

**Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde**

**Entwicklung einer Handlungsempfehlung zur Herstellung und  
zum langfristigen Erhalt der Bodenfunktionalität bei  
Erdbestattungen in repräsentativen hydrogeologischen Gebieten  
von Deutschland**

**Abschlussbericht  
Az.: 31344/01**

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

**Prof. Prof. h.c. Dr. Dr. h.c. mult. Rainer Horn**

**Dr. Heiner Fleige**

**Dr. Iris Zimmermann**

**Dr. Anneka Mordhorst**

**Dipl.-Geoökol. Stefan Filser**

**24. April 2017**

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>31344/01</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>280.078,00 €</b>
----	-----------------	---------	-----------	-------------	---------------------

**Antragstitel**      **Entwicklung einer Handlungsempfehlung zur Herstellung und zum langfristigen Erhalt der Bodenfunktionalität bei Erdbestattungen in repräsentativen hydrogeologischen Gebieten in Deutschland**

**Stichworte**      Boden  
Grundwasser

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>36 Monate</b>	<b>19.08.2013</b>		

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde	Tel	0431 8802573
		Fax	0431 8802940
		Projektleitung	Prof. Dr. Dr. h.c. R. Horn
		Bearbeiter	C. Rambow
	Olshausenstr. 40 24118 Kiel		

**Kooperationspartner**      Cemterra GmbH  
48165 Münster

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Grabarbeiten bei Erdbestattungen führen zu einer Störung oder auch Zerstörung des für den Gastransport wichtigen sekundären Porensystems von Böden. Durch Grabarbeiten findet aber auch eine Lockerung des geschütteten Bodens statt, allerdings kann diese in Folge von häufig eintretender Sackung nicht dauerhaft erhalten werden. Ein gestörter Gashaushalt begünstigt wiederum eine langsame, oder auch ausbleibende Verwesung der Leiche (Bildung von Wachsleichen). Friedhöfe stellt dies vor planerische und auch finanzielle Probleme, da die üblichen Sanierungsmaßnahmen (Bodenaustausch, Grabkammern, etc.) kostenintensiv sind. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher die Eignung von Branntkalk zur Strukturmelioreation des bei Grabarbeiten geschütteten Bodens untersucht.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

An fünf Standorten mit Böden unterschiedlicher Genese und Textur wurden jeweils zwei Grabsimulationen angelegt (ohne und mit Einmischen von Branntkalk). Zusätzlich wurde ein Langzeitversuch aus dem Vorgängerprojekt (DBU Az.: 20933/03) weitergeführt. Um Aussagen zur Sauerstoffversorgung in den Grabsimulationen treffen zu können, standen Messungen zum Bodengas- und Bodenwasserhaushalt im Vordergrund. Messungen im Feld wurden durch Monitoring von Matrixpotentialen mit Tensiometern und der Bodengaszusammensetzung durch Entnahme von Bodenluft mit einem portablen O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Handanalysator durchgeführt. An ungestörten Bodenproben wurden im Labor die gesättigte Wasserleitfähigkeit, Luftleitfähigkeit, Diffusivität und die Wasserspannungskurve gemessen. Aus diesen Messwerten wurden Indices zur Porenfunktionalität (Kontinuität und Tortuosität) berechnet, die für einen Vergleich der Grabsimulationen herangezogen wurden. Um negative Auswirkungen von Branntkalk auf die Bodenfauna ausschließen zu können, wurde die Bodenrespirationsrate als Maß für die biologische Aktivität gemessen.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Das Einarbeiten von Branntkalk in den Bodenaushub führt im Vergleich zum Verfüllen ohne Branntkalk auf allen Standorten zu einer Erhöhung der Luftkapazität, gesättigten Wasserleitfähigkeit, Luftleitfähigkeit und der Diffusivität. Die lockere Schüttung des Bodens konnte beim Verfüllen der Grabsimulationen durch das Einmischen Branntkalk erhalten werden und nachfolgende Sackungen reduziert, teilweise auch verhindert werden. Die stabilisierende Wirkung konnte auch nach 33 Monaten noch nachgewiesen werden, ging aber bei erneuten Grabarbeiten unter nassen Bedingungen verloren. Eine negative Beeinträchtigung der biologischen Aktivität konnte nicht festgestellt werden. Das stabilisierte Porensystem reichte zwar in seiner Qualität nicht an ein natürlich gewachsenes sekundäres Porensystem heran (kaum präferenzielle Fließwege und dadurch höhere Matrixpotentiale) war in seiner Funktionalität für den Gasaustausch aber mit einem natürlichen Porensystem vergleichbar. Dies zeigte sich in geringerer Porentortuosität und höherer Porenkontinuität in den mit Branntkalk behandelten Grabsimulationen. An allen Standorten konnte auch ein höherer Sauerstoffgehalt bis in größere Tiefen durch die Melioration festgestellt werden. Entscheidend für den Erfolg der Meliorationsmaßnahme waren weniger der Ausgangswasser-gehalt des Bodens oder dessen Textur als vielmehr eine gleichmäßige Durchmischung von Boden und Branntkalk. Dies war bei bindigen Böden erschwert und erforderte ein schrittweises Ausbaggern der Gruben, um die Bildung großer Schollen zu vermeiden. Neigen Standorte zu Staunässebildung wurde dies auch in beiden Grabsimulationen festgestellt. Die Melioration mit Branntkalk stellt damit keine Alternative zu Drainagen dar.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Filser, S., Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2015). „Branntkalk zur Strukturmeli- oration von geschüttetem Boden“. In: Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, München. Berichte der DGB.

Filser, S., Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2016). „Stabilisierung von Bodenaushub bei Erdbestattungen“. Marktreidwitzer Bodenschutztag, Tagungsband 9, S. 85-87.

Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2017) (in press). Changes in soil aeration and soil respiration of simulated grave soils after quicklime application. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim, DOI:10.1002/jpln.201600351

Filser, S., Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2015). „Branntkalk zur Strukturmeli- oration von geschüttetem Boden“. Vortrag. Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Mün- chen.

Filser, S., Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2015). „Soil backfill stabilisation with quicklime“. Poster. SUSTAIN-Tagung, Kiel.

## **Fazit**

Die Meliorationsmaßnahme mit Branntkalk konnte auf allen Standorten erfolgreich angewendet werden. Eine Handlungsempfehlung mit genauen Schritten zur Durchführung wurde entwickelt. Das Einmischen des Branntkalkes konnte in den Arbeitsablauf bei Bestattungen integriert werden und die entwickelte Me- thodik zum Anlegen von Gräbern kann von Friedhofsmitarbeitern selbst und zu geringen Kosten durchge- führt werden. Es kann das am jeweiligen Standort zur Verfügung stehende Bodenmaterial weiter verwen- det werden, ein Austausch und damit verbundener Abtransport sind nicht notwendig.

---

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	viii
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	ix
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>3 Vorhabendurchführung und -ergebnisse</b>	<b>6</b>
3.1 Versuchsaufbau und Probennahme . . . . .	6
3.2 Laboruntersuchungen . . . . .	7
3.2.1 Wasserspannungskurve, Trockenrohdichte und Festsubstanz- dichte . . . . .	7
3.2.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit . . . . .	7
3.2.3 Gasdiffusivität . . . . .	7
3.2.4 Luftleitfähigkeit und abgeleitete Porenfunktionsindizes . . . . .	8
3.2.5 Respirationsrate . . . . .	8
3.3 Felduntersuchungen . . . . .	9
3.3.1 Monitoring der Matrixpotentiale . . . . .	9
3.3.2 Bodengasmessungen . . . . .	9
3.4 Statistische Auswertung . . . . .	9
3.5 Versuchsstandorte . . . . .	10
3.5.1 Fehmarn . . . . .	10
3.5.2 Hannover . . . . .	10
3.5.3 Klein-Altendorf . . . . .	11
3.5.4 Frankfurt am Main . . . . .	12
3.5.5 Hohenschulen . . . . .	13
3.6 Ergebnisse . . . . .	14
3.6.1 Fehmarn . . . . .	14
3.6.2 Hannover . . . . .	21
3.6.3 Klein-Altendorf . . . . .	29
3.6.4 Frankfurt am Main . . . . .	38
3.6.5 Hohenschulen . . . . .	40
3.7 Diskussion der Ergebnisse . . . . .	44
3.8 Handlungsempfehlung . . . . .	49
3.9 Verbreitung der Vorhabensergebnisse . . . . .	51
<b>4 Fazit</b>	<b>52</b>

---

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>A Anhang</b>	<b>VI</b>
A.1 Profilbilder . . . . .	VI
A.2 Trockenrohdichte und Luftkapazität . . . . .	VII
A.3 $C_2$ - und $C_3$ -Indizes . . . . .	XI
A.4 Diffusivität . . . . .	XV

---

## Abbildungsverzeichnis

1	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ )) für den Standort Fehmarn klassifiziert nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	14
2	Luftleitfähigkeit (Luftleitfähigkeit ( $k_l$ )) bei $\psi_m = -60$ hPa klassifiziert nach DVWK (1997) für den Standort Fehmarn. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	15
3	$C_2$ -Index (links) und $C_3$ -Index (rechts) ( $\psi_m = -60$ hPa) für den Standort Fehmarn, mit der Einstufung für $k_l$ nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ). . . . .	15
4	Wasserspannungskurven für den Standort Fehmarn, mit den Bereichen der weiten Grobporen (wGP), engen Grobporen (eGP) und Mittelporen (Mittelporen (MP)). . . . .	16
5	Relativer Diffusionskoeffizient ( $D_S/D_O$ ) von ungestörten Bodenproben aus 50 und 90 cm Tiefe am Standort Fehmarn zu unterschiedlichen Beprobungsterminen nach Verfüllen der Gruben bei $\psi_m = -60$ hPa. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	17
6	Respirationsrate von ungestörten, inkubierten Bodenproben aus 50 und 90 cm Tiefe am Standort Fehmarn bei $\psi_m = -60$ hPa, $n = 6$ . . . . .	18
7	Standort Fehmarn März 2015 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), $CO_2$ -Konzentration (D) und $O_2$ -Konzentration (E) in 50 cm, $CO_2$ -Konzentration (F) und $O_2$ -Konzentration (G) in 135 cm Tiefe. . . . .	20
8	Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) für den Standort Hannover klassifiziert nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	21
9	Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) bei $\psi_m = -60$ Hektopascal (hPa) klassifiziert nach DVWK (1997) für den Standort Hannover. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	22

10	$C_2$ -Index (links) und $C_3$ -Index (rechts) ( $\psi_m = -60$ hPa) für den Standort Hannover, mit der Einstufung für $k_l$ nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ). . . . .	22
11	Wasserspannungskurven für den Standort Hannover, mit den Bereichen der weiten Grobporen (wGP), engen Grobporen (eGP) und Mittelporen (MP). . . . .	23
12	Relativer Diffusionskoeffizient ( $D_s/D_0$ ) in 50 und 90 cm Bodentiefe am Standort Hannover bei $\psi_m = -60$ hPa. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	23
13	Respirationsrate von ungestörten, inkubierten Bodenproben aus 50 und 90 cm Tiefe am Standort Hannover bei $\psi_m = -60$ hPa, $n = 6$ . . .	24
14	Standort Hannover Dezember 2014 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), $CO_2$ -Konzentration (D) und $O_2$ -Konzentration (E) in 50 cm, $CO_2$ -Konzentration (F) und $O_2$ -Konzentration (G) in 135 cm Tiefe. . . . .	28
15	Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) für den Standort Klein-Altendorf 1 klassifiziert nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	29
16	Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) bei $\psi_m = -60$ hPa klassifiziert nach DVWK (1997) für den Standort Klein-Altendorf 1. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	30
17	$C_2$ -Index (links) und $C_3$ -Index (rechts) für den Standort Klein-Altendorf 1, mit der Einstufung für $k_l$ nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ). . . . .	30
18	Wasserspannungskurven für den Standort Klein-Altendorf 1, mit den Bereichen der weiten Grobporen (wGP), engen Grobporen (eGP) und Mittelporen (MP). . . . .	31
19	Standort Klein-Altendorf 1 Dezember 2014 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), $CO_2$ -Konzentration (D) und $O_2$ -Konzentration (E) in 50 cm, $CO_2$ -Konzentration (F) und $O_2$ -Konzentration (G) in 135 cm Tiefe. . . . .	32

