten in ihren Versuchen einen Zusammenhang zwischen der Pflanzenbiomasse und der Gefäßgröße feststellen. Es zeigte sich, dass das Pflanzenwachstum negativ beeinflusst wurde, wenn die Gefäßgröße für die Versuche zu klein gewählt wurde (Poorter et al., 2012). Dies kann zu unerwünschten Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse führen. Diese Problematik wurde in den HAL-M durch die Wahl eines ausreichend großen Bodenvolumens und die Einstellung freilandtypischer Lagerungsdichten angemessen berücksichtigt.

In Bezug auf den Anbau und die Übertragbarkeit zeigte die Zuckerrübe in KP2 mit 17 Pflanzen pro m² eine höhere Pflanzendichte als unter Freilandbedingungen üblich (Ebmeyer und Hoffmann, 2021). Dies war notwendig, da mindestens drei biologische Replikate pro HAL-M erforderlich waren, um die biologische Variabilität angemessen zu berücksichtigen. Mehr Pflanzen auf weniger Boden bedeutete jedoch einen höheren Wasserverbrauch pro m² und damit weniger Wasser pro Einzelpflanze. Dies führte gegen Ende von KP2 zu einem kurzfristigen Trockenstress. Zudem ist die Zuckerrübe für ihren hohen Wasserbedarf bekannt, was die Situation zusätzlich erschwerte. Um die Auswirkungen von WARM gezielter untersuchen zu können, wäre es empfehlenswert, in weiteren Versuchen die Wasserversorgung der Zuckerrübe im optimalen Bereich sicherzustellen. Auch wenn die Niederschläge unter Feldbedingungen ebenso ungünstig sein können, sollte eine ausreichende Wassergabe bei der Versuchsplanung berücksichtigt werden. Die Aussaatstärken der anderen Kulturen auf den HAL-Ms lagen dagegen auf einem praxisüblichen Niveau.

4.3.2 Boden

Die Konstruktion der Gefäße und der damit verbundene künstliche Einbau der Bodensubstrate führten zunächst zu einer künstlichen Bodenstruktur. Die zu Beginn des Versuches eingebrachten Regenwürmer stellten eine Sofortmaßnahme dar, um wieder naturnähere Verhältnisse herzustellen. Darüber hinaus führt die Fruchtfolge durch das Wurzelwachstum zu einer Veränderung der Bodenstruktur, wodurch sich im Laufe der Zeit eine naturnähere Bodenstruktur einstellte. Dieser Prozess hat keinen negativen Einfluss auf die Aussagekraft der

Versuchsergebnisse, da auch beim Bau einer Kabeltrasse zunächst ein künstliches Bodengefüge vorherrscht, das sich in den Folgejahren wieder normalisiert.

Die Bodentemperatur der 12 Kontroll-HAL-Ms wurde im Wesentlichen durch die Umgebungstemperatur im Gewächshaus beeinflusst, wobei die mittlere Umgebungstemperatur ausschlaggebend war. Einzelne Temperaturspitzen im Gewächshaus während des Tages hatten keinen Einfluss und wurden durch das sehr große Bodenvolumen abgepuffert. Mit steigender mittlerer Umgebungstemperatur stieg jedoch auch die Bodentemperatur in den Gefäßen an. Verglichen mit der mittleren Bodentemperatur unter Feldbedingungen in 100 cm Tiefe für drei Standorte in Sachsen-Anhalt lagen die Bodentemperaturen in den Kontroll-HAL-Ms im Schnitt zwischen 5 und 10 °C höher als unter Feldbedingungen (DWD Climate Data Center (CDC), 2019a).

Der in natürlichen Böden auftretende vertikale Temperaturgradient zwischen der Bodenoberfläche und tieferen Bodenschichten kann das Wurzelwachstum beeinflussen (Kaspar und Bland, 1992), war jedoch in den HAL-M aufgrund der gleichmäßigen Umgebungstemperatur nicht realisierbar. Für Gerste ist bekannt, dass ein Bodentemperaturgradient von 20 °C an der Bodenoberkante zu 10 °C in tieferen Schichten das Spross- und Wurzelwachstum signifikant erhöht (Füllner et al., 2012). Die gleichmäßige Bodentemperatur in den Kontrollgefäßen war daher möglicherweise ungünstig für das Wurzelwachstum. Der umgekehrte Temperaturgradient durch die Wärmeemission könnte auch erklären, warum gerade die Sommergerste so stark auf HAL-M reagierte. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte könnte der Unterschied zwischen WARM und KONT unter Feldbedingungen größer sein. Die Simulation eines natürlichen Bodentemperaturgradienten in den HAL-Ms wäre eine Herausforderung, würde aber den Versuchsaufbau und damit die Ergebnisse weiter verbessern.

Der unter Feldbedingungen als thermischer Isolator fungierende Boden wurde durch die Verwendung eines isolierenden Materials an der Außenseite der Gefäße (Armaflex XG 32) berücksichtigt. Die Wärmeleitfähigkeit von Böden ist jedoch ein komplexes Phänomen, das von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Dazu gehören der Wassergehalt, die Trockenrohdichte, der Mineralgehalt und die Porosität (Dong et al., 2015; Zhang und Wang, 2017). Die spezifischen Werte der thermischen Eigenschaften, wie Wärmewiderstand und Wärmeleitfähigkeit, wurden in den HAL-M nicht gemessen und daher nur in einem grundlegenden Umfang berücksichtigt. Die Isolierung mit Armaflex diente in erster Linie der Vermeidung von direkter Sonneneinstrahlung, die zu einer ungleichmäßigen Erwärmung der Behälter geführt hätte. Eine nachträgliche Messung der thermischen Eigenschaften könnte die Grundlage für eine Modellierung der Wärmeausbreitung im HAL-M schaffen. Dies

würde es ermöglichen, bei weiteren Versuchen den Schwerpunkt von der Pflanze auf die Bodenverhältnisse zu verlagern.

Hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes in den Gefäßen wurde vor Versuchsbeginn über mehrere Tage so lange bewässert, bis mit den eingebauten FDR-Messsonden keine Veränderung des Bodenwassergehaltes mehr festgestellt werden konnte. Vergleicht man die theoretischen Feldkapazitätswerte aus der Literatur und den Labormessungen mit den gemessenen Werten in den HAL-Ms zu Versuchsbeginn, so fällt auf, dass die FK-Werte in den HAL-Ms unter den im Labor gemessenen Werten liegen. Dies kann zum einen daran liegen, dass die installierten FDR-Messsonden nicht für die verwendeten Böden kalibriert waren. Zum anderen kann die Bestimmung der FK-Werte im Labor (Assouline und Or, 2014) oder noch ungeklärten Faktoren dazu geführt haben. Da die Dynamik des Wasserhaushaltes im Vordergrund stand, spielte dieser Aspekt keine Rolle. Wichtiger war, dass im Verlauf der Fruchtfolge die Ausgangswerte vor Versuchsbeginn insbesondere im Unterboden von LÖSS nicht wieder erreicht wurden. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Niederschlagsmengen in den drei simulierten Jahren gleichblieben und somit drei aufeinander folgende Trockenjahre simuliert wurden, was zu einem zusätzlichen Wasserdefizit in KP2 und KP3 im Unterboden von LÖSS führte. Verglichen mit den regionalen Niederschlägen der letzten Jahre ist dies keine Seltenheit und spiegelt die prognostizierten klimatischen Herausforderungen für die Zukunft wider (Schmitt et al., 2022). Insgesamt hat dies einen gewissen Einfluss auf die Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit der Ergebnisse aus dem HAL-M-Versuchsaufbau. Es stellt sich die Frage, ob es sinnvoller gewesen wäre, die HAL-M vor Beginn jeder neuen Kulturphase wieder auf die Feldkapazität bzw. die Ausgangswerte aufzufüllen oder als Worst-Case-Szenario mehrere aufeinander folgende Trockenjahre zu simulieren.

In der vierten Kulturphase wurden die Niederschlagsstufen vereinheitlicht, weshalb zu Beginn alle Gefäße wieder auf die Ausgangswerte vor KP1 aufgefüllt wurden. Es ist jedoch zu beobachten, dass die Werte vor KP1 nicht ganz erreicht wurden. Dies könnte auf die Ergebnisse der stichprobenartigen Beprobung der beiden offenen Gefäße zurückzuführen sein, bei denen im Versuchsverlauf abnehmende FK-Werte festgestellt wurden.

4.5 Mögliche Wechselwirkungen zwischen Wärmeemission, Wurzelwachstum und Bodenwassergehalt

Das in Abbildung 32 dargestellte Fließschema veranschaulicht potenzielle Zusammenhänge zwischen Bodenwassergehalten, Wurzelwachstum, Erträgen und Fruchtfolge. Das Wurzelwachstum ist eine wesentliche Komponente des Pflanzenwachstums und des Ertrags (Robinson, 2018). Versuche mit Gerste haben gezeigt, dass ein größeres Wurzelsystem einen positiven Einfluss auf den Ertrag hat (Svačina et al., 2013). Das Wurzelwachstum kann jedoch durch verschiedene Bedingungen beeinflusst werden. Eine dieser Bedingungen ist die Temperatur, deren Einfluss bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts bekannt ist (Wortmann, 1885). Eine Erhöhung der Bodentemperatur, wie sie im vorliegenden Experiment durch die simulierte Wärmeemission erzeugt wurde, kann das Wurzelwachstum auf unterschiedliche Weise und in unterschiedlichem Ausmaß beeinflussen (Muthert und Izzo, 2020; van Zanten et al., 2021). Die geringere Wurzelintensität der beheizten Sommergerste in KP1 könnte daher auf einen negativen Einfluss der Wärmeemission zurückgeführt werden. In der ersten Kulturphase wurde das Bodenwasser in den beheizten Gefäßen nicht ausgeschöpft und stand der Zuckerrübe als Folgekultur zu Beginn der KP2 unter WARM zusätzlich zur Verfügung (1). Die Zuckerrübe konnte durch ihr von der Wärme unbeeinflusstes Wurzelwachstum dieses zusätzlich verfügbare Wasser nutzen (2) und standortabhängig in mehr Ertrag umsetzen (3). Eine weitere Rolle für den Ertragsvorteil könnte aber auch das frühere Auflaufen und der damit verbundene Wachstumsvorsprung unter WARM gespielt haben. Das Wurzelwachstum des Sommerweizens wurde ähnlich wie bei der Sommergerste durch die