20	gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) (links) und Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) bei -60 hPa (rechts) für den Standort Klein-Altendorf 2. Klassifizierung von $k_f$ nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und $k_l$ nach DVWK (1997). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	33
21	$C_2$ -Index (links) und $C_3$ -Index (rechts) ( $\psi_m = -60$ hPa) für den Standort Klein-Altendorf 2, mit der Einstufung für $k_l$ nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ). . . . .	34
22	Relativer Diffusionskoeffizient ( $D_s/D_0$ ) in 50 und 90 cm Bodentiefe am Standort Klein-Altendorf 1 und 2 bei $\psi_m = -60$ hPa. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	34
23	Respirationsrate von ungestörten, inkubierten Bodenproben aus 50 und 90 cm Tiefe am Standort Klein-Altendorf 1 bei $\psi_m = -60$ hPa, $n = 6$ . . . . .	35
24	Monitoring am Standort Klein-Altendorf 2 für den Zeitraum Dezember 2014 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), $CO_2$ -Konzentration (D) und $O_2$ -Konzentration (E) in 50 cm, $CO_2$ -Konzentration (F) und $O_2$ -Konzentration (G) in 135 cm Tiefe. . . . .	37
25	Monitoring am Standort Frankfurt am Main für den Zeitraum Oktober 2014 bis Januar 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), $CO_2$ -Konzentration (D) und $O_2$ -Konzentration (E) in 50 cm, $CO_2$ -Konzentration (F) und $O_2$ -Konzentration (G) in 135 cm. . . . .	39
26	Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) (links) und Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) ( $\psi_m = -60$ hPa) (rechts) für den Standort Hohenschulen. Klassengrenzen für $k_f$ nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und $k_l$ nach DVWK (1997). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	40
27	$C_2$ -Index (links) und $C_3$ -Index (rechts) ( $\psi_m = -60$ hPa) für den Standort Hohenschulen, mit der Einstufung für $k_l$ nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ). . . . .	41
28	Wasserspannungskurven für den Standort Hohenschulen, mit den Bereichen der weiten Grobporen (wGP), engen Grobporen (eGP) und Mittelporen (MP). . . . .	41

29	Monitoring am Standort Hohenschulen für den Zeitraum September 2011 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), CO <sub>2</sub> -Konzentration (D) und O <sub>2</sub> -Konzentration (E) in 50 cm Tiefe. . . . .	42
30	Bodenprofile der Versuchsstandorte . . . . .	VI
31	Trockenrohdichte $\rho_t$ am Standort Fehmarn, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	VII
32	Luftkapazität LK am Standort Fehmarn, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	VII
33	Trockenrohdichte $\rho_t$ am Standort Hannover, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	VIII
34	Luftkapazität LK am Standort Hannover, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	VIII
35	Trockenrohdichte $\rho_t$ am Standort Klein-Altendorf 1, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	IX
36	Luftkapazität LK am Standort Klein-Altendorf 1, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	IX
37	Trockenrohdichte $\rho_t$ und Luftkapazität LK am Standort Klein-Altendorf 2, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	X

---

38	Trockenrohdichte $\rho_t$ und Luftkapazität LK am Standort Hohenschulen, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	X
39	$C_2$ -Index am Standort Fehmarn. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	XI
40	$C_3$ -Index am Standort Fehmarn. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	XI
41	$C_2$ -Index am Standort Hannover. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	XII
42	$C_3$ -Index am Standort Hannover. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	XII
43	$C_2$ -Index am Standort Klein-Altendorf 1. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	XIII
44	$C_3$ -Index am Standort Klein-Altendorf 1. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	XIII
45	$C_2$ - und $C_3$ -Index am Standort Klein-Altendorf 2. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	XIV
46	$C_2$ - und $C_3$ -Index am Standort Hohenschulen. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit * ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), ** ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), *** ( $p \leq 0,001$ ) und $\cdot$ ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben. . . . .	XIV
47	Standortspezifischer Zusammenhang zwischen luftgefülltem Porenvolumen ( $\Theta_a$ ) und Diffusivität ( $D_s/D_0$ ) der beprobten Tiefen 50 und 90 cm mit („CaO“) und ohne Zugabe von CaO („Null“) bei $\psi_m = -60$ hPa	XV

---

## Tabellenverzeichnis

1	Bodeneigenschaften am Standort Fehmarn . . . . .	10
2	Bodeneigenschaften am Standort Hannover . . . . .	11
3	Bodeneigenschaften am Standort Klein-Altendorf 1 . . . . .	12
4	Bodeneigenschaften am Standort Klein-Altendorf 2 . . . . .	12
5	Bodeneigenschaften am Standort Frankfurt a. M. . . . .	13
6	Luftgefülltes Porenvolumen ( $\Theta_a$ ), $C_1$ - und Tortuositätsindices in 50 und 90 cm Bodentiefe für den Standort Fehmarn bei $\psi_m = -60$ hPa, MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung. . . . .	17
7	pH-Wert, organischer Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) und Calciumcarbonatgehalt ( $CaCO_3$ ) der beprobten Tiefen 50 und 90 cm am Standort Fehmarn , MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung, n = 6. . . . .	19
8	Luftgefülltes Porenvolumen ( $\Theta_a$ ), $C_1$ - und Tortuositätsindices in 50 und 90 cm Bodentiefe für den Standort Hannover bei $\psi_m = -60$ hPa, MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung. . . . .	25
9	pH-Wert, organischer Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) und Calciumcarbonatgehalt ( $CaCO_3$ ) der beprobten Tiefen 50 und 90 cm am Standort Hannover , MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung, n = 6. . . . .	26
10	Luftgefülltes Porenvolumen ( $\Theta_a$ ), $C_1$ - und Tortuositätsindices in 50 und 90 cm Bodentiefe für den Standort Klein-Altendorf bei $\psi_m = -60$ hPa, MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung, n=3-4. . . . .	35
11	pH-Wert, organischer Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) und Calciumcarbonatgehalt ( $CaCO_3$ ) der beprobten Tiefen 50 und 90 cm am Standort Klein-Altendorf 1 , MW=arithmetischer Mittelwert, STA =Standardabweichung, n = 6. . . . .	36
12	Meliorationsmaßnahmen in Abhängigkeit von Bodenart und Grund-/Stauwassereinfluß . . . . .	49

---

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

$C_2$	Kontinuitätsindex
$C_3$	Kontinuitätsindex
$\text{CaCO}_3$	Calciumcarbonat
$\text{CaO}$	Branntkalk
„CaO“	Branntkalkvariante
$\text{Ca(OH)}_2$	Löschkalk
CAH	Calciumaluminathydrate
$\text{CO}_2$	Kohlenstoffdioxid
$C_{\text{org}}$	organischer Kohlenstoff
CSH	Calciumsilikathydrate
$D_0$	Gasdiffusionskoeffizient des Bodens
$D_s$	Gasdiffusionskoeffizient in freier Luft
$D_0/D_s$	relativer Diffusionskoeffizient des Bodens (Diffusivität)
eGP	enge Grobporen
$\eta$	dynamische Viskosität
$g$	Erdbeschleunigung
GPV	Gesamtporenvolumen
hPa	Hektopascal
$k_a$	Luftpermeabilität
$k_f$	gesättigte Wasserleitfähigkeit
$k_l$	Luftleitfähigkeit
kg	Kilogramm
LK	Luftkapazität
m	Meter
ix	

---

MP	Mittelporen
„Null“	Nullvariante
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
$\rho_l$	Dichte von Luft
$\rho_s$	Festsubstanzdichte
$\rho_t$	Trockenrohdichte
„Ref“	Referenzvariante
$\tau$	Tortuositätsindex
$\Theta$	Wassergehalt
$\Theta_a$	luftgefülltes Porenvolumen
$\psi_m$	Matrixpotential
wGP	weite Grobporen

---

# 1 Zusammenfassung

Grabarbeiten bei Erdbestattungen führen zu einer Störung oder auch Zerstörung des für den Gastransport wichtigen sekundären Porensystems des Bodens. Durch Grabarbeiten findet aber auch eine Lockerung des geschütteten Bodens statt. Allerdings kann diese in Folge von häufig eintretenden Sackungen nicht dauerhaft erhalten werden. Ein gestörter Gashaushalt begünstigt wiederum eine langsame, oder auch ausbleibende Verwesung der Leiche (Bildung von Wachsleichen). Friedhöfe stellt dies vor planerische und auch finanzielle Probleme, da die üblichen Sanierungsmaßnahmen (Bodenaustausch, Grabkammern, etc.) kostenintensiv sind. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher die Eignung von Branntkalk zur kostengünstigen Strukturmelioration von geschüttetem Boden untersucht. Hierfür wurden an fünf Standorten jeweils zwei Grabsimulationen angelegt (ohne und mit Einmischung von Branntkalk in den Boden). Zusätzlich wurde ein Langzeitversuch aus dem Vorgängerprojekt (DBU Az.: 20933/03) weitergeführt. Um Aussagen zur Sauerstoffversorgung in den Grabsimulationen treffen zu können, standen Messungen zum Bodengas- und Bodenwasserhaushalt im Vordergrund. Die Messungen wurden im Feld, mittels Monitoring von Matrixpotentialen und der Bodengaszusammensetzung, und im Labor an Stechzylinderproben durchgeführt.

Das Einarbeiten von Branntkalk in den Bodenaushub führt im Vergleich zum Verfüllen ohne Branntkalk auf allen Standorten zu einer Erhöhung der Luftkapazität, gesättigten Wasserleitfähigkeit, Luftleitfähigkeit und der Diffusivität. Die lockere Schüttung des Bodens beim Verfüllen der Grabsimulationen konnte durch die Zugabe von Branntkalk erhalten und nachfolgende Sackungen reduziert, teilweise auch verhindert werden. Das durch Grabarbeiten künstlich geschaffene und durch Branntkalk stabilisierte Porensystem konnte das natürliche sekundäre Porensystem in seiner Funktion für den Gastransport ersetzen. Eine Handlungsempfehlung mit genauen Schritten zur Durchführung der Meliorationsmaßnahme wurde entwickelt. Die entwickelte Methodik zum Anlegen von Gräbern kann von Friedhofsmitarbeitern selbst und kostengünstig durchgeführt werden. Es kann das am jeweiligen Standort zur Verfügung stehende Bodenmaterial verwendet werden, ein Austausch und damit verbundener Abtransport sind nicht notwendig.

Die entwickelte Methodik wird als praxistauglich angesehen und kann somit angewendet werden. Da bisher die Wirkung von Branntkalk an Grabsimulationen ohne Leichnam (CO<sub>2</sub>-Quelle) untersucht wurde, wäre eine Übertragung der angewendeten Methodik auf reale Erdbestattungen von Interesse. Durch weitere Beprobungen der Versuchsstandorte könnten Aussagen zur Strukturentwicklung verschiedener Böden und der Langzeitwirkung der Meliorationsmaßnahme getroffen werden.

Kooperationspartner: Cemterra GmbH, Münster

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Az.: 31344/01

---

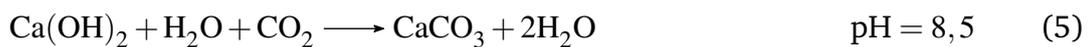
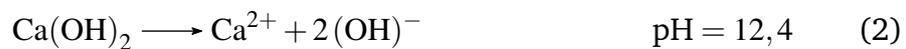
## 2 Einleitung

Steht bei Erdbestattungen für die Verwesung des Leichnams nicht genügend Sauerstoff zur Verfügung kommt es zur Bildung von Wachsleichen (Schoenen und Schoenen 2013), die innerhalb einer Ruhefrist von ca. 30 Jahren nicht abgebaut werden. Dies erschwert die Wiederbelegung eines Grabes nach Ablauf der Ruhefrist. Ursachen hierfür sind u.a. zu geringer Sauerstofftransport durch den Boden oder ein Abbruch des Transportes durch Stauwasser im Grab. Bisherige Lösungsansätze sehen einen Austausch von nicht geeignetem Bodenmaterial oder den Einbau von Grabkammern als Sanierungsmaßnahmen vor. Beides stellt Friedhöfe vor planerische und finanzielle Probleme. Zur vollständigen Verwesung eines 75 kg Leichnams sind nach Schoenen und Schoenen (2013) 28-77 kg Sauerstoff (abhängig vom Körperfettanteil) notwendig. Dent et al. (2004) geben an, dass nach der Bestattung nur 150-200 g Sauerstoff, die sich im Sarginnenraum und in dem geschütteten Boden um den Sarg befinden, für eine aerobe Verwesung des Leichnams zur Verfügung stehen. Der darüber hinaus notwendige Sauerstoff muss damit durch Diffusion und Konvektion von der Bodenoberfläche durch die Überdeckung aus geschüttetem Boden zum Sarg transportiert werden.

Abgesehen von reinen Sandböden erfolgt Sauerstofftransport in natürlichen Böden hauptsächlich in Poren, die durch die Bodenstruktur vorgegeben werden. Diese Poren werden unter dem Begriff Sekundärporen zusammengefasst und setzen sich aus Bioporen, Schrumpf- und Scherrissen zusammen (Hartge und Horn 2014), die auch als Interaggregatporen bezeichnet werden. Durch Grabarbeiten werden kontinuierliche und hauptsächlich vertikal ausgerichtete Bioporen zerstört und es verbleiben, auch durch Grabarbeiten (Lockerung) neu geschaffene Interaggregatporen für den Sauerstofftransport von der Bodenoberfläche zum Sarg. Ob diese Interaggregatporen erhalten bleiben, hängt von der Aggregatstabilität des Ausgangsmaterials während des Verfüllens und dem Auftreten von Sackungen nach Verfüllen des Grabes ab. Übersteigen die auf den Boden einwirkenden Kräfte die Eigenstabilität der Aggregate, kommt es zur Homogenisierung und Strukturverlust des Bodens (Horn et al. 1994). Nach Willatt (1987) nimmt zudem die Stabilität von Aggregaten mit steigendem Wassergehalt ab. So kann bei hohem Wassergehalt bereits beim Ausheben von Gruben Bodenverdichtung auftreten (Ramsay 1986). Der Stabilitätsverlust führt zu einem Verschmelzen oder Kollabieren von Aggregaten, das sich negativ auf das Volumen von Interaggregatporen auswirkt (Ghezzehei und Or 2000). Darüber hinaus können Interaggregatporen durch Bodenpartikel verfüllt werden (Kwaad und Mu 1994). Es ist mit einem Verlust an Porenvolumen, aber vor allem mit einem Verlust an Porenkontinuität zu rechnen. Erfolgen die Grabarbeiten unter trockenen Bedingungen, bleiben die vorhandenen Aggregate besser erhalten, bei späterer Durchnässung (Aufsättigung) des Bodens kann dennoch ein Porenvolumen- und Porenkontinuitätsverlust

durch Sackung eintreten. Durch die mit der Tiefe steigende Auflast sind hiervon besonders tieferliegende Bereiche der Schüttung betroffen (Hartge 1969). Besonders anfällig für Sackungen sind nach Li et al. (2016) Lössböden, da Lösspartikel häufig über Tonminerale verkittet werden und diese Verbindung nicht wasserstabil sind.