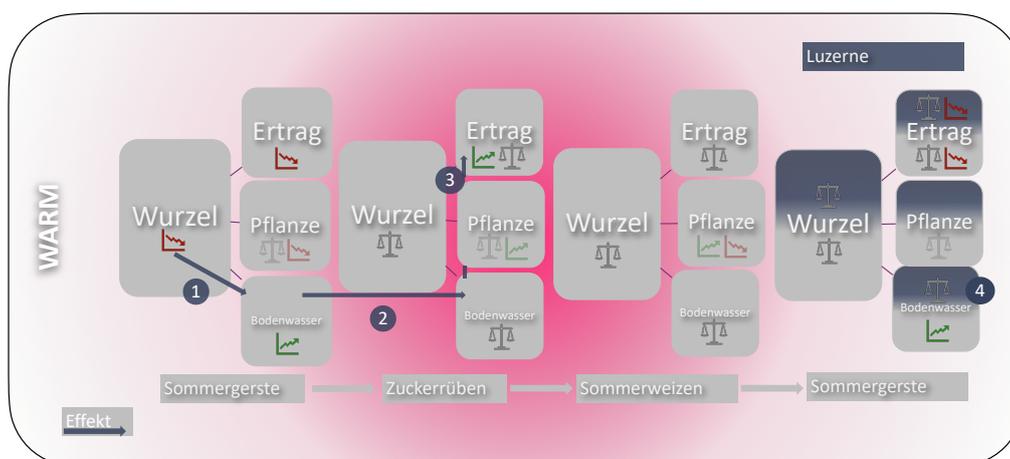


Abbildung 32: Fließschema zu den möglichen Wechselwirkungen

(1) geringerer Bodenwassergehalt zu Beginn von KP2 unter WARM, (2) Angleichen der Bodenwassergehalte zwischen WARM und KONT, (3) Standortabhängiger Ertragsvorteil der Zuckerrübe unter WARM, (4) Sommergerste zeigt ähnlich zu KP1 geringere Bodenwassergehalte unter WARM

Wärmeemission beeinflusst. Der Einfluss war jedoch geringer und nur tendenziell. Die Erträge wurden nicht signifikant beeinflusst. Es ist bekannt, dass die Wurzelarchitektur und die Hydraulik die Wasseraufnahmekapazität von Pflanzen beeinflussen können (Maurel und Nacry, 2020). WARM könnte diese Eigenschaften bei Sommergerste in KP1 verändert haben, jedoch nicht bei Sommerweizen in KP3, obwohl die Wurzelintensität auch im gewissen Maß reduziert war. Auch der wiederholte Anbau von Sommergerste in der vierten Kulturphase zeigte keinen signifikanten Einfluss von WARM auf das Wurzelwachstum. Bei Betrachtung der Bodenwassergehalte zeigte sich jedoch ein ähnliches Bild wie in der ersten Kulturphase (4). Dies kann ein Hinweis auf ein vermindertes Wurzelwachstum sein, das mit der Mini-Rhizotron-Methode nicht erfasst wurde. Das Wurzelwachstum der Luzerne verlief ebenfalls ohne Auffälligkeiten. Im Gegensatz zur Sommergerste entzog die Luzerne, ähnlich wie die Zuckerrübe in K2, dem Boden unabhängig vom Wärmeeinfluss gleichmäßig Wasser.

4.6 Untersuchungsbedarf

Im Folgenden werden abschließend Aspekte aufgeführt, die durch eine Wärmeemission in den Boden beeinflusst werden könnten, aber in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wurden. Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und dient lediglich als Anregung, in welchen Bereichen weiterer Forschungsbedarf besteht und wo die Auswirkungen einer unterirdischen HGÜ-Trasse noch ungeklärt sind.

4.6.1 Bodenbürtige Pathogene

Die Bodentemperatur kann als wichtigster Faktor für die Entwicklung bodenbürtiger Pathogene angesehen werden, weshalb Manici et al. (2014) den Einfluss steigender Bodentemperaturen im Kontext des Klimawandels auf die Entwicklung von sechs verschiedenen bodenbürtigen Pathogenen modellierten. Sie fanden heraus, dass wärmere Bodentemperaturen in den Wintermonaten wahrscheinlich zu einem verstärkten Auftreten von drei der untersuchten Pathogene führen werden. Bei Sommerkulturen ist dieser Einfluss vor allem in den kühleren Regionen Mitteleuropas zu erwarten (Manici et al., 2014).

Bodenbürtige Pathogene aus den Subtropen wie der Pilz *Macrophomina phaseolina* könnten besonders von höheren Bodentemperaturen profitieren, auch wenn Isolate von *M. phaseolina* aus verschiedenen Regionen unterschiedlich auf steigende Bodentemperaturen reagierten (Manici et al., 2014; Šárová et al., 2003).

Lukas et al. (2018) stellten in ihrem Freilandversuch in Mais bei erhöhten Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe ebenfalls fest, dass der Einfluss der Bodentemperatur unterschiedliche Auswirkungen auf die Pathogene haben kann. Die DNA-Konzentration von *Fusarium graminearum* war in den um 1,6 °C und 3,2 °C erwärmten Parzellen signifikant erhöht, während sie bei *Fusarium culmorum* tendenziell niedriger war (Lukas et al., 2018).

Auch wenn in den bisher genannten Versuchen nur die Erwärmung der obersten Bodenschichten untersucht wurde, kann eine Wärmeimmission in tiefere Schichten auch die Temperatur in den obersten Bodenschichten beeinflussen, und vergleichbare Ergebnisse sind daher auf den Trassen zu erwarten.

Im Rahmen des Großversuchs „Agrotherm“ zur Nutzung der Abwärme von Kernkraftwerken in den 70er Jahren konnte ein erhöhtes Auftreten von Mehltau bei Winterweizen bei erhöhten Bodentemperaturen festgestellt werden. Der Befall von Winterweizen mit dem Rhizoctonia-Pilz bei kontrollierten Bodentemperaturen mit einem Tag-Nacht-Zyklus von 27 °C / 16 °C und 19 °C / 6 °C im Gewächshaus zeigte, dass *Rhizoctonia oryzae* bei höheren Temperaturen virulenter war, während *Rhizoctonia solani* bei niedrigeren Temperaturen mehr Schäden verursachte (Smiley und Uddin, 1993).

Weiterhin konnte im Agrotherm-Versuch auch gezeigt werden, dass die Anzahl der gebildeten Generationen des Nematoden *Heterodera schachtii* von zwei auf drei anstieg (Reinken und Werning, 1982). Obwohl der Befall mit *H. schachtii* beispielsweise heutzutage durch Fruchtfolagemanagement, resistente Zwischenfrüchte oder nematodenresistente Zuckerrübensorten kontrolliert werden kann (Eberlein et al., 2020), demonstrieren die genannten Beispiele die potenziellen Auswirkungen einer HGÜ-Trasse auf das Auftreten von bodenbürtigen Pathogenen. Die divergierenden Reaktionen der verschiedenen Pathogenen selbst innerhalb einer Art verdeutlichen die Notwendigkeit, spezifische Versuche in diesem Bereich durchzuführen.

4.6.2 Nährstoffe, Aminosäuren und Enzyme

Die Bodentemperatur beeinflusst die Nährstoffaufnahme auf zweierlei Weise. Zum einen erfolgt eine direkte Beeinflussung durch eine Veränderung des Wurzelwachstums, wie sie in den HAL-M insbesondere für Sommergerste in KP1 festgestellt wurde. Zum anderen erfolgt eine indirekte Beeinflussung durch veränderte Nährstoffmineralisation, Mineralverwitterung oder Nährstofftransportprozesse im Boden (Pregitzer und King, 2005).

Im Agrotherm-Versuch konnte gezeigt werden, dass die Wärmeemission an den Boden die Stickstoffentzüge bei Kartoffeln, Zuckerrüben und Körnermais erhöht (Reinken und Werning, 1982). Andere Experimente haben gezeigt, dass die Stickstoffmineralisierung im Boden um das Fünffache zunimmt, wenn die Temperatur von 4 °C auf 26 °C ansteigt (Cassman und Munns, 1980; Sullivan et al., 2020).

Phosphatase-Enzyme, die im Boden weit verbreitet sind, spielen eine wichtige Rolle bei der Phosphorversorgung von Pflanzen (Zhu et al., 2018). Die Bodentemperatur hat einen signifikanten Einfluss auf die Phosphataseaktivität und damit auf die Nährstoffverfügbarkeit (Dalai, 1977). Sun et al. (2018) konnten zeigen, dass eine Erhöhung der Bodentemperatur von 10 auf 25 °C zu einem Anstieg der Aktivität der alkalischen Phosphomonoesterase führt. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass höhere Bodentemperaturen die Aktivität und Zusammensetzung der Gemeinschaft der phosphorumwandelnden Mikroorganismen im Boden verändert. Eine Änderung der Bodentemperatur kann auch Mikronährstoffe wie Zink, Bor, Kupfer und Mangan beeinflussen (Neenu und Ramesh, 2020). Die Aufnahme von Cadmium und Zink aus dem Boden wurde bei Salatpflanzen (*Lactuca sativa L. cv. Appia*) durch höhere Bodentemperaturen (10, 20 oder 30 °C) gefördert, während gleichzeitig die Bioverfügbarkeit von Cadmium und Zink abnahm (Cornu et al., 2016). Obwohl die Bioverfügbarkeit von Zink mit steigender Bodentemperatur abnimmt, konnten auch in Maispflanzen bei einer Erhöhung der Bodentemperatur von 22,4 auf 28,8 °C erhöhte Zinkgehalte festgestellt werden. Högy et al. (2013) stellten in ihrem Freilandversuch bei einer Erhöhung der Bodentemperatur um 2,5 °C in 4 cm Tiefe keine signifikanten Unterschiede in der Nährstoffkonzentration von Gerstenkörnern hinsichtlich der Makro- und Mikronährstoffgehalte fest. Bei einigen Aminosäuren wie Glycin, Alanin, Valin, Arginin und Tryptophan wurde jedoch ein signifikanter Anstieg festgestellt. Makro- und Mikronährstoffe sowie Aminosäuren wurden im Erntegut der Kulturpflanzen auf den HAL-M nicht untersucht.

Hinsichtlich der Enzymaktivität im Boden konnte im Rahmen des Agrotherm-Versuches festgestellt werden, dass der Celluloseabbau unter Wärmeeinwirkung bei konstanten Bodenfeuchtegehalten eine geringere Intensität aufwies (Reinken und Werning, 1982). Bei mäßiger Erhöhung der Bodentemperatur stellten Donnelly et al. einen signifikanten Anstieg des Zelluloseabbaus in Waldböden fest (Donnelly et al., 1990). Auch wenn der Abbau von verschiedenen Faktoren bestimmt wird, kann aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit davon ausgegangen werden, dass sich der Zelluloseabbau in Abhängigkeit von dem durch die HGÜ-Leitung verursachten Temperaturgradienten im Boden verändert.

Die Temperatur ist einer der wichtigsten Faktoren für die Enzymaktivität. Die verschiedenen Enzyme im Boden reagieren unterschiedlich auf Temperaturänderungen, was zu unterschiedlichen Abbauraten organischer Substanzen führen kann. Dadurch kann sich die Bodenatmung bei Temperaturerhöhung verändern, ohne dass sich der Pool an Bodenenzymen verändert (Wallenstein et al., 2011). So sind auch sehr langfristige Auswirkungen von Wärmeemissionen auf die Bodendynamik denkbar, die den Humusauf- oder -abbau beeinflussen können, was wiederum Auswirkungen auf die Erträge haben könnte.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte könnten in weiteren Experimenten Untersuchungen zu Nährstoffkreisläufen und enzymatischen sowie mikrobiellen Aktivitäten wertvolle Hinweise auf die Auswirkungen von Wärmeemissionen auf die Nährstoffverfügbarkeit im Boden und damit auf das Pflanzenwachstum liefern.

4.6.3 Makrofauna des Bodens

Die in den HAL-M ausgebrachten Regenwürmer der Art *Lumbricus terrestris* dienten in erster Linie dazu, die durch den Einbau sehr künstlich geschaffenen Bodenstrukturen durch die Regenwurmaktivität an natürlichere Bodenverhältnisse anzugleichen. Die Regenwurmaktivität konnte während des Versuchszeitraumes durch Regenwurmlosungen und vereinzelte Beobachtungen von Regenwurmgingen auf den Wurzelscanbildern beobachtet werden. Zu Beginn von KP1 wurden drei Regenwürmer der Art *Lumbricus terrestris* pro Versuchsgefäß ausgebracht. In den ersten Tagen kam es zu Verlusten, da Regenwürmer aus den Gefäßen fielen. Eine genaue Zuordnung, aus welchem Gefäß die Regenwürmer herausgefallen sind, war nicht möglich, so dass die genaue Anzahl pro Gefäß nicht mehr bekannt war. Am Ende von KP4 konnte keine Regenwurmaktivität mehr in den Gefäßen festgestellt werden. Die Regenwurmaktivität steht in direktem Zusammenhang mit der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur. Dabei fördern höhere Temperaturen in der Regel die Regenwurmaktivität (Kretzschmar, 1982; Perreault und Whalen, 2006). Die optimale Temperatur für Regenwürmer liegt je nach Art zwischen 12 und 25 °C, die letale Temperatur für den im Versuch verwendeten *L. terrestris* liegt bei 26 °C (Edwards und Arancon, 2022). Es ist daher davon auszugehen, dass die meisten der verbliebenen Regenwürmer zwischen KP1 und KP2 aufgrund der teilweise hohen Bodentemperaturen in den HAL-Ms abgestorben sind. Unter Feldbedingungen haben Regenwürmer jedoch die Möglichkeit, vor den hohen Temperaturen in der Nähe eines HGÜ-Kabels in besser temperierte Bereiche des Bodens zu wandern.

Weitere Organismen der Makrofauna wie zum Beispiel Wenigborster (Enchyträen), Milben (Acari) oder Springschwänze (Collembola) können relativ einfach über die Fraßaktivität mit Hilfe des Bait-lamina erfasst werden (Hamel et al., 2007; Kratz, 1998). In Versuchen an der Universität Uppsala in Schweden konnte gezeigt werden, dass die Fraßaktivität der Makrofauna in Abhängigkeit von der Bodentemperatur zunimmt (Gongalsky et al., 2004).

Untersuchungen zum Klimawandel in Bad Lauchstädt an der Global Change Experimental Facility (GCEF) deuten darauf hin, dass höhere Bodentemperaturen von 0,5 °C in 15 cm Tiefe zu einer Verringerung der Körpergröße und Biomasse von Mikroarthropoden führen können (Yin et al., 2020). Da in diesem Versuch aber auch die Niederschlagsmuster leicht verändert wurden, ist eine eindeutige Zuordnung der Ergebnisse allein zur Bodenerwärmung nicht möglich. Dass höhere Temperaturen wahrscheinlich zu einer geringeren Körpergröße führen, wurde jedoch auch bereits in anderen Untersuchungen beobachtet (Atkinson, 1994; Gardner et al., 2011).

In einer Studie über extreme Hitzeereignisse in China mit Monatsmittelwerten von 25,5 bis 30,6 °C wurde ein negativer Einfluss auf die Diversität der Makrofauna festgestellt (Gao et al., 2023). Da sich die meisten Bodenorganismen in dieser Untersuchung in den oberen 10 cm befanden, bleibt für die Übertragbarkeit auf eine HGÜ-Kabeltrasse die Frage offen, ob die Auswirkungen der Wärmeemission oder die klimatischen Bedingungen einen größeren Einfluss haben könnten.

5. Schlussfolgerung

Die eingangs formulierten Ausgangsfragen zur Entwicklung der Versuchsgefäße, zu den Auswirkungen der Wärmermission im Boden sowie auf die Kulturpflanzen der im Trassenkorridor angebauten landwirtschaftlichen Hauptfruchtarten können unter den vorliegenden experimentellen Randbedingungen zusammenfassend wie folgt beantwortet werden:

i) Entwicklung der HAL-M-Versuchsgefäße

Die erfolgreiche Entwicklung der HAL-Ms ermöglichte die Kultivierung einer viergliedrigen Fruchtfolge unter kontrollierten Gewächshausbedingungen innerhalb von zweieinhalb Jahren. Es konnten drei Umwelten (T, M, F) parallel simuliert werden, was erhebliche Kosten- und Zeitvorteile gegenüber Freilandversuchen mit sich brachte.

ii) Auswirkungen simulierter Wärmeemissionen auf Wurzelwachstum, Pflanzenentwicklung und Ertrag einer mehrgliedrigen Fruchtfolge

Das Wurzelwachstum der Sommergerste in KP1 reagierte auf die Wärmeemission mit einer signifikant geringeren Wurzelintensität und damit verbunden signifikant geringeren Stroh und bodenabhängig auch signifikant geringeren Kornerträgen. Die Zuckerrübe in KP2 profitierte von den höheren Bodenwassergehalten, welche von der Vorfrucht unter WARM zurückgelassen wurden, zeigte aber ähnlich, wie später der Sommerweizen in KP3 keine signifikante Reaktion auf die Wärmeemission. Der erneute Anbau von Sommergerste in KP4 bestätigte nur tendenziell die geringeren Kornerträge unter Wärmeemission in KP1. Der Ertrag des ersten Schnittes der Luzerne in KP4 war bodenabhängig signifikant geringer unter WARM. Bei den meisten Kulturen konnte unter WARM ein zügiger Feldaufgang beobachtet werden. Über mögliche Sortenunterschiede bzgl. der Ergebnisse kann keine Aussage gemacht werden. Die kulturartübergreifende statistische Auswertung der CRV-Werte über alle Anbaujahre zeigte jedoch signifikant niedrigere Erträge unter WARM.

iii) Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Bodentemperatur in den verschiedenen Bodenschichten

Im Rahmen der Untersuchung konnte gezeigt werden, wie stark die simulierte Wärmeemission die verschiedenen Bodenschichten in Abhängigkeit von der

Entfernung zur Wärmequelle erwärmt. Die dabei gemessenen Temperaturen bestätigen die aus anderen Versuchen bekannten Werte. Eine Untersuchung der horizontalen Temperaturlausbreitung wurde aber nicht durchgeführt. Ein Einfluss der Wärme auf den Wasserhaushalt konnte nicht festgestellt werden. Der Wasserhaushalt wies jedoch in Abhängigkeit von der Kulturart und der Niederschlagsstufe Unterschiede auf, die auf ein verändertes Wurzelwachstum zu den verschiedenen Versuchszeitpunkten zurückzuführen sind.

iv) Mögliche Veränderungen in wichtigen Bodeneigenschaften

Direkt durch WARM verursachte Veränderungen konnten nicht festgestellt werden. Allerdings kann die Wärme das Wurzelwachstum beeinflussen, was sich mittel- bis langfristig auf bodenphysikalische Parameter auswirken kann. Diese Bewertung basiert jedoch nur auf zwei stichprobenartig ausgewerteten HAL-Ms.

Die gewonnenen Erkenntnisse stellen erste Ergebnisse dar, die in weiteren Gefäßversuchen oder im Freiland zu verifizieren sind. Fragen der Bodenverdichtung, der Veränderung des Bodenprofils und des baubedingten Flächenverlustes wurden im Rahmen dieses Projektes nicht betrachtet. Es bleibt daher offen, welche Bedeutung die Wärmeemissionen auf die Kulturpflanzen im Vergleich zu diesen Aspekten haben.

Das hier vorgestellte HAL-M-System könnte sich darüber hinaus als kostengünstiger, schneller und zuverlässiger Standard für die Untersuchung thermischer Probleme von Kabeln aller Art in Bezug auf verschiedene Bodenzusammensetzungen und -typen, unterschiedliche Niederschlagsregime und verschiedene Kulturpflanzen, die von zukünftigen Projekten betroffen sein werden, erweisen. Das Design kann auch auf die Untersuchung von Bodenbiota und Boden-Pflanzen-Interaktionen ausgedehnt werden, die potenziell empfindlich auf künstliche Bodenwärme reagieren.

HAL-Ms können somit als Bindeglied zwischen Gefäß- und Feldversuchen dienen. Mit den Vorteilen von beiden sind sie eine Bereicherung für viele Forschungsbereiche, die auf die Kontrolle natürlicher Boden- und Pflanzenbedingungen abzielen.