Wie bisherige Untersuchungen zeigen, kann das Bodengefüge durch Branntkalk (CaO) stabilisiert werden. Nach Witt (2002) finden zwischen CaO und Boden folgende Reaktionen statt:



Es kann dabei zwischen Sofortreaktion (Gleichungen 1 und 2) und Langzeitreaktion (Gleichungen 3-5) differenziert werden. In der Sofortreaktion reagiert CaO mit Bodenwasser unter starker Wärmeentwicklung (Gl. 1). Dabei werden 0,32 kg H<sub>2</sub>O pro kg CaO chemisch gebunden, ein weiterer Wasserentzug findet infolge der Wärmeentwicklung durch Verdunstung statt (Horn und Stępniewski 2004), wodurch Wasserspannungen zunehmen und sich die Aggregatstabilität erhöht. Der entstandene Löschkalk (Ca(OH)<sub>2</sub>) dissoziiert in Wasser und es können pH-Werte über 12 auftreten (Metelková et al. 2012). Daneben wird die Konzentration von Ca<sup>2+</sup>-Ionen in der Bodenlösung erhöht. Dies führt zu einer Komprimierung der elektrischen Doppelschicht um Tonminerale (Mahanta et al. 2014) und zu deren Flockung und Aggregation (Al-Mukhtar et al. 2014). Nach Sweeney et al. (1988) reduziert sich dadurch das Quellvermögen von Tonen, das Schrumpfungsvermögen jedoch nicht (Stoltz et al. 2012). Durch die pH-Wert Erhöhung nimmt die Löslichkeit von Silikaten und Aluminaten zu (Loughnan 1969) und es bilden sich Calciumsilikathydrate (CSH) und Calciumaluminathydrate (CAH) (Bérubé et al. 1990), dies wird auch als puzzolanische Reaktion bezeichnet (Witt 2002). Ist Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) vorhanden, wird auch Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>) gebildet. Nach Abschluss dieser Reaktion stellt sich abhängig vom CO<sub>2</sub>-Gehalt der Bodenluft ein maximaler pH-Wert von ca. 8,5 ein (Fiedler 2001). Nach Bérubé et al. (1990) finden diese Mineralneubildungen an den Oberflächen von Partikeln statt und führen zu deren Verkittung. Bohne et al. (1979) zeigten an Dünnschliffen, dass die stabilisierende Wirkung von CaO auf Mineralneubildungen, die zur Bildung von Krusten und Brücken zwischen Partikeln führen, beruht. Beese et al. (1979) sehen aber bereits in der Flockung von Tonmineralen eine Gefügestabilisierung.

---

Eine Stabilisierung von Aggregaten durch CaO haben Czeratzki (1957), Czeratzki (1972), Keiblinger et al. (2016) und Sommer (1972) festgestellt. Auch wenn es sich bei diesen Arbeiten überwiegend um schluff- und tonreiche Böden handelte, wurde von Czeratzki (1972) die Wirksamkeit von CaO auch an einem Sandlöss mit einem Tongehalt von 7,8 % nachgewiesen. Eine durch CaO veringerte Sackungsneigung wurde von Bohne et al. (1979) (für Ton) und Hartge (1969) (für Löss) beschrieben. Scheffer (1972) stellte an einer Parabraunerde aus Löss eine Erhöhung der weiten Grobporen (wGP) durch Unterpflügen von CaO fest. Dies wurde auf die mechanische Lockerung und anschließende Stabilisierung des gelockerten Gefüges durch CaO zurückgeführt. Hartge und Ellies (1976) konnten an einem unter Zusatz von Branntkalk verfülltem Drängraben noch nach 2,5 Jahren einen höheren Anteil an wGP und höhere Infiltrationsraten feststellen. In Tiefenlockerungspartzen konnte durch Einarbeiten von CaO eine initiale Erhöhung der Saugspannung, eine höhere Infiltrationsrate und ein höherer Grobporenanteil erzielt werden (Wichtmann 1972). Durch Harrach et al. (1972) wurde keine meliorative Wirkung von CaO auf die Bodenstruktur festgestellt, es wird aber auf eine ungenügende Durchmischung als mögliche Ursache verwiesen. Auch Vetter und Klasink (1977) weisen auf die Notwendigkeit einer gleichmäßigen Einarbeitung von CaO zum Erzielen einer meliorativen Wirkung hin. Ein reines Aufstreuen von CaO hatte kaum Wirkung gezeigt.

Eine bei Grabarbeiten erzeugte lockere Schüttung, die durch CaO stabilisiert wurde, sollte damit im Vergleich zu einer nicht stabilisierten Schüttung einen höheren Anteil an weiten Grobporen aufweisen, die auch bei hohen Wassergehalten zum Gastransport beitragen. Ausgehend von dieser Annahme wurden folgende Projektziele definiert:

1. Die Entwicklung von Verfahren zum schonenden Wiedereinbau von Böden mit unterschiedlicher Textur im Rahmen von Erdbestattungen zur Gewährleistung einer für eine vollständige Verwesung im Erdgrab ausreichenden Sauerstoffversorgung.
2. Die Ermittlung der in Abhängigkeit von Textur und aktuellem Wassergehalt für eine erste Austrocknung des Bodenaushubs und eine langfristige Strukturmelioration benötigten CaO-Mengen und Abgrenzung von Böden, die für den Einsatz von CaO geeignet sind.

Daraus ergab sich folgende Aufgabenstellung:

- Anlage von künstlichen Erdgräbern in Böden unterschiedlicher Genese und Textur. An jedem Standort wurden der ungestörte Boden und ein (dem normalen Friedhofsbetrieb entsprechend) ohne Meliorationsmaßnahmen wieder verfülltes Erdgrab mit den folgenden Varianten verglichen:

- 
1. (mechanische) Zerstörung der bei den Grabarbeiten entstehenden Schleifschichten und Förderung der Bildung von Schrumpfrissen an Grabwänden und Grabsohle durch das Auftragen von CaO zur verbesserten Wasserableitung aus dem Grabraum.
  2. Zusätzliche Vermischung des Bodenaushubs mit CaO zur schnellen Austrocknung vor dem Wiederverfüllen des Grabes und zur anhaltenden Strukturmelioreation nach dem Verfüllen des Grabes.
- Regelmäßige Entnahme von ungestörten Bodenproben zur Bestimmung der mechanischen Stabilität, der Gasdiffusion, der Luftleitfähigkeit, der Wasserleitfähigkeit, des Wasserretentionsvermögens und der Porengeometrie der geschütteten Böden in Abhängigkeit von Textur und Menge des zugegebenen Branntkalks; sowie Dokumentation der zeitlichen Entwicklung dieser Parameter (Strukturentwicklung).
  - Monitoring von Matrix- und Redoxpotentialen in den künstlichen Erdgräbern zur Dokumentation von Wasserhaushalt und Sauerstoffverfügbarkeit.
  - Regelmäßige Gasmessungen ( $O_2$  und  $CO_2$ ) in situ bis 135 cm Tiefe (übliche Lage des Sarges), um einen quantifizierbaren Hinweis auf die Funktionalität des Verfahrens zu erhalten.

---

## 3 Vorhabensdurchführung und -ergebnisse

### 3.1 Versuchsaufbau und Probennahme

Der Versuchsaufbau bestand aus drei Varianten, die auf einer ca. 50 m<sup>2</sup> umfassenden Fläche angelegt wurden:

1. eine Referenzvariante („Ref“), die nicht umgegraben wurde,
2. eine Nullvariante („Null“), die ausgebaggert und wieder verfüllt wurde,
3. eine Branntkalkvariante („CaO“), in deren Aushub 20 kg CaO m<sup>-3</sup> eingemischt wurden.

Die für die einzelnen Varianten angelegten Gruben hatten eine Länge von 9 m, eine Breite von 2 m und waren 1,6 m tief. Das Ausheben erfolgte mit unterschiedlichen am jeweiligen Standort zur Verfügung stehenden Baggern. Da die erwünschte Strukturentwicklung nach Harrach et al. (1972) und Vetter und Klasink (1977) von einer möglichst homogenen Einmischung von CaO abhängt, wurde hierauf besonders geachtet. Wegen der geringeren Staubentwicklung wurde gekörnter Branntkalk (Korngröße von 0-6 mm) mit CaO-Gehalten von 55 % und 77 % verwendet. Die aufzuwendende Menge Branntkalk wurde aus dem zu erzielenden Verhältnis von 20 kg (Rein-)CaO pro m<sup>3</sup> Boden berechnet. Diese Menge entspricht 0,6 m<sup>3</sup> CaO pro m<sup>3</sup> Boden, bzw. bei einer mittleren Trockenrohdichte des Bodens von 1,5 g cm<sup>-3</sup> ca. 1,3 kg CaO pro kg Boden.

Bereits während des Ausbaggerns wurde CaO kontinuierlich auf die auszuhebende Fläche gestreut. Die aufzuwendende Menge CaO war dadurch beim Abschluss der Aushubarbeiten in den Aushub eingemischt. Damit erfolgte eine erste Vermischung schon beim Ausheben, eine zweite beim Ablegen des Schüttgutes auf dem Aushubhaufen und eine dritte beim Wiederverfüllen der Grube. Zum Verfüllen von „Null“ wurde der gesamte Aushub wieder verwendet, und es entstand ein Grabhügel von ca. 20 cm Höhe. Bei „CaO“ wurde soviel Material verfüllt, dass ein zu „Null“ vergleichbarer Grabhügel entstand. Dies führte zu einem Materialüberschuss von ca. 7 %. Beim Verfüllen der Gruben wurde darauf geachtet, den Boden nicht durch zusätzliche Lastaufbringung (z. B. durch die Baggerschaufel) zu verdichten.

Die Probennahmen erfolgten in 20, 50 und 90 cm Tiefe, um die Schüttung über dem Sarg möglichst vollständig abzubilden. Es wurden je Tiefe 20 ungestörte Proben mit 100 cm<sup>3</sup> Volumen entnommen. Außerdem wurden in 50 und 90 cm Tiefe je vier ungestörte Proben mit 470 cm<sup>3</sup> Volumen entnommen. Die Beprobung von „Ref“ fand einmalig zum Zeitpunkt des Versuchsaufbaus statt. Die Probennahmen in der Null- und Branntkalkvariante sollten nach Versuchsanlage in dreimonatigem Abstand erfolgen, die Beprobungstermine mussten jedoch nachträglich an den gegebenen Bodenfeuchtezustand angepasst werden.

### 3.2 Laboruntersuchungen

#### 3.2.1 Wasserspannungskurve, Trockenrohdichte und Festsubstanzdichte

Je Variante und Beprobungstiefe wurden zehn ungestörte Proben mit einem Volumen von  $100 \text{ cm}^3$  zur Bestimmung der Wasserspannungskurve verwendet. Die Proben wurden feldfeucht gewogen und anschließend über eine Woche kapillar aufgesättigt. Die Entwässerung auf die Stufen -5, -10, -20, -30 und -60 hPa erfolgte auf Sandbädern, die Stufen -150, -300 und -500 hPa auf Keramikplatten mit angeschlossenem Unterdruck, die Stufen -1000 und -15000 hPa in einer Überdruckapparatur. Zur Ermittlung der van Genuchten Parameter wurde das Programm SWRC-fit von Seki (2007) verwendet. Nach Abschluss der Entwässerung wurden die Proben bei  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet und durch Wiegen die Trockenrohdichte ( $\rho_t$ ) bestimmt. Die Festsubstanzdichte ( $\rho_s$ ) wurde pyknometrisch in Ethanol bestimmt und diente zusammen mit  $\rho_t$  der Bestimmung des Gesamtporenvolumens (GPV).

#### 3.2.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit  $k_f$  wurde je Variante und Tiefe an zehn ungestörten Proben mit  $100 \text{ cm}^3$  Volumen bestimmt. Diese wurden kapillar über eine Woche aufgesättigt und anschließend die Durchflussrate mit einem Haubenpermeameter nach Hartge (1966) unter instationären Bedingungen gemessen und daraus  $k_f$  berechnet. An jeder ungestörten Probe wurden drei Messwiederholungen durchgeführt.

#### 3.2.3 Gasdiffusivität

Die Sauerstoff-Diffusivität wurde in einem Doppelkammerexperiment (Rolston und Moldrup 2002) an ungestörten und auf Feldkapazität (- 60 hPa) vorentwässerten Stechzylinderproben (Volumen =  $471 \text{ cm}^3$ , Durchmesser = 10 cm, Höhe = 6 cm,  $n = 3 - 4$ ) ermittelt. Dabei befand sich die Bodenprobe zwischen zwei Kammern mit unterschiedlicher Sauerstoffkonzentration ( $C$ ) (0 % und 21 %  $\text{O}_2$ ), die mit Sauerstoff-Mikrosensoren (Unisense A/S) kontinuierlich aufgezeichnet wurde. In Abhängigkeit vom Diffusionskoeffizienten ( $D_s$ ) des Bodens erfolgte eine Angleichung der Gaskonzentrationen ( $C_{eq}$ ) in beiden Kammern nach bestimmter Zeit ( $t$ ) (Gleichung 6, beschrieben in Uteau et al. (2013)),

$$D_s = \frac{-\ln(\Delta C/2 \cdot C_{eq}) \cdot V \cdot L}{A \cdot t \cdot 2} \quad (6)$$

wobei  $A$  = Probenquerschnittsfläche,  $V$  = Volumen der Gaskammern und  $L$ =Länge der Probe bedeutet. Die Gasdiffusivität wird über einen relativen Diffusionskoeffizienten ( $D_s/D_0$ ) ausgedrückt, bei dem der Diffusionskoeffizient im Boden ( $D_s$ ) in Relation zu dem in freier Luft ( $D_0$ ) gesetzt wird.

### 3.2.4 Luftleitfähigkeit und abgeleitete Porenfunktionsindizes

Die Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) wurde an den auf -60 hPa entwässerten ungestörten Proben aus Abschnitt 3.2.1 unter stationären Bedingungen, bei einem Druckgradienten von 1 hPa gemessen. Angaben zum Messverfahren finden sich in Peth (2004). Aus  $k_l$ , der dynamischen Viskosität von Luft ( $\eta$ ), der Dichte von Luft ( $\rho_l$ ) und der Erdbeschleunigung ( $g$ ) wurde mit Gleichung 7 die Luftpermeabilität ( $k_a$ ) berechnet.

$$k_a = \frac{k_l \cdot \eta}{\rho_l \cdot g} \quad (7)$$

An den entwässerten Proben aus Abschnitt 3.2.1 wurde auch das luftgefüllte Porenvolumen  $\Theta_a$  bei -60 hPa bestimmt und mit Gleichung 8 bei bekannter  $k_a$  der  $C_2$ -Index nach Groenevelt et al. (1984) berechnet wird.

$$C_2 = \frac{k_a}{\Theta_a} \quad (8)$$

Der  $C_3$ -Index nach Groenevelt et al. (1984) wurde mit Gleichung 9 berechnet.

$$C_3 = \frac{k_a}{\Theta_a^2} \quad (9)$$

Nach Groenevelt et al. (1984) sind Unterschiede in  $C_2$  auf verschiedene Porenkontinuität und Porengrößenverteilung, Unterschiede in  $C_3$  jedoch nur auf verschiedene Porenkontinuität zurückzuführen.

Als ein Maß für den funktionalen Anteil an luftgefüllten Poren, der für den diffusiven Gastransport zur Verfügung steht, dient der Kontinuitätsindex  $C_1$  nach Ball et al. (1988):

$$C_1 = \frac{D_s}{D_0 \cdot \Theta_a^2} \quad (10)$$

Darüberhinaus wurde der Tortuositätsindex ( $\tau$ ) nach Moldrup et al. (2001) nach Gleichung 11 berechnet:

$$\tau = \sqrt{\frac{\Theta_a \cdot D_0}{D_s}} \quad (11)$$

Die Tortuosität beschreibt die Verlängerung der Fließstrecke (gewundene Pore) in relation zur direkten Fließstrecke (gerade Pore), d.h. der Gasfluss ist bei steigendem  $\tau$ -Wert aufgrund einer längeren Fließstrecke stärker verzögert.

### 3.2.5 Respirationsrate

Die Respirationsrate (Basalbodenatmung) wurde chemisch mit Hilfe einer CO<sub>2</sub>-Falle (Natronlauge) an ungestörten, auf Feldkapazität (- 60 hPa) vorentwässerten und über 10 Tage bei 22 °C bei Dunkelheit vorinkubierten Bodenzylindern (22 cm<sup>3</sup>,

### 3.3 Felduntersuchungen

---

n = 6) bestimmt. Das aus der Bodenprobe über 24 Stunden freigesetzte CO<sub>2</sub> wurde in einer luftdichten Respirationsskammer (800 cm<sup>3</sup>) in Natronlauge (0,05 M, 20 ml) absorbiert, so dass die Menge cm<sup>3</sup> über eine Rücktitration der unverbrauchten Natronlauge mit Salzsäure erfasst werden konnte (Pell et al. 2005). Die Bestimmung der 24-stündigen Respirationsrate erfolgte nach 10-tägiger Vorinkubation bei 22 °C („Tag 1“) und wurde nach 3 („Tag 3“) und 7 Tagen („Tag 7“) wiederholt.

Im Anschluss an die Respirationssmessungen wurde der pH-Wert in Calciumchlorid mittels pH-Meter sowie der Gehalt an Carbonat (CaCO<sub>3</sub>) gasvolumetrisch mit der Scheibler-Apparatur und organischem Kohlenstoff (C<sub>org</sub>) bei trockener Verbrennung bei 1200 °C coulometrisch mit der Ströhlein-Apparatur an jeder Probe ermittelt (Blume et al. 2010).

### 3.3 Felduntersuchungen

#### 3.3.1 Monitoring der Matrixpotentiale

In die drei untersuchten Varianten wurden im Feld in 50 cm und 135 cm Tiefe je zwei Tensiometer zur Messung der Matrixpotentiale ( $\psi_m$ ) eingebaut. Die Messung der  $\psi_m$  erfolgt im Minutentakt, wobei Stundenmittel in einem Datenlogger der Firma UGT (DL-102) gespeichert wurden.

#### 3.3.2 Bodengasmessungen

Die Entnahme von Bodengas erfolgte über PVC-Rohre mit einem Durchmesser von 18 mm, die am oberen Ende mit einem Ventil verschließbar, am unteren Ende offen und zusätzlich seitlich perforiert waren. Das offene Ende der Rohre befand sich in 50 cm, bzw. in 135 cm Tiefe. Je Variante und Tiefe wurden zwei Rohre verbaut. Mit einem portablen O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Handanalysator (Geotech G100) wurde bis zur Stabilisierung der Messwerte Bodenluft abgepumpt, dies war nach ca. einer Minute, bzw. bei ca. 100 ml abgepumpter Bodenluft, der Fall.

### 3.4 Statistische Auswertung

Zur Auswertung der Messergebnisse aus den Stechzylinderbeprobungen wurde die Statistiksoftware R (R Core Team 2016) verwendet. Nachdem eine Kreuzvalidierung der Daten nicht möglich war, wurde nach Schaarschmidt und Vaas (2009) eine Pseudoeinflussgröße definiert. Basierend auf einer graphischen Residuenanalyse, wurde die Normalverteilung der Daten und Homoskedastizität angenommen. Über Kontrastanalysen (Bretz et al. 2016) wurden die einzelnen Einflussgrößen auf Signifikanz getestet. Die Stärke der Signifikanz ist mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

## 3.5 Versuchsstandorte

### 3.5.1 Fehmarn

Der Versuch wurde auf einem ehemaligen Ackerstandort, der in eine Greeningfläche umgewandelt wurde, angelegt. Die angrenzenden Ackerflächen zeigten von Herbst bis Frühjahr stellenweise oberflächliche Staunässe. Am Standort wurde ein Normpseudogley aus Geschiebelehm über Geschiebemergel kartiert. Eine Übersicht der Bodeneigenschaften findet sich in Tab. 1. Auffallend war die grünliche Farbe, die teilweise schon im Sd-Horizont auftrat (siehe Abb. 30 im Anhang). Nach Schwarzer und Duphorn (2011) tritt auf Fehmarn olivgrüner bis grünlich-grauer Tarraston auf, der in Geschiebemergel eingemischt sein kann. Die hohen Tongehalte deuten dies ebenfalls an. Nach DWD Climate Data Center (CDC) (2016) lagen die Jahresniederschläge an der Station Fehmarn für die Jahre 1981-2010 bei 571 mm, für das Untersuchungsjahr 2015 bei 608 mm.

Das Ausheben der Grabsimulationen erfolgte durch einen Bagger mit 90 cm breitem Grabenräumlöffel. Diese Schaufel ist für Friedhofsverhältnisse deutlich zu groß und führte zusammen mit dem sehr bindigen Boden beim Ausheben zur Bildung von großen monolithischen Blöcken. Um dennoch eine möglichst gleichmäßige Einmischung von CaO zu gewährleisten wurden die Gruben mit der Baggerschaufel schrittweise ausgeschabt. Im Vergleich zu den anderen Standorten wurde hier die ungleichmäßigste Einmischung von CaO erzielt. Das Anlegen der Grabsimulationen erfolgte unter feuchten Bedingungen. Die Matrixpotentiale lagen bei -30 hPa in 50 cm Tiefe und +50 hPa in 135 cm Tiefe.

Tabelle 1: Bodeneigenschaften am Standort Fehmarn

Tiefe in cm (Horizont)	Bodenart	Sand %	Schluff %	Ton %	Humus %	pH (CaCl <sub>2</sub> )
0-35 (rAp)	Lt2	41	32	27	4,5	6,0
35-55 (Sw)	Lt2	39	30	31	0,6	6,7
55- (eSd)	Lts	46	20	34	0,2	7,6

### 3.5.2 Hannover

Der Feldversuch wurde in einer aufgegebenen Abteilung des Stadtfriedhofes Ricklingen in Hannover angelegt. Die letzte Bestattung erfolgte vor ca. 40 Jahren, weitere Bestattungen wurden hier aufgrund schlechter Verwesung und Bildung von Wachsleichen nicht durchgeführt. Am Standort wurde ein pseudovergleyter Normrigosol aus

### 3.5 Versuchsstandorte

---

Sandlöss kartiert. Ausgewählte Bodeneigenschaften sind Tab. 2 zu entnehmen. Für den Zeitraum 1981-2010 werden für die Station Hannover mittlere Niederschläge von 680 mm, für das Jahr 2015 645 mm angegeben (DWD Climate Data Center (CDC) 2016).

Für das Ausheben der Gruben wurde ein friedhofstypischer Bagger mit Zweischalen-greifer verwendet. Es konnte eine gleichmäßige Einmischung von CaO erzielt werden. Die Anlage der Grabsimulationen erfolgte unter feuchten Bedingungen, wobei die Matrixpotentiale in 20, 50 und 90 cm Tiefe um einen Wert von -30 hPa schwankten. Abweichend vom beschriebenen Versuchsaufbau wurde bei beiden Grabsimulationen kein Grabhügel erzeugt, sondern diese bis zur Geländeoberkante verfüllt. In „Null“ wurde sämtlicher Aushub verfüllt und mit der Baggerschaufel abschließend glatt gezogen, was zu einer oberflächlichen Verdichtung führte. Um eine Verdichtung durch die Baggerschaufel zu verhindern wurde bei „CaO“ der Aushub manuell mit Rechen verteilt.

Tabelle 2: Bodeneigenschaften am Standort Hannover

Tiefe in cm (Horizont)	Bodenart	Sand %	Schluff %	Ton %	Humus %	pH (CaCl <sub>2</sub> )
20 (R)	Su3	58	35	7	1,3	5,7
50 (R)	Su3	60	34	6	0,7	6,0
90 (R)	Su3	60	34	6	0,8	6,7

#### 3.5.3 Klein-Altendorf

Am Standort Klein-Altendorf, einem Versuchsgut der Universität Bonn, wurden zwei Feldversuche aufgebaut. Der erste (Klein-Altendorf 1 (Senke)) wurde auf dem Vorge-wende einer Ackerfläche in einer Senke angelegt. Diese war von Herbst bis Frühjahr und nach Niederschlägen häufig überstaut. Es wurde ein Braunerde-Pseudogley aus Löss kartiert. In Tab. 3 sind einige Bodeneigenschaften zusammengefasst. Für die Wetterstation des Versuchsgutes wurden im langjährigen Mittel Jahresniederschläge von 603 mm, für das Untersuchungsjahr 2015 650 mm gemessen.

Mit dem verwendeten Minibagger mit kleinem (ca. 30 cm) Tieflöffel konnte ei-ne gute Einmischung von CaO erreicht werden. Es entstanden aber auch vereinzelt größere Schollen ( $\varnothing$  ca. 15 cm), die nur oberflächlich mit CaO in Kontakt kamen. Die Grabsimulationen wurden unter feuchten Bedingungen angelegt, das Matrixpotential in 20 cm Tiefe lag bei -40 hPa, in 50 und 90 cm Tiefe bei -30 hPa.