6. Literatur

- Ahmed, L.Q., Durand, J.-L., Escobar-Gutiérrez, A.J., 2019. Genetic diversity of alfalfa (*Medicago sativa*) in response to temperature during germination. *Seed Sci. Technol.* <https://doi.org/10.15258/sst.2019.47.3.10>
- Altermann, M., Rinklebe, J., Merbach, I., Körschens, M., Langer, U., Hofmann, B., 2005. Chernozem—Soil of the Year 2005. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 725–740. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521814>
- Assouline, S., Or, D., 2014. The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resour. Res.* 50, 4787–4802. <https://doi.org/10.1002/2014WR015475>
- Atkinson, D., 1994. Temperature and organism size—A biological law for ectotherms? *Advances in Ecological Research* 25: 1.
- Ayesha, S., Abideen, Z., Haider, G., Zulfiqar, F., El-Keblawy, A., Rasheed, A., Siddique, K.H.M., Khan, M.B., Radicetti, E., 2023. Enhancing sustainable plant production and food security: Understanding the mechanisms and impacts of electromagnetic fields. *Plant Stress* 9, 100198. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100198>
- Barutçular, C., Koç, M., Albayrak, O., 2016. EVALUATION OF SPAD CHLOROPHYLL IN SPRING WHEAT GENOTYPES UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS. *Fresenius Environ. Bull.* 25.
- Berthelin, R., Rinderer, M., Andreo, B., Baker, A., Kilian, D., Leonhardt, G., Lotz, A., Lichtenwohrer, K., Mudarra, M., Padilla, I.Y., Pantoja Agreda, F., Rosolem, R., Vale, A., Hartmann, A., 2020. A soil moisture monitoring network to characterize karstic recharge and evapotranspiration at five representative sites across the globe. *Geosci. Instrum. Methods Data Syst.* 9, 11–23. <https://doi.org/10.5194/gi-9-11-2020>
- Bird, L., Lew, D., Milligan, M., Carlini, E.M., Estanqueiro, A., Flynn, D., Gomez-Lazaro, E., Holttinen, H., Menemenlis, N., Orth, A., Eriksen, P.B., Smith, J.C., Soder, L., Sorensen, P., Altiparmakis, A., Yasuda, Y., Miller, J., 2016. Wind and solar energy curtailment: A review of international experience. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65, 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.082>
- BNetzA, 2023. Monitoring des Stromnetzausbaus - Zweites Quartal 2023.
- BNetzA, 2022. Monitoring des Stromnetzausbaus - Viertes Quartal 2022.
- BNetzA, 2017. Fragen und Antworten zum Boden.
- Bogena, H., Huisman, J., Schilling, B., Weuthen, A., Vereecken, H., 2017. Effective Calibration of Low-Cost Soil Water Content Sensors. *Sensors* 17, 208. <https://doi.org/10.3390/s17010208>
- Bosold, M., Brauckmann, H., Broll, G., Meuser, H., 2022. Pedological Construction Supervision during the construction process—Status of implementation and future prospects. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 185, 915–922. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200209>
- Boudiar, R., Casas, A.M., Gioia, T., Fiorani, F., Nagel, K.A., Igartua, E., 2020. Effects of Low Water Availability on Root Placement and Shoot Development in Landraces and Modern Barley Cultivars. *Agronomy* 10, 134. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010134>
- BP, 2022. Statistical Review of World Energy 2022.
- BP, 2021. Statistical Review of World Energy 2021. 70.

- Brinkerink, M., Gallachóir, B.Ó., Deane, P., 2019. A comprehensive review on the benefits and challenges of global power grids and intercontinental interconnectors. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 107, 274–287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.003>
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Buchholz, K., Märlander, B., Puke, H., Glattkowski, H., Thielecke, K., 1995. Re-evaluation of technical value of sugar beet. *Zuckerindustrie* 120, 113–121.
- Buriro, M., Oad, F.C., Keerio, M.I., Tunio, S., Gandahi, A.W., Hassan, S.W.U., 2011. WHEAT SEED GERMINATION UNDER THE INFLUENCE OF TEMPERATURE REGIMES.
- Butler, T.J., Celen, A.E., Webb, S.L., Krstic, D., Interrante, S.M., 2014. Temperature Affects the Germination of Forage Legume Seeds. *Crop Sci.* 54, 2846–2853. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.01.0063>
- Cahill, A.T., Parlange, M.B., 1998. On water vapor transport in field soils. *Water Resour. Res.* 34, 731–739. <https://doi.org/10.1029/97WR03756>
- Campbell, L.G., Enz, J.W., 1991. Temperature Effects on Sugarbeet Seeding Emergence. *J. Sugarbeet Res.* 28, 129–140. <https://doi.org/10.5274/jsbr.28.3.129>
- Cassman, K.G., Munns, D.N., 1980. Nitrogen Mineralization as Affected by Soil Moisture, Temperature, and Depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1233–1237. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400060020x>
- Chatzivasileiadis, S., Ernst, D., Andersson, G., 2013. The Global Grid. *Renew. Energy* 57, 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.032>
- Child, M., Kemfert, C., Bogdanov, D., Breyer, C., 2019. Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renew. Energy* 139, 80–101. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.077>
- Clarkson, D.T., 1976. The Influence of Temperature on the Exudation of Xylem Sap from Detached Root Systems of Rye (*Secale cereale*) and Barley (*Hordeum vulgare*).
- Clausen, S.K., Frenck, G., Linden, L.G., Mikkelsen, T.N., Lunde, C., Jørgensen, R.B., 2011. Effects of Single and Multifactor Treatments with Elevated Temperature, CO₂ and Ozone on Oilseed Rape and Barley: Effects of Climate Change on Two Crops. *J. Agron. Crop Sci.* 197, 442–453. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00478.x>
- Consentec GmbH, Bosch & Partner GmbH, Koch, H.-J., 2016. Technische, planerische und regulatorische Bewertung der Erdkabel-Projekte nach EnLAG und BBPIG, Untersuchung im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Abschlussbericht.
- Cornu, J.-Y., Denaix, L., Lacoste, J., Sappin-Didier, V., Nguyen, C., Schneider, A., 2016. Impact of temperature on the dynamics of organic matter and on the soil-to-plant transfer of Cd, Zn and Pb in a contaminated agricultural soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 2997–3007. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5432-4>
- Cossani, C.M., Slafer, G.A., Savin, R., 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Res.* 112, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.003>
- Dakhiya, Y., Hussien, D., Fridman, E., Kiflawi, M., Green, R., 2017. Correlations between Circadian Rhythms and Growth in Challenging Environments. *Plant Physiol.* 173, 1724–1734. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00057>

- Dalai, R.C., 1977. Soil Organic Phosphorus, in: Brady, N.C. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 83–117. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60216-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60216-3)
- De Aguilar, C.A.-G., AZCON, R., BAREA, J.M., 1979. Endomycorrhizal fungi and Rhizobium as biological fertilisers for *Medicago sativa* in normal cultivation. *Nature* 279, 325–327. <https://doi.org/10.1038/279325a0>
- de Jong, P., Kiperstok, A., Sánchez, A.S., Dargaville, R., Torres, E.A., 2016. Integrating large scale wind power into the electricity grid in the Northeast of Brazil. *Energy* 100, 401–415. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.026>
- Demmers-Derks, H., Mitchell, R.A.C., Mitchell, V.J., Lawlor, D.W., 1998. Response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield and biochemical composition to elevated CO₂ and temperature at two nitrogen applications. *Plant Cell Environ.* 21, 829–836. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1998.00327.x>
- Deng, X., Lv, T., 2020. Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models. *J. Clean. Prod.* 246, 118962. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118962>
- Deumelandt, P., Hofmann, B., Christen, O., 2010. Der Einfluss unterschiedlicher Anbaukonzentrationen und Anbaupausen auf Bodeneigenschaften und Erträge im Zuckerrübenfruchtfolgeversuch Etzdorf Effect of various rotations and fallow periods on soil quality parameters and yield in the sugar beet rotation experiment Etzdorf. *Arch. Agron. Soil Sci.* 56, 393–404. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.490778>
- Diban, B., Mazzanti, G., 2021. The Effect of Insulation Characteristics on Thermal Instability in HVDC Extruded Cables. *Energies* 14, 550. <https://doi.org/10.3390/en14030550>
- DIN 13164:2022-02, 2022. Erste-Hilfe-Material - Verbandkasten B. <https://dx.doi.org/10.31030/3318581>
- DIN 18127: 2012-09, 2012. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben–Proctorversuch, Soil, investigation and testing - Proctor-test.
- Dong, Y., McCartney, J.S., Lu, N., 2015. Critical Review of Thermal Conductivity Models for Unsaturated Soils. *Geotech. Geol. Eng.* 33, 207–221. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9843-2>
- Donnelly, P.K., Entry, J.A., Crawford, D.L., Cromack, K., 1990. Cellulose and lignin degradation in forest soils: Response to moisture, temperature, and acidity. *Microb. Ecol.* 20, 289–295. <https://doi.org/10.1007/BF02543884>
- Drebenstedt, I., Schmid, I., Poll, C., Marhan, S., Kahle, R., Kandeler, E., Högy, P., 2020. Effects of soil warming and altered precipitation patterns on photosynthesis, biomass production and yield of barley. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 44-53 Pages. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2020.093.006>
- Dubetz, S., Russell, G.C., Anderson, D.T., 1961. Effect of soil temperature on seedling emergence. *Can. J. Plant Sci.*
- DWD Climate Data Center (CDC), 2019a. Stündliche Stationsmessungen der Erdbodentemperatur in 100 cm Tiefe in °C für Deutschland.
- DWD Climate Data Center (CDC), 2019b. Stündliche Stationsmessungen der Lufttemperatur in 2 m Höhe in °C für Deutschland.
- Eberbach, P.L., Hoffmann, J., Moroni, S.J., Wade, L.J., Weston, L.A., 2013. Rhizolysimetry: facilities for the simultaneous study of root behaviour and resource use by

- agricultural crop and pasture systems. *Plant Methods* 9, 3. <https://doi.org/10.1186/1746-4811-9-3>
- Eberlein, C., Heuer, H., Westphal, A., 2020. Biological Suppression of Populations of *Heterodera schachtii* Adapted to Different Host Genotypes of Sugar Beet. *Front. Plant Sci.* 11, 812. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00812>
- Ebmeyer, H., Hoffmann, C.M., 2021. Water use efficiency of sugar beet genotypes: A relationship between growth rates and water consumption.
- Eckelmann, W., Sponagel, H., Grottenthaler, W., Hartmann, K.-J., Hartwich, R., Janetzko, P., Joisten, H., Kühn, D., Sabel, K.-J., Traidl, R., 2022. Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5.
- Edwards, C.A., Arancon, N.Q., 2022. The Influence of Environmental Factors on Earthworms, in: Edwards, C.A., Arancon, N.Q. (Eds.), *Biology and Ecology of Earthworms*. Springer US, New York, NY, pp. 191–232. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74943-3_7
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F., 2014. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 748–764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- Energy Institute, 2024. *Statistical Review of World Energy 2024*.
- Ephrath, J.E., Silberbush, M., Berliner, P.R., 1999. Calibration of minirhizotron readings against root length density data obtained from soil cores.
- Evans, J., Wallace, C., Dobrowolski, N., 1993. Interaction of soil type and temperature on the survival of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*. *Soil Biol. Biochem.* 25, 1153–1160. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90209-T](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90209-T)
- Evett, S.R., Agam, N., Kustas, W.P., Colaizzi, P.D., Schwartz, R.C., 2012. Soil profile method for soil thermal diffusivity, conductivity and heat flux: Comparison to soil heat flux plates. *Adv. Water Resour.* 50, 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.04.012>
- Fairley, P., 2013. Germany jump-starts the supergrid. *IEEE Spectr.* 50, 36–41. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2013.6511107>
- Fan, J., McConkey, B., Wang, H., Janzen, H., 2016. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Res.* 189, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013>
- Feldwisch, N., 2015. Bodenkundliche Baubegleitung – Bodenschutz beim Trassenbau, in: *Boden Und Energiewende: Trassenbau, Erdverkabelung Und Erdwärme*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 17–25. https://doi.org/10.1007/978-3-658-12167-9_2
- Ferguson, B.J., Mens, C., Hastwell, A.H., Zhang, M., Su, H., Jones, C.H., Chu, X., Gresshoff, P.M., 2019. Legume nodulation: The host controls the party. *Plant Cell Environ.* 42, 41–51. <https://doi.org/10.1111/pce.13348>
- Fester, T., Merbach, I., Schulz, E., Härtig, C., 2014. Metabolic response of *Medicago sativa* to severe nutrient imbalances and disturbances under field conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 245–259. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200551>
- Füllner, K., Temperton, V.M., Rascher, U., Jahnke, S., Rist, R., Schurr, U., Kuhn, A.J., 2012. Vertical gradient in soil temperature stimulates development and increases biomass