Tabelle 3: Bodeneigenschaften am Standort Klein-Altendorf 1

Tiefe in cm (Horizont)	Bodenart	Sand %	Schluff %	Ton %	Humus %	pH (CaCl <sub>2</sub> )
0-35 (Ap)	Ut3	10	74	16	1,7	6,9
35-85 (Bv-Sw)	Ut3	10	75	15	-	7,4
85-135 (Sw)	Uu	12	82	6	-	7,2
135- (II Sd)	Lu	22	56	22	-	7,1

Der Standort Klein-Altendorf 2 (Kuppe) liegt ca. 150 Meter von Klein-Altendorf 1 entfernt und nimmt im Relief eine leicht höhere Position ein. Der Standort wurde als Acker und aktuell als Greeningfläche genutzt. Überstauungen der Versuchsfläche traten nicht auf. Es wurde eine Normparabraunerde aus Löss kartiert. In Tab. 4 sind einige Bodeneigenschaften zusammengefasst. Auffallend im Profil waren die zahlreichen vertikal verlaufenden Regenwurmgänge (ca. 50 pro m<sup>2</sup>).

Zum Ausheben der Gruben kam der Bagger, der auch für Klein-Altendorf 1 verwendet wurde zum Einsatz. Die erzielte Durchmischung mit CaO war gleichmäßig. Die Versuchsanlage erfolgte unter trockenen Bedingungen bei Matrixpotentialen von -250 bis -300 hPa.

Tabelle 4: Bodeneigenschaften am Standort Klein-Altendorf 2

Tiefe in cm (Horizont)	Bodenart	Sand %	Schluff %	Ton %	Humus %	pH (CaCl <sub>2</sub> )
0-30 (Ap)	Ut4	7	74	19	2,0	6,5
30-40 (Al)	Ut4	6	72	22	-	6,9
40-90 (Bt)	Tu3	5	60	35	-	6,9

### 3.5.4 Frankfurt am Main

Der Feldversuch wurde auf einer ehemaligen Gärtnereifläche des Frankfurter Hauptfriedhofes aufgebaut. Auf der Fläche selbst wurde nicht bestattet, aber im Umkreis von 20 m wurden Gräber angelegt. Am Standort wurde eine Normbraunerde kartiert. In Tab. 5 sind einige Bodeneigenschaften zusammengefasst. Das bei 75 cm anstehende Ausgangsmaterial wird nach Kümmerle et al. (1993) aus miozänem Landschneckenmergel gebildet. Durch den mechanisch zerkleinerten (Geröllgrus)

### 3.5 Versuchsstandorte

---

und eingemischten Landschneckenmergel wurde der Skelettanteil im Boden erhöht. Die Jahresniederschläge lagen für die Jahre 1981-2010 im Mittel bei 665 mm, für das Untersuchungsjahr 2015 werden 431 mm angegeben (DWD Climate Data Center (CDC) 2016).

Die Grabarbeiten wurden mit einem friedhofstypischen Bagger mit Zweischalengreifer durchgeführt. Aus platzgründen wurden anstatt der großen Gruben je Variante drei Einzelgräber ausgehoben. Es erfolgte eine gleichmäßige Einmischung von CaO. Der Standort wurde im Frühjahr 2016 abgebaut, die Messtechnik wurde zum Aufbau des Standortes Klein-Altendorf 2 verwendet.

Tabelle 5: Bodeneigenschaften am Standort Frankfurt a. M.

Tiefe in cm (Horizont)	Bodenart	Sand %	Schluff %	Ton %	Humus %	pH (CaCl <sub>2</sub> )
0-30 (jAh)	Slu	39	46	15	2-4	-
30-75 (II Bv)	Lt3	26	39	35	<1	-
75- (III eCV)	-	-	-	-	-	-

#### 3.5.5 Hohenschulen

Der Feldversuch wurde im Vorgängerprojekt (DBU Az.: 20933/03) angelegt. Eine genaue Beschreibung ist Zimmermann (2012) zu entnehmen. Zimmermann (2012) kartierte eine Pseudogley-Parabraunerde aus Geschiebelehm. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge zwischen 1981 und 2010 lagen bei 778 mm, für den Untersuchungszeitraum 2015 bei 866 mm (DWD Climate Data Center (CDC) 2016). Unterschiede im Versuchsaufbau bestanden in der Einarbeitungsmethode des CaO. Dieses wurde lagenweise beim Verfüllen der Gruben eingestreut und manuell eingearbeitet.

## 3.6 Ergebnisse

### 3.6.1 Fehmarn

Aufgrund hoher Wassergehalte und häufiger Überstauung konnten die Stechzylinderbeprobungen nicht in dreimonatigem Abstand durchgeführt werden. Wegen Stauwasser in den Profilgruben wurden 12 Monate nach Verfüllen nur die Tiefen 20 und 50 cm beprobt. Der Grabhügel in „Null“ ist auf das umliegende Niveau eingesackt, während sich in „CaO“ trotz weniger verfülltem Material noch ein leichter Grabhügel erhalten hat.

In Abbildung 1 sind die gemessenen  $k_f$ -Werte, sortiert nach Entnahmetiefe und Beprobungszeitpunkt aufgeführt. Die Mediane von „CaO“ sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als sehr hoch bis extrem hoch klassifiziert und liegen deutlich, größtenteils signifikant, über den Medianen von „Null“. Auffällig ist, dass die  $k_f$  für „Null“ in 20 und 50 cm mit der Zeit ansteigt. In 90 cm Tiefe lässt sich in „Null“ diese Entwicklung nicht beobachten.

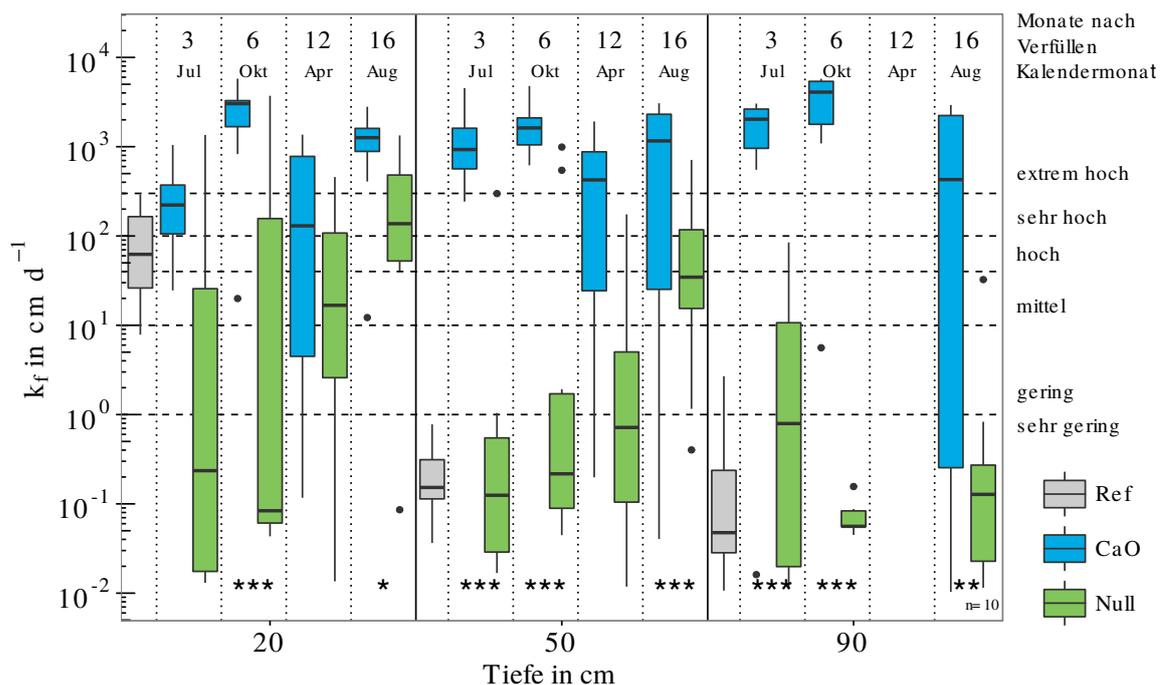


Abbildung 1: Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) für den Standort Fehmarn klassifiziert nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungsstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Abbildung 2 zeigt die bei  $\psi_m = -60$  hPa gemessene  $k_l$ . Die Mediane von „CaO“ liegen, außer für die Tiefe 50 cm nach 6 Monaten, über den Medianen von „Null“. Eine signifikante Erhöhung ist für eine Beprobung in 90 cm Tiefe festzustellen.

### 3.6 Ergebnisse

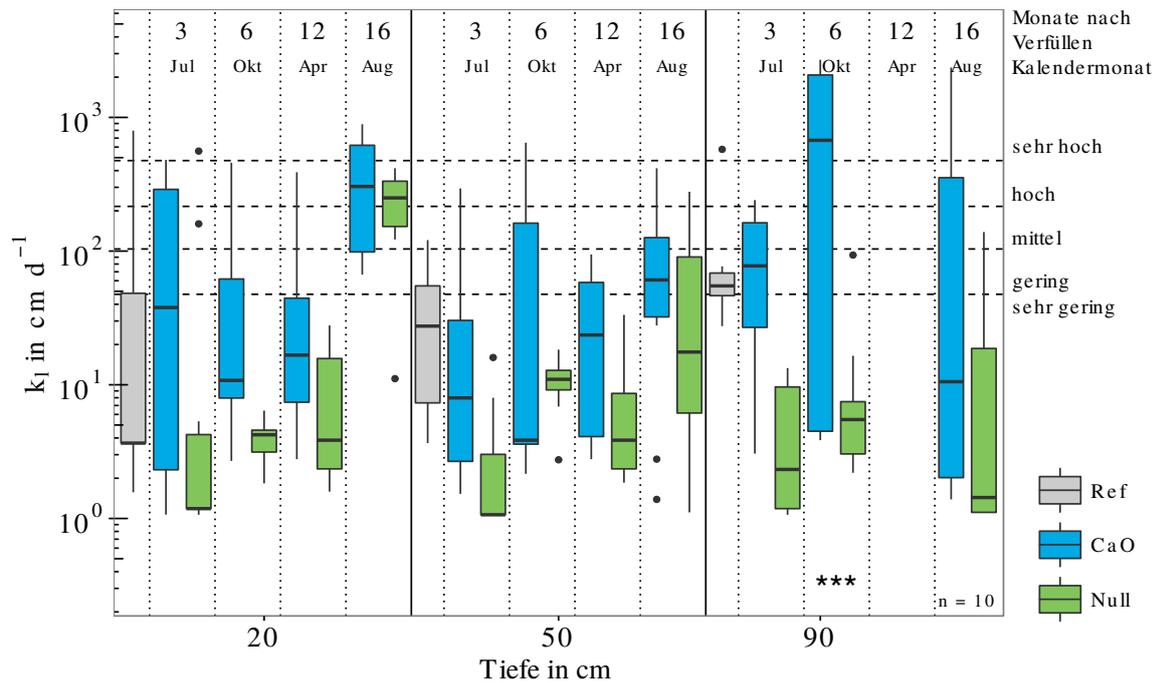


Abbildung 2: Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) bei  $\psi_m = -60$  hPa klassifiziert nach DVWK (1997) für den Standort Fehmarn. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Auffallend ist die hohe Streubreite der Messwerte von „CaO“, die durch die ungleichmäßige Einmischung von CaO verursacht wurden. In 90 cm Tiefe verbleiben allerdings die Messwerte für „Null“ im sehr geringen Bereich.

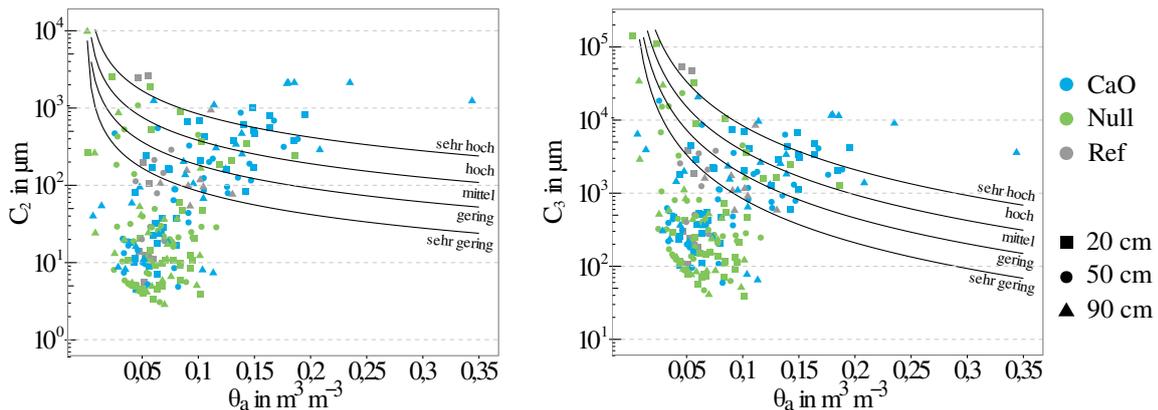


Abbildung 3:  $C_2$ -Index (links) und  $C_3$ -Index (rechts) ( $\psi_m = -60$  hPa) für den Standort Fehmarn, mit der Einstufung für  $k_l$  nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ).

Die aus  $k_l$  und  $\Theta_a$  (beides bei  $\psi_m = -60$  hPa ermittelt) berechneten  $C_2$ - und  $C_3$ -Indizes sind in Abbildung 3 dargestellt. Zwischen „CaO“ und „Null“ bestehen für  $C_2$  nur für zwei Beprobungen in 90 cm Tiefe signifikante Unterschiede (Anhang A.3). Für  $C_3$  können signifikante Unterschiede nur für eine Beprobung in 90 cm Tiefe

angegeben werden (Anhang A.3). Dennoch streut „CaO“ tiefenunabhängig stärker in die Bereiche, die als hoch und sehr hoch klassifiziert sind. Die Werte von „Null“ hingegen streuen kaum in höhere Bereiche und finden sich hauptsächlich im sehr geringen Bereich.