- accumulation in barley: Soil temperature gradient stimulates plant growth. *Plant Cell Environ.* 35, 884–892. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02460.x>
- Gandee, C.M., Harrison, S.P., Davies, W.P., 1999. Genetic characterization of naturally occurring *Rhizobium meliloti* populations and their potential to form effective symbioses with lucerne. *Lett. Appl. Microbiol.* 28, 169–174. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1999.00515.x>
- Gao, M., Peng, C., Hu, Y., Liu, W., Ye, Y., Zheng, Y., Chen, T.-W., 2023. Composition and vertical distribution of agricultural soil Macrofauna community after an extreme high temperature event in the summer of 2022. *Ecol. Indic.* 153, 110439. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110439>
- Gardiner, B., Berry, P., Moulia, B., 2016. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Sci.* 245, 94–118. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.006>
- Gardner, J.L., Peters, A., Kearney, M.R., Joseph, L., Heinsohn, R., 2011. Declining body size: a third universal response to warming? *Trends Ecol. Evol.* 26, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.03.005>
- Gongalsky, K.B., Pokarzhevskii, A.D., Filimonova, Z.V., Savin, F.A., 2004. Stratification and dynamics of bait-lamina perforation in three forest soils along a north–south gradient in Russia. *Appl. Soil Ecol.* 25, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2003.09.001>
- González, A., Martín, I., Ayerbe, L., 2007. Response of barley genotypes to terminal soil moisture stress: phenology, growth, and yield. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 29. <https://doi.org/10.1071/AR06026>
- Gulati, H.S., Murty, V.V.N., 1979. A model for optimal allocation of canal water based on crop production functions. *Agric. Water Manag.* 2, 79–91. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(79\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0378-3774(79)90015-5)
- Hamel, C., Schellenberg, M.P., Hanson, K., Wang, H., 2007. Evaluation of the “bait-lamina test” to assess soil microfauna feeding activity in mixed grassland. *Appl. Soil Ecol.* 36, 199–204. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.02.004>
- Hanse, B., Vermeulen, G.D., Tjink, F.G.J., Koch, H.-J., Märlander, B., 2011. Analysis of soil characteristics, soil management and sugar yield on top and averagely managed farms growing sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in the Netherlands. *Soil Tillage Res.* 117, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.08.008>
- Hansen, K., Breyer, C., Lund, H., 2019. Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy* 175, 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>
- Hardie, M., 2020. Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture. *Sensors* 20, 6934. <https://doi.org/10.3390/s20236934>
- Harjanne, A., Korhonen, J.M., 2019. Abandoning the concept of renewable energy. *Energy Policy* 127, 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.029>
- Heide, D., Greiner, M., von Bremen, L., Hoffmann, C., 2011. Reduced storage and balancing needs in a fully renewable European power system with excess wind and solar power generation. *Renew. Energy* 36, 2515–2523. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.009>
- Högy, P., Poll, C., Marhan, S., Kandeler, E., Fangmeier, A., 2013. Impacts of temperature increase and change in precipitation pattern on crop yield and yield quality of barley. *Food Chem.* 136, 1470–1477. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.056>

- Hohmann, M., Stahl, A., Rudloff, J., Wittkop, B., Snowdon, R.J., 2016. Not a load of rubbish: simulated field trials in large-scale containers: Large-container yield phenotyping. *Plant Cell Environ.* 39, 2064–2073. <https://doi.org/10.1111/pce.12737>
- Hooker, H.D., 1914. Thermotropism in roots. *Plant World* 17, 135–153.
- Hotta, C.T., 2021. From crops to shops: how agriculture can use circadian clocks. *J. Exp. Bot.* 72, 7668–7679. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab371>
- Ickler, J., 2020. persönliche E-Mail mit Angaben zur Änderung der simulierten Wärmeemission.
- Ickler, J., 2019. persönliche E-Mail mit Angaben zum Bettungsmaterial.
- IEA, 2022. *World Energy Outlook 2022*.
- IEC, 2011. *International Electrotechnical Commission (IEC) White Paper*.
- ISO11274, S., 2019. *Soil Quality—Determination of the Water-Retention Characteristic—Laboratory Methods. Chem. Phys. Charact. Hydrol. Prop. Soils Tech. Comm. ISOTC 190*.
- Jame, Y.W., Cutforth, H.W., 2004. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agric. For. Meteorol.* 124, 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.01.012>
- Jessop, R.S., Stewart, L.W., 1983. Effects of crop residues, soil type and temperature on emergence and early growth of wheat. *Plant Soil* 74, 101–109. <https://doi.org/10.1007/BF02178745>
- Jeuzy, C., Adrian, M., Baussard, C., Bernard, C., Bernaud, E., Bourion, V., Busset, H., Cabrera-Bosquet, L., Cointault, F., Han, S., Lamboeuf, M., Moreau, D., Pivato, B., Prudent, M., Trouvelot, S., Truong, H.N., Vernoud, V., Voisin, A.-S., Wipf, D., Salon, C., 2016. RhizoTubes as a new tool for high throughput imaging of plant root development and architecture: test, comparison with pot grown plants and validation. *Plant Methods* 12, 31. <https://doi.org/10.1186/s13007-016-0131-9>
- Kang, S., Van Iersel, M.W., Kim, J., 2019. Plant root growth affects FDR soil moisture sensor calibration. *Sci. Hortic.* 252, 208–211. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.050>
- Kaspar, T.C., Bland, W.L., 1992. Soil Temperature and root growth. *Soil Sci.* 154.
- Kaufmann, M., Tobias, S., Schulin, R., 2010. Comparison of critical limits for crop plant growth based on different indicators for the state of soil compaction. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 573–583. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900129>
- Kenter, C., Hoffmann, C.M., Märländer, B., 2006. Effects of weather variables on sugar beet yield development (*Beta vulgaris* L.). *Eur. J. Agron.* 24, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.05.001>
- Klute, A., 1986. Water Retention: Laboratory Methods, in: *Methods of Soil Analysis, SSSA Book Series*. pp. 635–662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
- Klute, A., Dirksen, C., 1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods, in: *Methods of Soil Analysis, SSSA Book Series*. pp. 687–734. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>
- Kober, T., Schiffer, H.-W., Densing, M., Panos, E., 2020. Global energy perspectives to 2060 – WEC’s World Energy Scenarios 2019. *Energy Strategy Rev.* 31, 100523. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100523>

- Kohne, J.M., Mohanty, B.P., 2005. Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore: Experiment and hierarchical modeling 17.
- Koorevaar, P., Menelik, G., Dirksen, C., 1983. Elements of soil physics, Developments in soil science. Elsevier, Amsterdam ; New York.
- Kratz, W., 1998. The bait-lamina test: General aspects, applications and perspectives. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 5, 94–96. <https://doi.org/10.1007/BF02986394>
- Kretzschmar, A., 1982. The burrow system of earthworms in grassland. Seasonal variations of field observations. *Rev. D'Ecologie Biol. Sol* 19, 579–591.
- Kühne, O., Weber, F., 2018. Conflicts and negotiation processes in the course of power grid extension in Germany. *Landsc. Res.* 43, 529–541. <https://doi.org/10.1080/01426397.2017.1300639>
- Kuiper, P.J.C., 1964. Water uptake of higher plants as affected by root temperature (No. 1872– 728X). Veenman.
- Lamichhane, J.R., Constantin, J., Aubertot, J.-N., Dürr, C., 2019. Will climate change affect sugar beet establishment of the 21st century? Insights from a simulation study using a crop emergence model. *Field Crops Res.* 238, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.022>
- Lancashire, P.D., Bleiholder, H., Boom, T.V.D., Langelüddeke, P., Stauss, R., Weber, E., Witzemberger, A., 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. Appl. Biol.* 119, 561–601. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x>
- Lee, J.W., 2019. Long-run dynamics of renewable energy consumption on carbon emissions and economic growth in the European union. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 26, 69–78. <https://doi.org/10.1080/13504509.2018.1492998>
- Leonard, M.D., Michaelides, E.E., Michaelides, D.N., 2020. Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants with renewables. *Renew. Energy* 145, 951–962. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.066>
- Li, L., Zhao, T., Chen, Z., 2018. First Dual MeV Energy X-ray CT for Container Inspection: Design, Algorithm, and Preliminary Experimental Results. *IEEE Access* 6, 45534–45542. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2864800>
- Liang, X., 2017. Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 53, 855–866. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2626253>
- Lu, S., Ma, C., Meng, P., Zhang, J., Zhang, X., Lu, Y., Yin, C., 2016. Experimental investigation of subsurface soil water evaporation on soil heat flux plate measurement. *Appl. Therm. Eng.* 93, 433–437. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.058>
- Lukas, S., Abbas, S.J., Kössler, P., Karlovsky, P., Potthoff, M., Joergensen, R.G., 2018. Fungal plant pathogens on inoculated maize leaves in a simulated soil warming experiment. *Appl. Soil Ecol.* 124, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.018>
- Mäck, G., Hoffmann, C.M., 2006. Organ-specific adaptation to low precipitation in solute concentration of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Eur. J. Agron.* 25, 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.06.004>

- Manici, L.M., Bregaglio, S., Fumagalli, D., Donatelli, M., 2014. Modelling soil borne fungal pathogens of arable crops under climate change. *Int. J. Biometeorol.* 58, 2071–2083. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0808-6>
- Maurel, C., Nacry, P., 2020. Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. *Nat. Plants* 6, 744–749. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0684-5>
- Meier, U., 2018. Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen: BBCH Monografie. <https://doi.org/10.5073/20180906-075119>
- Metzner, R., Eggert, A., Van Dusschoten, D., Pflugfelder, D., Gerth, S., Schurr, U., Uhlmann, N., Jahnke, S., 2015. Direct comparison of MRI and X-ray CT technologies for 3D imaging of root systems in soil: potential and challenges for root trait quantification. *Plant Methods* 11, 17. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0060-z>
- Mey, G.D., Xynis, P., Papagiannopoulos, I., Chatziathanasiou, V., Exizidis, L., Wiecek, B., 2014. Optimal Position of Buried Power Cables. *Elektron. Ir Elektrotechnika* 20, 37–40. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.20.5.7097>
- Miao, B., Giordano, L., Chan, S.H., 2021. Long-distance renewable hydrogen transmission via cables and pipelines. *Int. J. Hydrog. Energy* 46, 18699–18718. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.067>
- Moriarty, P., Honnery, D., 2016. Can renewable energy power the future? *Energy Policy* 93, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.051>
- Moustafa, M.A., Boersma, L., Kronstad, W.E., 1996. Response of Four Spring Wheat Cultivars to Drought Stress. *Crop Sci.* 36, 982–986. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600040027x>
- Moya, R.E.S., Prata, A.T., Neto, J.A.B.C., 1999. Experimental analysis of unsteady heat and moisture transfer around a heated cylinder buried into a porous medium. *Int. J. Heat Mass Transf.* 42, 2187–2198. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00322-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00322-6)
- Mueller, C.E., 2020. Why do residents participate in high-voltage transmission line planning procedures? Findings from two power grid expansion regions in Germany. *Energy Policy* 145, 111779. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111779>
- Murai-Hatano, M., Kuwagata, T., Sakurai, J., Nonami, H., Ahamed, A., Nagasuga, K., Matsunami, T., Fukushi, K., Maeshima, M., Okada, M., 2008. Effect of Low Root Temperature on Hydraulic Conductivity of Rice Plants and the Possible Role of Aquaporins. *Plant Cell Physiol.* 49, 1294–1305. <https://doi.org/10.1093/pcp/pen104>
- Muthert, L.W.F., Izzo, L.G., 2020. Root Tropisms: Investigations on Earth and in Space to Unravel Plant Growth Direction. *Front. Plant Sci.* 10, 22.
- Nazir, M.S., Ali, Z.M., Bilal, M., Sohail, H.M., Iqbal, H.M.N., 2020. Environmental impacts and risk factors of renewable energy paradigm—a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 33516–33526. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09751-8>
- Neenu, S., Ramesh, K., 2020. Weather - Micronutrient Interactions in Soil and Plants— A Critical Review.
- Neukirch, M., 2020. Grinding the grid: Contextualizing protest networks against energy transmission projects in Southern Germany. *Energy Res. Soc. Sci.* 69, 101585. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101585>
- Neumann, U., Kosier, B., Jahnke, J., Priefer, U.B., Al-Halbouni, D., 2011. Soil factors exhibit greater influence than bacterial inoculation on alfalfa growth and nitrogen

- fixation: *Ensifer* and *Azospirillum* in arable and contaminated soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* 77, 590–599. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01139.x>
- Nieberding, F., Huisman, J.A., Huebner, C., Schilling, B., Weuthen, A., Bogena, H.R., 2023. Evaluation of Three Soil Moisture Profile Sensors Using Laboratory and Field Experiments. *Sensors* 23, 6581. <https://doi.org/10.3390/s23146581>
- Ocłoń, P., Cisek, P., Pilarczyk, M., Taler, D., 2015. Numerical simulation of heat dissipation processes in underground power cable system situated in thermal backfill and buried in a multilayered soil. *Energy Convers. Manag.* 95, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.092>
- Olsen, R., Anders, G.J., Holboell, J., Gudmundsdottir, U.S., 2013. Modelling of Dynamic Transmission Cable Temperature Considering Soil-Specific Heat, Thermal Resistivity, and Precipitation. *IEEE Trans. Power Deliv.* 28, 1909–1917. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2263300>
- Owusu, P.A., Asumadu-Sarkodie, S., 2016. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Eng.* 3, 1167990. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
- Palta, J.A., Turner, N.C., 2019. Crop root system traits cannot be seen as a silver bullet delivering drought resistance. *Plant Soil* 439, 31–43. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3864-6>
- Passioura, J., 1991. Soil structure and plant growth. *Soil Res.* 29, 717. <https://doi.org/10.1071/SR9910717>
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Hakala, K., 2011. Crop responses to temperature and precipitation according to long-term multi-location trials at high-latitude conditions. *J. Agric. Sci.* 149, 49–62. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000791>
- Perreault, J.M., Whalen, J.K., 2006. Earthworm burrowing in laboratory microcosms as influenced by soil temperature and moisture. *Pedobiologia* 50, 397–403. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.07.003>
- Petelkau, H., 1991. Ertragliche Auswirkungen technogener Schadverdichtungen der Ackerkrume. *Agrartechnik* 41, 54–57.
- Pierri, E., Binder, O., Hemdan, N.G.A., Kurrat, M., 2017. Challenges and opportunities for a European HVDC grid. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 70, 427–456. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.233>
- Platzer, W., Bole, I., Ragwitz, M., Kost, C., Thoma, J., Vogel, A., Fluri, T., Pfeiffer, W., Burmeister, F., Tham, N., Pudlik, M., Bohn, S., Agsten, M., Bretschneider, P., Westermann, D., Kranzer, D., Schlegl, T., 2016. Approach for the integration of renewable energy in Europe and North Africa.
- Pöhlitz, J., Rücknagel, J., Schlüter, S., Vogel, H.-J., Christen, O., 2020. Estimation of critical stress ranges to preserve soil functions for differently textured soils. *Soil Tillage Res.* 200, 104637. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104637>
- Poorter, H., Bühler, J., van Dusschoten, D., Climent, J., Postma, J.A., 2012. Pot size matters: a meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Funct. Plant Biol.* 39, 839. <https://doi.org/10.1071/FP12049>
- Poorter, H., Fiorani, F., Pieruschka, R., Wojciechowski, T., Putten, W.H., Kleyer, M., Schurr, U., Postma, J., 2016. Pampered inside, pestered outside? Differences and

- similarities between plants growing in controlled conditions and in the field. *New Phytol.* 212, 838–855. <https://doi.org/10.1111/nph.14243>
- Poulton, P.R., Powlson, D.S., Glendining, M.J., Gregory, A.S., 2024. Why do we make changes to the long-term experiments at Rothamsted? *Eur. J. Agron.* 154, 127062. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127062>
- Pregitzer, K.S., King, J.S., 2005. Effects of Soil Temperature on Nutrient Uptake, in: BassiriRad, H. (Ed.), *Nutrient Acquisition by Plants: An Ecological Perspective*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 277–310. https://doi.org/10.1007/3-540-27675-0_10
- Rabah, D., Bentouati, B., El-Sehiemy, R.A., Shahriar, M.S., Bouchekara, H.R.E.H., 2023. Analysis of the Optimized Compensating Loops Effect on the Magnetic Induction Due to Very-High-Voltage Underground Cable Using Grey Wolf Optimizer. *Arab. J. Sci. Eng.* 48, 14407–14422. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07656-5>
- Rasmussen, I.S., Dresbøll, D.B., Thorup-Kristensen, K., 2015. Winter wheat cultivars and nitrogen (N) fertilization—Effects on root growth, N uptake efficiency and N use efficiency. *Eur. J. Agron.* 68, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.003>
- Rasse, D.P., Smucker, A.J.M., 1998. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations. *Plant Soil* 204, 203–212.
- Rehbein, J.A., Watson, J.E.M., Lane, J.L., Sonter, L.J., Venter, O., Atkinson, S.C., Allan, J.R., 2020. Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas. *Glob. Change Biol.* 26, 3040–3051. <https://doi.org/10.1111/gcb.15067>
- Reichenberg, L., Hedenus, F., Mattsson, N., Verendel, V., 2022. Deep decarbonization and the supergrid – Prospects for electricity transmission between Europe and China. *Energy* 239, 122335. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122335>
- Reinken, G., Werning, L., 1982. Auswirkung Ganzjaehriger Bodenerwaermung auf Boden und Pflanze : Ergebnisbericht 1976-1981. *Landwirtschaftskammer Rheinl.* 118.
- Rerak, M., Ocloń, P., 2017. Thermal analysis of underground power cable system. *J. Therm. Sci.* 26, 465–471. <https://doi.org/10.1007/s11630-017-0963-2>
- Richter, 2019. Bodennutzung in landwirtschaftlichen Betrieben.
- Robinson, H., 2018. Root architectural traits and yield: exploring the relationship in barley breeding trials 16.
- Rücknagel, J., Rademacher, A., Götze, P., Hofmann, B., Christen, O., 2017. Uniaxial compression behaviour and soil physical quality of topsoils under conventional and conservation tillage. *Geoderma* 286, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.015>
- Runge, K., Baum, S., Meister, P., Rottgardt, E., 2012. Umweltauswirkungen unterschiedlicher Netzkomponenten - Im Auftrag der Bundesnetzagentur.
- Sadok, W., Tamang, B.G., 2018. Diversity in daytime and night--time transpiration dynamics in barley indicates adaptation to drought regimes across the Middle--East 13.
- Salata, F., Nardecchia, F., de Lieto Vollaro, A., Gugliermetti, F., 2015. Underground electric cables a correct evaluation of the soil thermal resistance. *Appl. Therm. Eng.* 78, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.059>
- Šárová, J., Kudlíková, I., Žalud, Z., Veverka, K., 2003. *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. moving north — temperature adaptation or change in climate? / *Macrophomina*