In Abbildung 4 sind die Wasserspannungskurven für die zweite Probennahme nach sechs Monaten dargestellt. „Null“ zeigt für die Tiefen 20 und 50 cm einen flacheren Verlauf als „CaO“ und „Ref“, was auf eine Verringerung der wGP in „Null“ zurückzuführen ist. In 50 und 90 cm Tiefe zeigt sich in „CaO“ eine deutliche Abnahme des Feinporenanteils im Vergleich zu „Null“ und „Ref“.

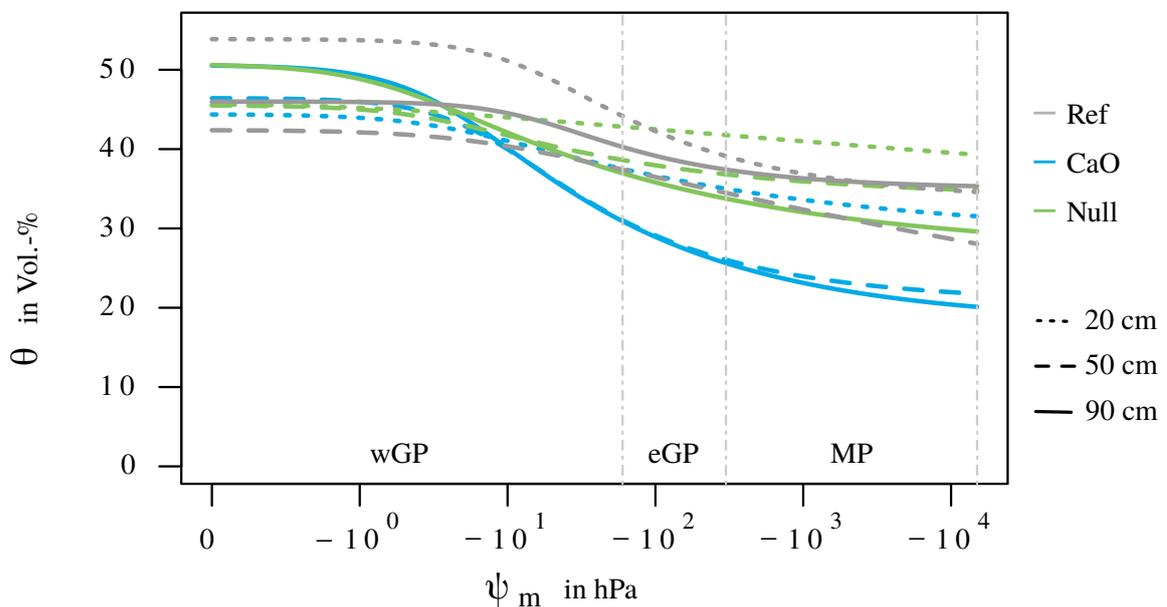
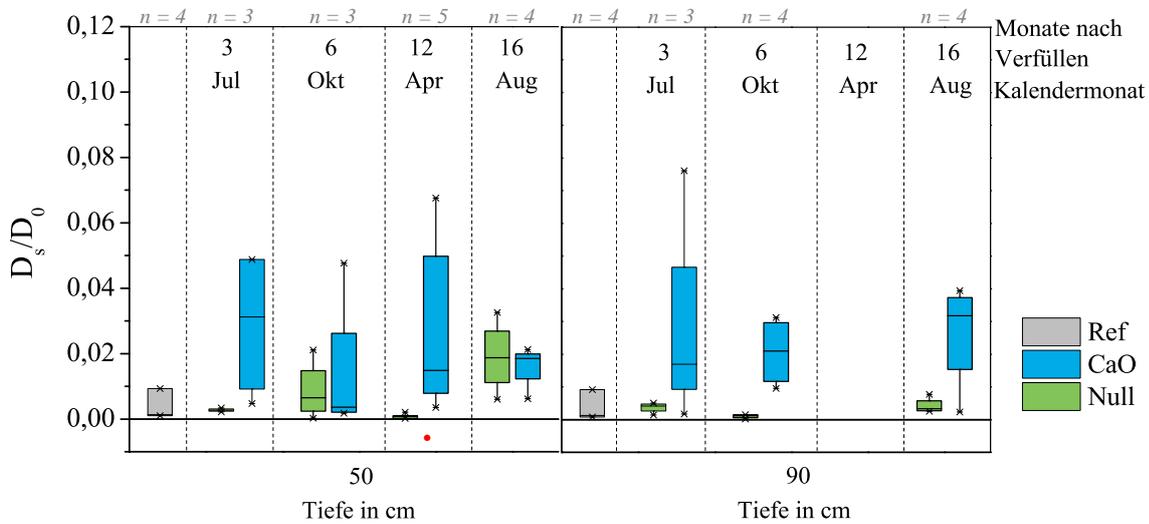


Abbildung 4: Wasserspannungskurven für den Standort Fehmarn, mit den Bereichen der weiten Grobporen (wGP), engen Grobporen (eGP) und Mittelporen (MP).

Für den Standort Fehmarn liegen unabhängig von der Variante vergleichsweise geringe Diffusionskoeffizienten im Vergleich zu den anderen Standorten vor (Abbildung 5). Die Verfüllung der Gruben mit CaO führt ebenfalls zu einer Verbesserung der Diffusionsleistung im Vergleich zu „Ref“, während sich in „Null“ trotz lockerer Lagerung die Diffusivität sogar verschlechtert. Nur in 50 cm Tiefe erreicht „Null“ nach 16 Monaten das Niveau von „CaO“.

In Bezug auf die Porenfunktionalität ist die Zunahme der  $C_1$ -Werte bzw. die Abnahme der Tortuosität durch die Zugabe von CaO weniger deutlich als auf den anderen Standorten (Tabelle 6). Im Vergleich zu diesen wird auf dem Standort Fehmarn durch die CaO-Zugabe eine vergleichbar hohe Menge luftgefüllter Poren geschaffen, diese sind gegenüber denen der anderen Standorte aber weniger leitfähig (Vergleich der Beprobung nach 16 Monaten in 90 cm Tiefe).

### 3.6 Ergebnisse



[HT]

Abbildung 5: Relativer Diffusionskoeffizient ( $D_s/D_0$ ) von ungestörten Bodenproben aus 50 und 90 cm Tiefe am Standort Fehmarn zu unterschiedlichen Beprobungsterminen nach Verfüllen der Gruben bei  $\psi_m = -60$  hPa. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Tabelle 6: Luftgefülltes Porenvolumen ( $\Theta_a$ ),  $C_1$ - und Tortuositätsindices in 50 und 90 cm Bodentiefe für den Standort Fehmarn bei  $\psi_m = -60$  hPa, MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung.

		Monate nach Verfüllen der Grube							
		3		6		12		16	
Variante	Tiefe (cm)	$\Theta_a \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$							
		MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA
Null	50	0,04	0,01	0,08	0,05	0,02	0,01	0,20	0,10
Null	90	0,05	0,02	0,07	0,01	-	-	0,06	0,02
CaO	50	0,15	0,07	0,11	0,10	0,19	0,11	0,14	0,01
CaO	90	0,13	0,09	0,18	0,06	-	-	0,21	0,11
Variante	Tiefe (cm)	$C_1$ -Index							
		MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA
Null	50	0,06	0,01	0,08	0,08	0,02	0,02	0,07	0,01
Null	90	0,09	0,06	0,02	0,01	-	0,02	0,05	0,01
CaO	50	0,17	0,17	0,09	0,07	0,12	0,03	0,19	0,04
CaO	90	0,20	0,20	0,11	0,03	0,15	0,04	0,20	0,04
Variante	Tiefe (cm)	Tortuositätsindex							
		MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA
Null	50	4,19	0,78	3,66	0,86	5,49	1,34	3,88	0,50
Null	90	3,67	0,84	6,05	3,76	4,83	1,17	4,58	0,27
CaO	50	2,55	0,21	2,81	0,29	2,23	0,16	2,30	0,23
CaO	90	2,63	0,28	2,89	0,49	2,67	0,39	2,26	0,25



### 3.6 Ergebnisse

Tabelle 7: pH-Wert, organischer Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) und Calciumcarbonatgehalt ( $CaCO_3$ ) der beprobten Tiefen 50 und 90 cm am Standort Fehmarn, MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung, n = 6.

		Monate nach Verfüllen der Grube			
		3		6	
Variante	Tiefe (cm)	pH in $CaCl_2$			
		MW	STA	MW	STA
Null	50	7,50	0,08	7,61	0,05
Null	90	7,51	0,06	7,60	0,06
CaO	50	7,92	0,20	7,81	0,10
CaO	90	8,23	0,22	8,04	0,41
Variante	Tiefe (cm)	$C_{org}$ in %			
		MW	STA	MW	STA
Null	50	0,30	0,04	0,27	0,11
Null	90	0,24	0,02	0,19	0,03
CaO	50	0,35	0,49	0,23	0,10
CaO	90	0,54	0,57	0,29	0,09
Variante	Tiefe (cm)	$CaCO_3$ in %			
		MW	STA	MW	STA
Null	50	0,74	0,9	12,61	2,16
Null	90	0,00	-	13,82	3,41
CaO	50	15,19	4,1	15,81	4,78
CaO	90	12,45	5,33	12,04	7,03

An den in Abbildung 7 dargestellten Matrixpotentialen lässt sich für die Tiefe 50 cm deutlich die durch CaO induzierte Trocknung auf ca. -300 hPa erkennen. Auch ohne CaO fand durch die Grabarbeiten eine Trocknung auf -125 hPa statt. In 135 cm Tiefe fand eine frühere und stärkere Austrocknung von „Ref“ statt. Von November 2015 bis Mai 2016 zeigten die Grabsimulationen in beiden Tiefen Stauwassereinfluss (positive  $\psi_m$ ), von Mai 2015 bis Juli 2015 waren die Tensiometer beider Grabsimulationen in 135 cm Tiefe überstaut. Die  $O_2$ - und  $CO_2$ -Gehalte fielen in diesem Zeitraum auf 0. Die ersten drei Bodengasmessungen in 50 cm Tiefe zeigten für „CaO“ und „Null“ eine mit atmosphärischer Luft vergleichbare Zusammensetzung. Ab Juni 2016 (in 50 cm), bzw. August 2016 (in 135 cm) konnte nach Stauwasserrückgang die Bodengaszusammensetzung wieder gemessen werden. In beiden Tiefen ließ sich im gesamten Messzeitraum für „CaO“ kein  $CO_2$  nachweisen, für „Null“ waren die  $CO_2$ -Gehalte im Vergleich zu „Ref“ (und „CaO“) erhöht. In „CaO“ wurden höhere  $O_2$ -Gehalte als in „Null“ gemessen.

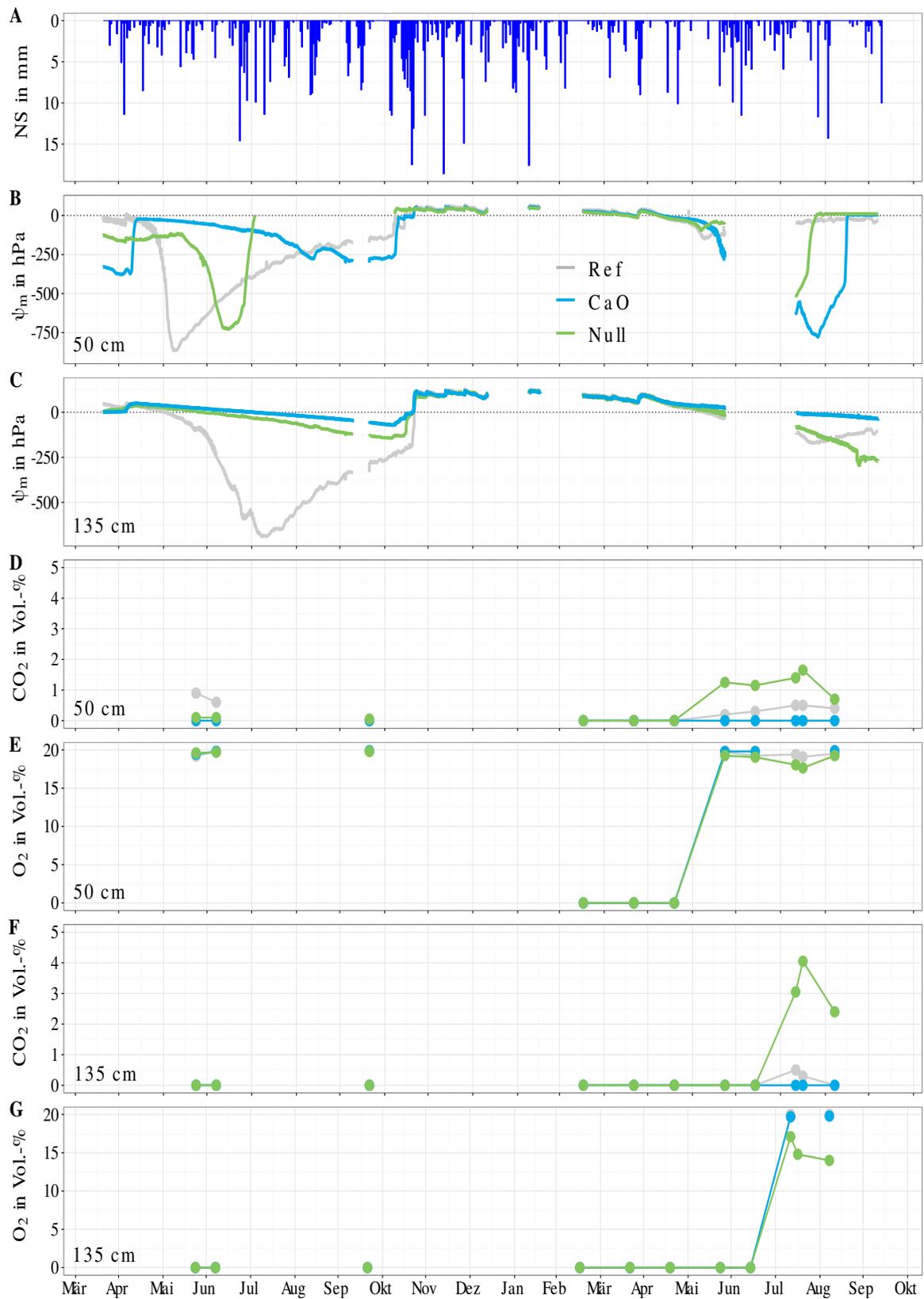


Abbildung 7: Standort Fehmarn März 2015 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), CO<sub>2</sub>-Konzentration (D) und O<sub>2</sub>-Konzentration (E) in 50 cm, CO<sub>2</sub>-Konzentration (F) und O<sub>2</sub>-Konzentration (G) in 135 cm Tiefe.

### 3.6.2 Hannover

In Hannover erfolgten die Probennahmen in dreimonatigem Turnus, wobei die geplante Beprobung nach 21 Monaten wegen hoher Wassersättigung nicht stattfand. Die Beprobung nach 6 Monaten fand unter nassen Bedingungen statt. Für beide Varianten konnten keine Sackungen festgestellt werden.

In Abbildung 8 sind die  $k_f$ -Werte dargestellt. Die Werte für „CaO“ liegen im sehr hohen bis extrem hohen Bereich, einzige Ausnahme stellt die Beprobung nach sechs Monaten in 90 cm Tiefe dar. Die Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ sind teilweise signifikant. Bei „Null“ führen die Grabarbeiten zu einer Abnahme der  $k_f$ . In den Tiefen 20 und 50 cm fand diese Abnahme innerhalb der ersten drei Monate, in 90 cm Tiefe nach sechs Monaten statt. Für „Null“ zeigt sich über den Zeitraum von zwei Jahren auch eine schrittweise Annäherung der  $k_f$  an die „Ref“-Werte. Diese Entwicklung zeigt sich in 90 cm Tiefe jedoch nicht.

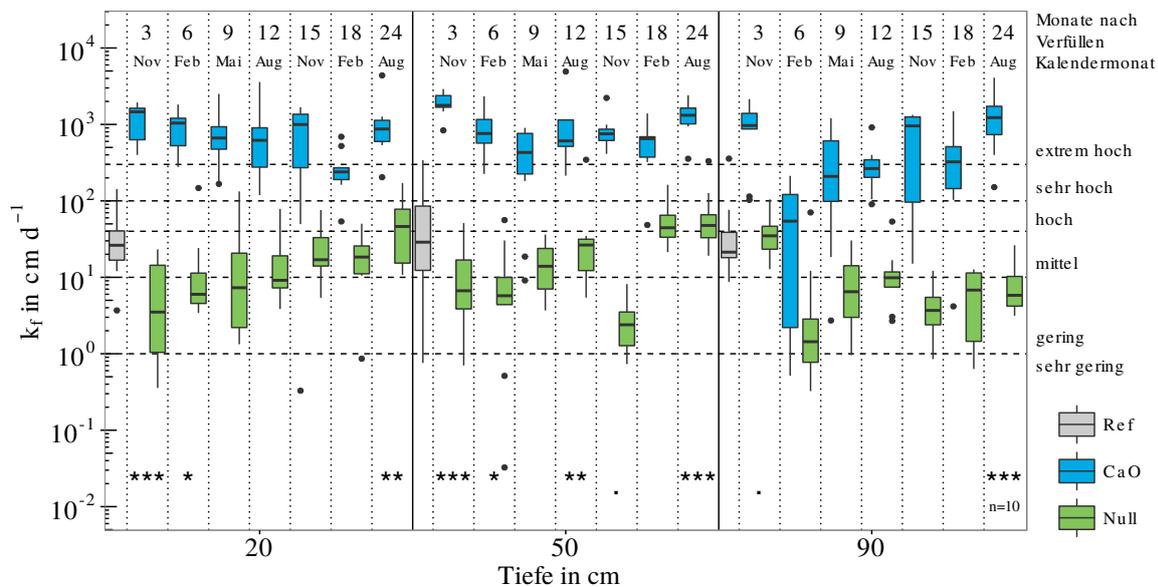


Abbildung 8: Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) für den Standort Hannover klassifiziert nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Abbildung 9 zeigt die  $k_l$  ( $\psi_m = -60$  hPa). Die Mediane von „CaO“ liegen über denen von „Null“, hauptsächlich im mittleren bis sehr hohen Bereich. Ausnahmen bilden die Probennahmen nach sechs und neun Monaten für die Tiefen 50 und 90 cm. Die Messwerte für „Null“ liegen im sehr geringen bis geringen Bereich und steigen in den Tiefen 20 und 50 cm tendenziell über den Untersuchungszeitraum an. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ ergeben sich nur für einzelne Beprobungen. Für die  $C_2$ - und  $C_3$ -Indizes ( $\psi_m = -60$  hPa) bestehen für die Varianten keine signifikanten Unterschiede (Anhang A.3).

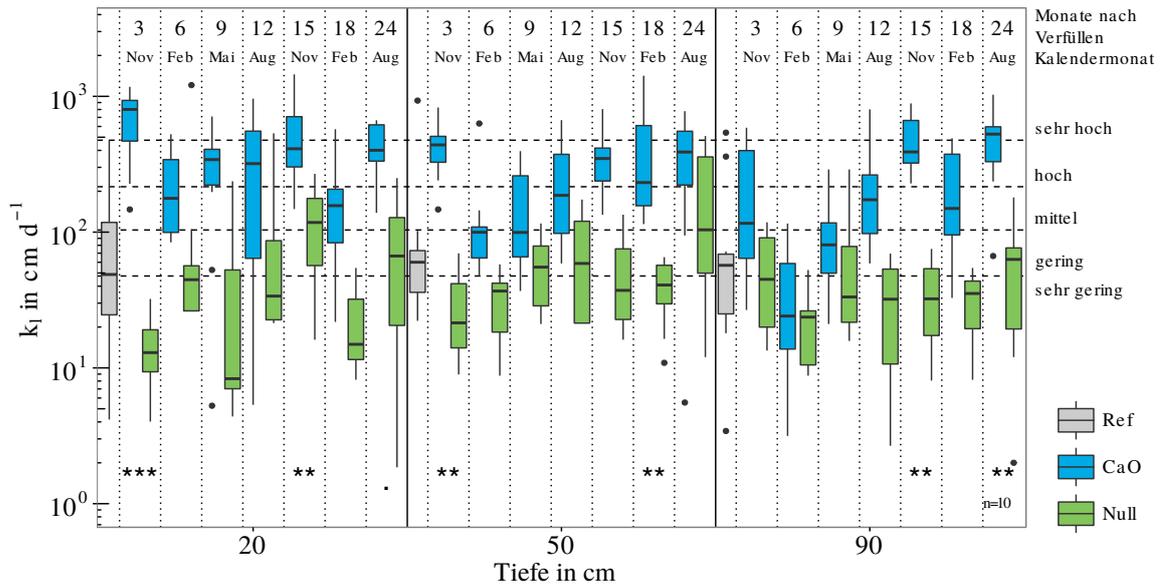


Abbildung 9: Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) bei  $\psi_m = -60$  hPa klassifiziert nach DVWK (1997) für den Standort Hannover. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Abbildung 10 zeigt die Verteilung der  $C_2$ - und  $C_3$ -Indizes für die untersuchten Varianten und Tiefen in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ). Im Vergleich zu  $C_2$  nähern sich die  $C_3$ -Werte von „CaO“ und „Null“ an, was tendenziell nur auf Unterschiede in der Porengrößenverteilung und nicht in der Porenkontinuität deutet. Dennoch streuen die Werte von „CaO“ im mittleren bis sehr hoch klassifizierten Bereich, von „Null“ dagegen im sehr gering bis gering klassifizierten Bereich. Durch die Zunahme von  $\Theta_a$  erhöht sich damit die Wahrscheinlichkeit von miteinander verbundenen Poren.

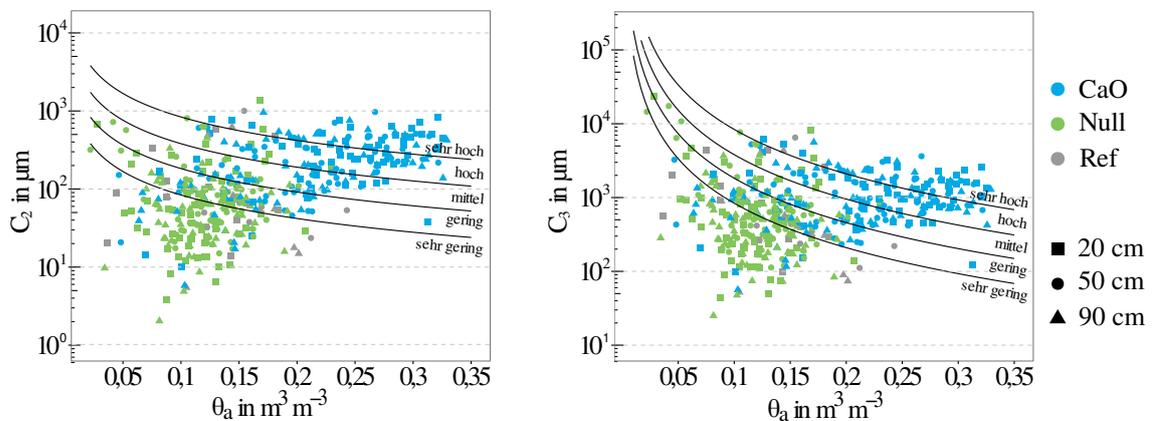


Abbildung 10:  $C_2$ -Index (links) und  $C_3$ -Index (rechts) ( $\psi_m = -60$  hPa) für den Standort Hannover, mit der Einstufung für  $k_l$  nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ).

### 3.6 Ergebnisse

Die in Abbildung 11 dargestellten Wasserspannungskurven wurden an ungestörten Bodenproben aus der Beprobung 18 Monate nach Verfüllen der Gruben gemessen. Durch die Grabarbeiten kommt es tiefenunabhängig zu einer Abnahme an wGP in der „Null“-Variante, die sich in einem flacheren Verlauf der Kurven äußert. In „CaO“ zeigt sich hingegen eine Zunahme der wGP und die Wasserspannungskurve beginnt bereits bei höheren  $\psi_m$  abzufallen.

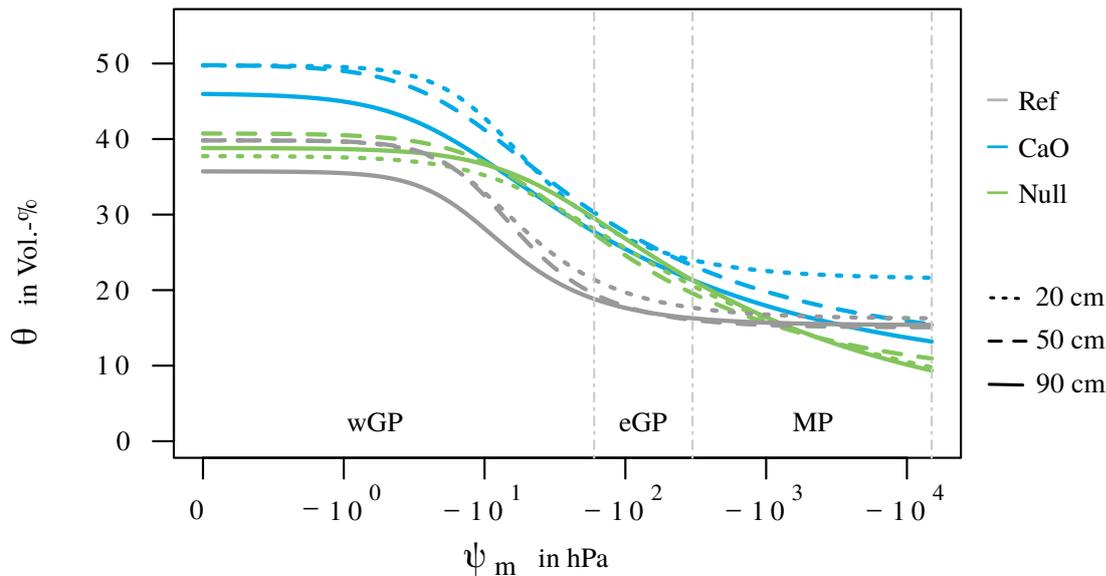


Abbildung 11: Wasserspannungskurven für den Standort Hannover, mit den Bereichen der weiten Grobporen (wGP), engen Grobporen (eGP) und Mittelporen (MP).