- phaseolina (Tassi) Goid. breitet sich nach Norden aus — Temperaturadaptation oder auf Grund klimatischer Veränderungen? *Z. Für Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz J. Plant Dis. Prot.* 110, 444–448.
- Savin, R., Nicolas, M.E., 1999. Effects of timing of heat stress and drought on growth and quality of barley grains. *Aust. J. Agric. Res.* 50, 357–364.
- Schaal, D., 2015. Industrialization and Agriculture: The Beet Sugar Industry in Saxony-Anhalt, 1799–1902, in: Czierpka, J., Oerters, K., Thorade, N. (Eds.), *Regions, Industries, and Heritage: Perspectives on Economy, Society, and Culture in Modern Western Europe*. Palgrave Macmillan UK, London, pp. 136–147. https://doi.org/10.1057/9781137333414_9
- Schilling, G., Eißner, H., Schmidt, L., Peiter, E., 2016. Yield formation of five crop species under water shortage and differential potassium supply. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179, 234–243. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500407>
- Schlüter, S., Großmann, C., Diel, J., Wu, G.-M., Tischer, S., Deubel, A., Rücknagel, J., 2018. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. *Geoderma* 332, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.001>
- Schmitt, J., Offermann, F., Söder, M., Frühauf, C., Finger, R., 2022. Extreme weather events cause significant crop yield losses at the farm level in German agriculture. *Food Policy* 112, 102359. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2022.102359>
- Scholl, P., Nolz, R., Himmelbauer, M., Kammerer, G., Loiskandl, W., Kaul, H.-P., Bodner, G., 2015. Laboratory Setup for Sensing Root-Induced Changes of Soil Hydraulic Properties in Soil Columns. *Int. J. Plant Soil Sci.* 8, 1–20. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/20604>
- Shafiei, S., Salim, R.A., 2014. Non-renewable and renewable energy consumption and CO2 emissions in OECD countries: A comparative analysis. *Energy Policy* 66, 547–556. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.064>
- Shehata, M.M., Azer, S.A., Mostafa, S.N., 2000. The Effects of soil moisture stress on some sugar beet varieties. *Egypt. J. Agric. Res.* 78, 1141–1160. <https://doi.org/10.21608/ejar.2000.322684>
- Singh, D.N., Devid, K., 2000. Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 22, 133–143. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(00\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(00)00020-0)
- Singh, N.T., Dhaliwal, G.S., 1972. Effect of soil temperature on seedling emergence in different crops. *Plant Soil* 37, 441–444. <https://doi.org/10.1007/BF02139989>
- Sinsel, S.R., Riemke, R.L., Hoffmann, V.H., 2020. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *Renew. Energy* 145, 2271–2285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>
- Smiley, R., Uddin, W., 1993. Influence of soil temperature on Rhizoctonia root rot (*R. solani* AG-8 and *R. oryzae*) of winter wheat. *Phytopathology* 83, 777–785.
- Smith, S.E., Bowen, G.D., 1979. Soil temperature, mycorrhizal infection and nodulation of *Medicago truncatula* and *Trifolium subterraneum*. *Soil Biol. Biochem.* 11, 469–473. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(79\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(79)90004-X)

- Sponagel, H., Grotenthaler, W., Hartmann, K.-J., Hartwich, R., Janetzko, P., Joisten, H., Kühn, D., Sabel, K.-J., Traidl, R., 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 5. Auflage. ed.
- Stallmann, J., Schweiger, R., Müller, C., 2018. Effects of continuous *versus* pulsed drought stress on physiology and growth of wheat. *Plant Biol.* 20, 1005–1013. <https://doi.org/10.1111/plb.12883>
- Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, 2023. Tabellen Wachstumsstand und Ernte.
- Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, 2022. . Tabellen Wachstumsstand Ernte. URL <https://statistik.sachsen-anhalt.de> (accessed 2.18.24).
- Stibbe, C., Marlander, B., 2002. Field emergence dynamics significance to intraspecific competition and growth efficiency in sugar beet (Beta).
- Stirzaker, R.J., Passioura, J.B., Wilms, Y., 1996. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant Soil* 185, 151–162. <https://doi.org/10.1007/BF02257571>
- Stone, J.A., McKeague, J.A., Protz, R., 1987. Corn root distribution in relation to long-term rotations on a poorly drained clay loam soil. *Can. J. Plant Sci.* 67, 231–234. <https://doi.org/10.4141/cjps87-028>
- Sullivan, D.M., Moore, A.D., Verhoeven, E.C., Brewer, L.J., 2020. Baseline soil nitrogen mineralization: measurement and interpretation. Oregon State University Extension Service.
- Sun, D., Bi, Q., Li, K., Dai, P., Yu, Y., Zhou, W., Lv, T., Liu, X., Zhu, J., Zhang, Q., Jin, C., Lu, L., Lin, X., 2018. Significance of temperature and water availability for soil phosphorus transformation and microbial community composition as affected by fertilizer sources. *Biol. Fertil. Soils* 54, 229–241. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1252-7>
- Sun, J., Li, M., State Grid Corporation of China, Zhang, Z., State Grid Corporation of China, Xu, T., State Grid Corporation of China, He, J., State Grid Corporation of China, Wang, H., China Electric Power Research Institute, Li, G., China Electric Power Research Institute, 2017. Renewable energy transmission by HVDC across the continent: system challenges and opportunities. *CSEE J. Power Energy Syst.* 3, 353–364. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2017.01200>
- Svačina, P., Středa, T., Chloupek, O., 2013. Uncommon selection by root system size increases barley yield. *Agron Sustain Dev* 545–551.
- Svane, S.F., Dam, E.B., Carstensen, J.M., Thorup-Kristensen, K., 2019a. A multispectral camera system for automated minirhizotron image analysis. *Plant Soil* 441, 657–672. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04132-8>
- Svane, S.F., Jensen, C.S., Thorup-Kristensen, K., 2019b. Construction of a large-scale semi-field facility to study genotypic differences in deep root growth and resources acquisition. *Plant Methods* 15, 26. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0409-9>
- Tabacco, E., Borreani, G., Odoardi, M., Reyneri, A., 2002. Effect of Cutting Frequency on Dry Matter Yield and Quality of Lucerne (*Medicago sativa* L.) in the Po Valley.
- Tanaka, R., Nakano, H., 2019. Barley Yield Response to Nitrogen Application under Different Weather Conditions. *Sci. Rep.* 9, 8477. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44876-y>

- Teixeira, E.I., Moot, D.J., Brown, H.E., Fletcher, A.L., 2007. The dynamics of lucerne (*Medicago sativa* L.) yield components in response to defoliation frequency. *Eur. J. Agron.* 26, 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.12.005>
- Thorup-Kristensen, K., Halberg, N., Nicolaisen, M., Olesen, J.E., Crews, T.E., Hinsinger, P., Kirkegaard, J., Pierret, A., Dresbøll, D.B., 2020. Digging Deeper for Agricultural Resources, the Value of Deep Rooting. *Trends Plant Sci.* 25, 406–417. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.007>
- Trüby, P., 2014. Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen.
- Tyrka, M., Rapacz, M., Fiust, A., Wójcik-Jagła, M., 2015. Quantitative trait loci mapping of freezing tolerance and photosynthetic acclimation to cold in winter two- and six-rowed barley. *Plant Breed.* 134, 271–282. <https://doi.org/10.1111/pbr.12270>
- Vamerali, T., Bandiera, M., Mosca, G., 2012. Minirhizotrons in Modern Root Studies, in: Mancuso, S. (Ed.), *Measuring Roots*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 341–361. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22067-8_17
- van Zanten, M., Ai, H., Quint, M., 2021. Plant thermotropism: an underexplored thermal engagement and avoidance strategy. *J. Exp. Bot.* erab209. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab209>
- Váňová, M., Palík, S., Hajšlová, J., Burešová, I., 2006. Grain quality and yield of spring barley in field trials under variable growing conditions. *Plant Soil Environ.* 52, 211–219. <https://doi.org/10.17221/3432-PSE>
- Wallenstein, M., Allison, S.D., Ernakovich, J., Steinweg, J.M., Sinsabaugh, R., 2011. Controls on the Temperature Sensitivity of Soil Enzymes: A Key Driver of In Situ Enzyme Activity Rates, in: Shukla, G., Varma, A. (Eds.), *Soil Enzymology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 245–258. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_13
- Wang, M., An, T., Ergun, H., Lan, Y., Andersen, B., Szechtman, M., Leterne, W., Beerten, J., Van Hertem, D., 2020. Review and outlook of HVDC grids as backbone of the transmission system. *CSEE J. Power Energy Syst.* <https://doi.org/10.17775/CSEE-JPES.2020.04890>
- Wang, Y., 2018. The latest technologies Study for HVAC/DC cable insulation material, in: 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Presented at the 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), IEEE, Xi'an, pp. 966–969. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2018.8401198>
- Whitehouse, R.N.H., 1979. *Barley*. By D. E. Briggs. London: Chapman and Hall (1978), pp. 612, £25. *Exp. Agric.* 15, 203–204. <https://doi.org/10.1017/S0014479700000636>
- Whitfield, C.J., Smika, D.E., 1971. Soil Temperature and Residue Effects on Growth Components and Nutrient Uptake of Four Wheat Varieties ¹. *Agron. J.* 63, 297–300. <https://doi.org/10.2134/agronj1971.00021962006300020029x>
- Wigley, K., Liu, W., Khumalo, Q., Moot, D., Brown, D., Ridgway, H., 2015. Effectiveness of three inoculation methods for lucerne (*Medicago sativa* L.) in two Canterbury soils. *N. Z. J. Agric. Res.* 58, 292–301. <https://doi.org/10.1080/00288233.2015.1028652>
- Wortmann, J., 1885. Über den Thermotropismus der Wurzel. *Bot.Zeit.* 43, 225–235.

- Wulkow, A., Hoffmann, C., 2011. Ertrag und Qualität geköpfter und entblätterter Zuckerrüben: Theoretisches Potenzial und praktische Bedeutung. *Sugar Ind.* 234–241. <https://doi.org/10.36961/si11314>
- Ye, H., Fechner, T., Lei, X., Luo, Y., Zhou, M., Han, Z., Wang, H., Zhuang, Q., Xu, R., Li, D., 2018. Review on HVDC cable terminations. *High Volt.* 3, 79–89. <https://doi.org/10.1049/hve.2017.0144>
- Yin, R., Siebert, J., Eisenhauer, N., Schädler, M., 2020. Climate change and intensive land use reduce soil animal biomass via dissimilar pathways. *eLife* 9, e54749. <https://doi.org/10.7554/eLife.54749>
- Zahran Hamdi Hussein, 1999. Rhizobium-Legume Symbiosis and Nitrogen Fixation under Severe Conditions and in an Arid Climate. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 63, 968–989. <https://doi.org/10.1128/mnbr.63.4.968-989.1999>
- Zhang, N., Wang, Z., 2017. Review of soil thermal conductivity and predictive models. *Int. J. Therm. Sci.* 117, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013>
- Zhang, Q.T., Ahmed, O.A.B., Inoue, M., Saxena, M.C., Inosako, K., Kondo, K., 2009. Effects of mulching on evapotranspiration, yield and water use efficiency of Swiss chard (*Beta vulgaris* L. var. *flavescens*) irrigated with diluted seawater.
- Zhu, J., Li, M., Whelan, M., 2018. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Sci. Total Environ.* 612, 522–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095>
- Zilberti, L., Pons, E., Bottauscio, O., Chiampi, M., Pastorelli, M., 2010. Evaluation of the Electromagnetic Environment Around Underground HVDC Lines. *IEEE Trans. Power Deliv.* 25, 3085–3094. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2056395>
- Zsiborács, H., Baranyai, N.H., Vincze, A., Zentkó, L., Birkner, Z., Máté, K., Pintér, G., 2019. Intermittent Renewable Energy Sources: The Role of Energy Storage in the European Power System of 2040. *Electronics* 8, 729. <https://doi.org/10.3390/electronics8070729>

7. Anhang



Bild: Ken Uhlig

Abbildung 33: Bodenentnahme für SAND

Links: Oberboden - Ls2 schwach sandiger Lehm, Rechts: Unterboden - St2 schwach toniger Sand



Bild: Ken Uhlig

Abbildung 34 Bodenentnahme für LÖSS

Oberboden – uU reiner Schluff, Unterboden - Ut2 schwach toniger Schluff



Abbildung 35: Beispielbild der Sommergerste in Kulturphase 1

Bild: Ken Uhlig



Abbildung 36: Beispielbild der Zuckerrübe in Kulturphase 2

Bild: Ken Uhlig



Abbildung 37: Beispielbild des Sommerweizens in Kulturphase 3

Bild: Ken Uhlig



Abbildung 38: Beispielbild der Sommergerste und Luzerne in Kulturphase 4

Bild: Ken Uhlig



Abbildung 39: Wurzelscan inklusive Zählraster

Bild: Ken Uhlig

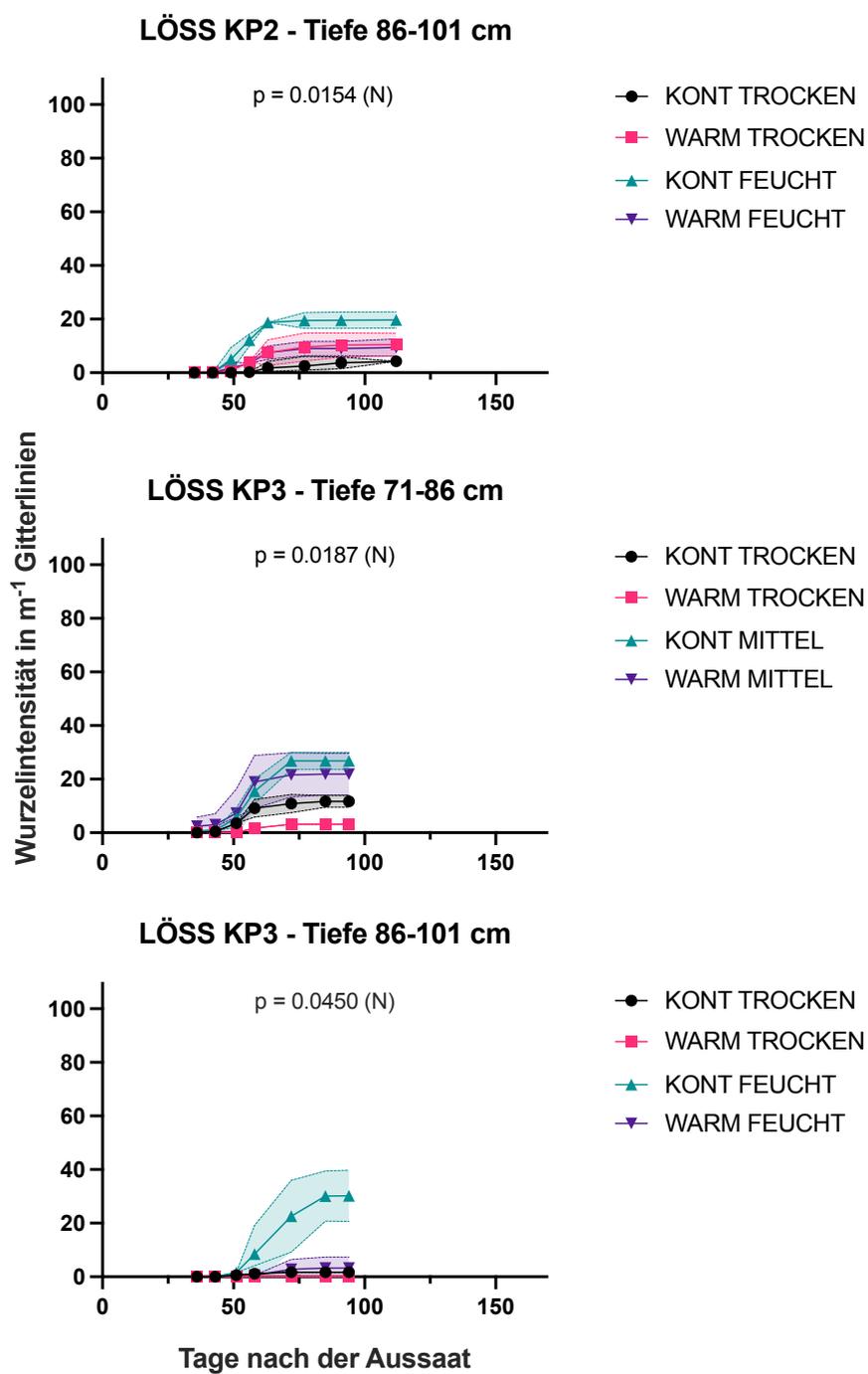


Abbildung 40: Einfluss der Niederschlagsstufen auf die Wurzelintensität

Aufgetretene signifikante Unterschiede zwischen den Niederschlagsstufen (N) in Kulturphase 2 und 3.

Eidesstattliche Erklärung / *Declaration under Oath*

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare under penalty of perjury that this thesis is my own work entirely and has been written without any help from other people. I used only the sources mentioned and included all the citations correctly both in word or content.

Datum / *Date*

Unterschrift des Antragstellers / *Signature of the applicant*

Wissenschaftlicher Lebenslauf

Ken Uhlig

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6777-4831>

Akademischer Werdegang

- | | |
|-----------|---|
| 2019-2024 | Promotion
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Forschungsthema: „Untersuchungen zu Auswirkungen der Wärmeausbreitung in Böden Sachsen-Anhalts und Thüringens im Trassenverlauf des SuedOstLinks – Säulenversuche“ |
| 2014-2016 | Master of Science
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Nutzpflanzenwissenschaften, Masterarbeit: „Bio-Vegane Landwirtschaft - Relevanz der bio-vegane Landwirtschaft und Bewertung der Nachhaltigkeit mit Hilfe des Betriebsmanagementsystems REPRO“ |
| 2006-2010 | Diplom Gartenbauingenieur
Fachhochschule Erfurt, Diplomarbeit: „Histologische Untersuchungen von wachstumsregulatorinduzierten Regenerationsprozessen in Samenanlagen von <i>Cyclamen persicum</i> in vivo und in vitro“ |

Akademische Tätigkeiten

- | | |
|----------------------------------|---|
| 2022-aktuell | Wissenschaftlicher Mitarbeiter , Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, allg. Pflanzenbau / Ökolandbau |
| 2019-2022 | Doktorand , Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, allg. Pflanzenbau / Ökolandbau |
| 2018-2019
(mit Unterbrechung) | Wissenschaftlicher Mitarbeiter , Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Leipzig, Department Molekulare Systembiologie, Mikrobiombiologie, Vorbereitung Bewerbung DBU Stipendium |
| 2015-2016 | Studentische Hilfskraft , Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Halle, Department Biozönoseforschung |

Wintersemester 2015/2016	Forschungspraktikum , Leibniz-Institut für Pflanzenbiochemie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Ertragsphysiologie der Kulturpflanzen
Wintersemester 2015/2016	Forschungspraktikum , Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Pflanzenernährung
Wintersemester 2009/2010	Forschungspraktikum , Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau, Erfurt

Forschungstätigkeit

09/2022	Work-Shadowing , University of Copenhagen, Section for Crop Sciences, Erfahrungsaustausch Langzeit-Feldversuche
04/2022- 12/2022	Projektverlängerung „Untersuchungen zu Auswirkungen der Wärmeausbreitung in Böden Sachsen-Anhalts und Thüringens im Trassenverlauf des SuedOstLinks – Säulenversuche“ im Auftrag von 50Hertz Transmission GmbH. Beantragung, Projektbearbeitung, Durchführung
04/2019- 04/2022	„Untersuchungen zu Auswirkungen der Wärmeausbreitung in Böden Sachsen-Anhalts und Thüringens im Trassenverlauf des SuedOstLinks – Säulenversuche“ im Auftrag von 50Hertz Transmission GmbH. Projektbearbeitung, Durchführung

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Tagungen

2024 Rennes Vortrag	18th Congress of the European Society for Agronomy: Synergies for a resilient future: from knowledge to action K.Uhlig, J.Rücknagel, Janna Macholdt. 2023: A soil odyssey - HeAted soil-Monoliths (HAL-Ms) to examine the effect of heat emission from HVDC underground cables on plant growth
2023 Halle Vortrag	Tagung der Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (DBG) Böden - divers & multifunktional K.Uhlig, J.Rücknagel, Janna Macholdt. Wärmeemission von unterirdischen Hochspannungsleitungen beeinflusst Boden und Ackerkulturen - Abschlussergebnisse aus vier Kulturphasen

2023 Göttingen Poster	<p>Conference: 64. Conference of Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. (GPW) "Digital tools, big data, modeling and sensing methods for sustainable and climate smart crop and grassland systems" At: University Göttingen</p> <p>K.Uhlig, J.Rücknagel, Janna Macholdt. Heat emission from high voltage direct current (HVDC) underground cables affects crop plants – results from 4 growth phases (GP)</p>
2022 Leipzig Poster	<p>Frontiers in experimental research on changing environments UFZ Leipzig</p> <p>K.Uhlig, J.Rücknagel, Janna Macholdt. Heat emission from High Voltage Direct Current (HVDC) underground cables affects soils and crops - Results from an innovative greenhouse trial</p>
2022 Trier Poster	<p>Tagung der Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft</p> <p>05. bis 08. September 2022 Trier „Grenzen überwinden, Skalen überschreiten“</p> <p>K.Uhlig, J.Rücknagel. Unterirdische Hochspannungsleitungen und die Wärmeemission - Ergebnisse aus drei Kulturphasen</p>
2021 Rostock Poster	<p>63. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V. 28. bis 30. September 2021 Rostock “Closing the Cycle”</p> <p>K.Uhlig, J.Rücknagel. Beeinflusst die Wärmeemission von unterirdischen Hochspannungsleitungen Boden und Kulturpflanzen? In: Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 32: 199–200 (2021)</p>
Journals	
2024 Im Reviewprozess	<p>K.Uhlig, J.Rücknagel, J. Macholdt. 2023: A Soil Odyssey - Heated soil-Monoliths (HAL-Ms) to examine the effect of heat emission from HVDC underground cables on plants growth. <i>Plant Methods</i></p>
2025 in Vorbereitung	<p>K.Uhlig, J.Rücknagel, J. Macholdt. Out of sight out of mind - Influence of heat from HVDC underground cables on a crop rotation of spring barley, sugar beet, spring wheat and lucerne. <i>European Journal of Soil Science (EJSS)</i></p>