In „CaO“ zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Diffusivität ( $D_s/D_0$ ) in 50 und 90 cm Bodentiefe im Vergleich zu „Ref“ und „Null“, die über den Messzeitraum von 24 Monaten bestehen bleibt (Abb. 12).

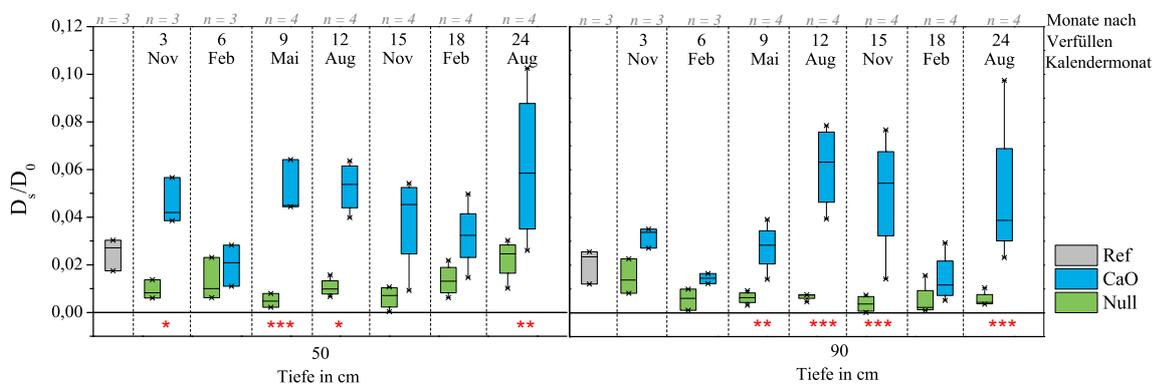


Abbildung 12: Relativer Diffusionskoeffizient ( $D_s/D_0$ ) in 50 und 90 cm Bodentiefe am Standort Hannover bei  $\psi_m = -60$  hPa. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Während die  $D_s/D_0$ -Werte von „Null“ in 50 cm über längere Zeiträume unterhalb von „Ref“ bleiben und erst nach 24 Monaten einen Wert von  $> 0,02$  erreichen, steigen die Werte von „CaO“ insbesondere im Sommerhalbjahr wieder an. Hoch signifikante Unterschiede ( $p$ -Wert  $< 0,001$ ) zwischen „Null“ und „CaO“ werden damit in Abhängigkeit der Beprobungszeit sowohl in 50 cm aber insbesondere auch in 90 cm Tiefe erzielt.

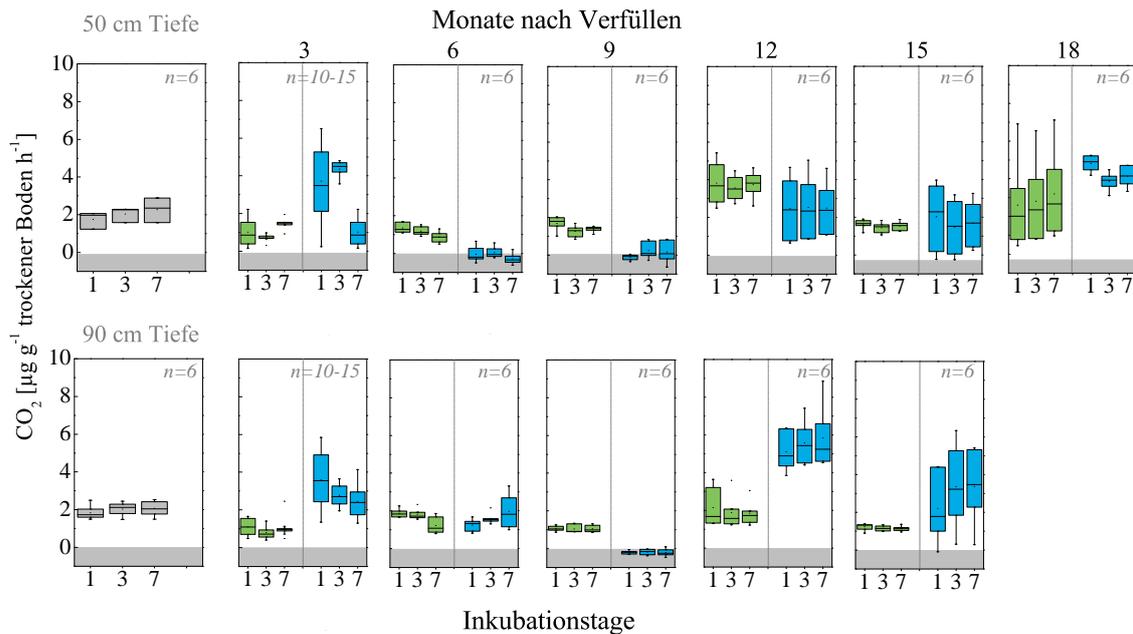


Abbildung 13: Respiurationsrate von ungestörten, inkubierten Bodenproben aus 50 und 90 cm Tiefe am Standort Hannover bei  $\psi_m = -60$  hPa,  $n = 6$ .

Zudem steht die höhere Diffusivität in „CaO“ in enger Verbindung mit dem luftgefülltem Porenvolumen (Anhang A.4), was sich in doppelt bis dreifach höheren Kontinuitätsindices ( $C_1$ ) widerspiegelt (Tab. 8). In Hinblick auf die Tortuositätsindices führt dies zu einem stärker tortuosen Porensystem (längere Fließwege) in „Null“, das im Vergleich zu „CaO“ über den gesamten Beprobungszeitraum mehr als doppelt so hoch ist. Es kann kein eindeutiger Effekt von CaO auf die mikrobielle Aktivität über den Beprobungszeitraum ausgemacht werden (Abb. 13). So sind zu Beginn (3 Monate nach Verfüllen der Gruben) und gegen Ende des Zeitraumes (nach 15 Monaten) sogar höhere Respiurationsraten bei CaO-Applikation zu beobachten, während nach 6 und 9 Monaten negative  $\text{CO}_2$ -Raten ( $\text{CO}_2$ -Aufnahme) messbar waren.

Die CaO-Applikation erhöht den pH-Wert von einem „sehr schwach sauren“ (6,1 - 6,8) Bereich (Ad-hoc-AG Boden 2005) in „Null“ auf einen maximalen pH-Wert im „sehr stark alkalischen“ Bereich (pH 10) 6 Monate nach der Verfüllung (9). Die pH-Werte verringern sich mit der Zeit auf Werte um 8, die im „schwach alkalischen“ Bereich liegen.  $\text{CaCO}_3$ -Werte der Proben aus „CaO“ schwanken mit Ausnahme der Beprobung nach 9 Monaten (6,3 %  $\text{CaCO}_3$ ) im Bereich von 1 – 3 %. Die Durchmischung von

Tabelle 8: Luftgefülltes Porenvolumen ( $\Theta_a$ ),  $C_1$ - und Tortuositätsindices in 50 und 90 cm Bodentiefe für den Standort Hannover bei  $\psi_m = -60$  hPa, MW = arithmetischer Mittelwert, STA = Standardabweichung.

Variante		Monate nach Verfüllen der Grube															
		3		6		9		12		15		18		24			
Tiefe (cm)		MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA		
		$\Theta_a \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$															
		$C_1$ -Index															
		Tortuositätsindex															
Null	50	0,15	0,01	0,15	0,03	0,13	0,02	0,16	0,04	0,13	0,04	0,13	0,04	0,18	0,03	0,18	0,05
Null	90	0,18	0,04	0,11	0,01	0,13	0,00	0,12	0,08	0,13	0,01	0,13	0,01	0,11	0,03	0,14	0,01
CaO	50	0,29	0,02	0,15	0,05	0,25	0,01	0,26	0,01	0,23	0,04	0,23	0,04	0,21	0,05	0,27	0,05
CaO	90	0,22	0,02	0,12	0,03	0,18	0,04	0,30	0,03	0,24	0,07	0,24	0,07	0,16	0,07	0,25	0,05
Null	50	0,06	0,02	0,08	0,04	0,04	0,02	0,07	0,01	0,04	0,01	0,04	0,03	0,07	0,03	0,12	0,03
Null	90	0,08	0,05	0,05	0,04	0,05	0,02	0,05	0,01	0,08	0,03	0,08	0,03	0,04	0,05	0,04	0,02
CaO	50	0,16	0,02	0,13	0,02	0,20	0,03	0,19	0,04	0,17	0,10	0,17	0,10	0,15	0,04	0,21	0,09
CaO	90	0,15	0,03	0,13	0,04	0,15	0,04	0,20	0,04	0,19	0,07	0,19	0,07	0,09	0,03	0,19	0,08
Null	50	4,19	0,78	3,66	0,86	5,49	1,34	3,88	0,50	7,22	5,53	7,22	5,53	3,86	0,77	2,92	0,33
Null	90	3,67	0,84	6,05	3,76	4,83	1,17	4,58	0,27	12,74	12,80	12,74	12,80	7,03	3,55	5,37	1,23
CaO	50	2,55	0,21	2,81	0,29	2,23	0,16	2,30	0,23	2,85	1,26	2,85	1,26	2,71	0,51	2,26	0,45
CaO	90	2,63	0,28	2,89	0,49	2,67	0,39	2,26	0,25	2,40	0,52	2,40	0,52	3,51	0,52	2,43	0,54

Tabelle 9: pH-Wert, organischer Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) und Calciumcarbonatgehalt ( $CaCO_3$ ) der beprobten Tiefen 50 und 90 cm am Standort Hannover, MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung, n = 6.

Variante		Monate nach Verfüllen der Grube																	
		3			6			9			12			15			18		
		Tiefe (cm)	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	
<b>pH in <math>CaCl_2</math></b>																			
Null	50	6,27	0,16	6,49	0,26	6,26	0,16	5,99	0,24	6,29	0,19	6,15	0,15						
Null	90	6,10	0,55	6,73	0,35	6,26	0,05	6,39	0,04	6,48	0,12	-	-						
CaO	50	8,06	0,24	10,62	1,36	9,87	1,62	8,44	0,59	8,61	0,61	0,81	0,05						
CaO	90	7,94	0,77	7,60	0,99	9,40	1,16	8,05	0,28	8,88	0,47	-	-						
<b><math>C_{org}</math> in %</b>																			
Variante																			
Tiefe (cm)																			
Null	50	0,57	0,05	0,67	0,22	0,68	0,15	1,53	0,43	0,40	0,06	0,85	0,52						
Null	90	0,69	0,39	0,39	0,12	0,42	0,16	0,44	0,13	0,73	0,36	-	-						
CaO	50	0,65	0,24	0,41	0,10	0,58	0,23	1,10	0,44	0,35	0,02	0,88	0,53						
CaO	90	0,49	0,15	0,46	0,12	0,37	0,03	0,99	0,34	0,64	0,11	-	-						
<b><math>CaCO_3</math> in %</b>																			
Variante																			
Tiefe (cm)																			
Null	50	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-						
Null	90	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-						
CaO	50	3,26	1,48	3,39	2,36	6,26	4,62	1,12	0,29	1,84	0,84	2,19	1,41						
CaO	90	0,61	0,74	0,74	0,68	3,79	2,36	2,22	1,61	3,24	1,29	-	-						

Ober- und Unterboden führt zu einer ungleichmäßigen Verteilung der  $C_{\text{org}}$ -Werte in den verfüllten Gruben, die von 0,2 bis 2 % schwanken.

Abbildung 14 zeigt die Resultate des Monitorings von Matrixpotentialen und Bodengaszusammensetzung. „Ref“ zeigte im Sommer eine stärkere Austrocknung (niedrigere  $\psi_m$ ) als die Grabsimulationen „CaO“ und „Null“. Unterschiede der  $\psi_m$  ergaben sich für „Null“ und „CaO“ nur im Sommer 2015 in 50 cm Tiefe, hier wurden für „Null“ höhere Werte gemessen. Ähnliche  $\psi_m$  bei unterschiedlicher Wasserspannungskurve der Grabsimulationen, deuten für „CaO“ im Vergleich zu „Null“ auf geringere Wassersättigung und damit einen höheren Anteil an luftgefüllten Poren, die für den Gasaustausch zur Verfügung stehen. Dies zeigen auch die durchgeführten Bodengasmessungen (Abb. 14 D-G). „Null“ zeigte in beiden untersuchten Tiefen über den Untersuchungszeitraum die geringsten  $O_2$ -Gehalte. Die  $O_2$ -Gehalte von „CaO“ entsprachen denen von „Ref“. Die  $CO_2$ -Gehalte in 50 cm Tiefe von „Null“ lagen in den Sommermonaten (erhöhte Bodentemperatur und Respirationsrate) über denen von „CaO“ und „Ref“. In 135 cm Tiefe zeigte „Null“ über den gesamten Untersuchungszeitraum die höchsten  $CO_2$ -Konzentrationen mit Maxima in den Sommermonaten.

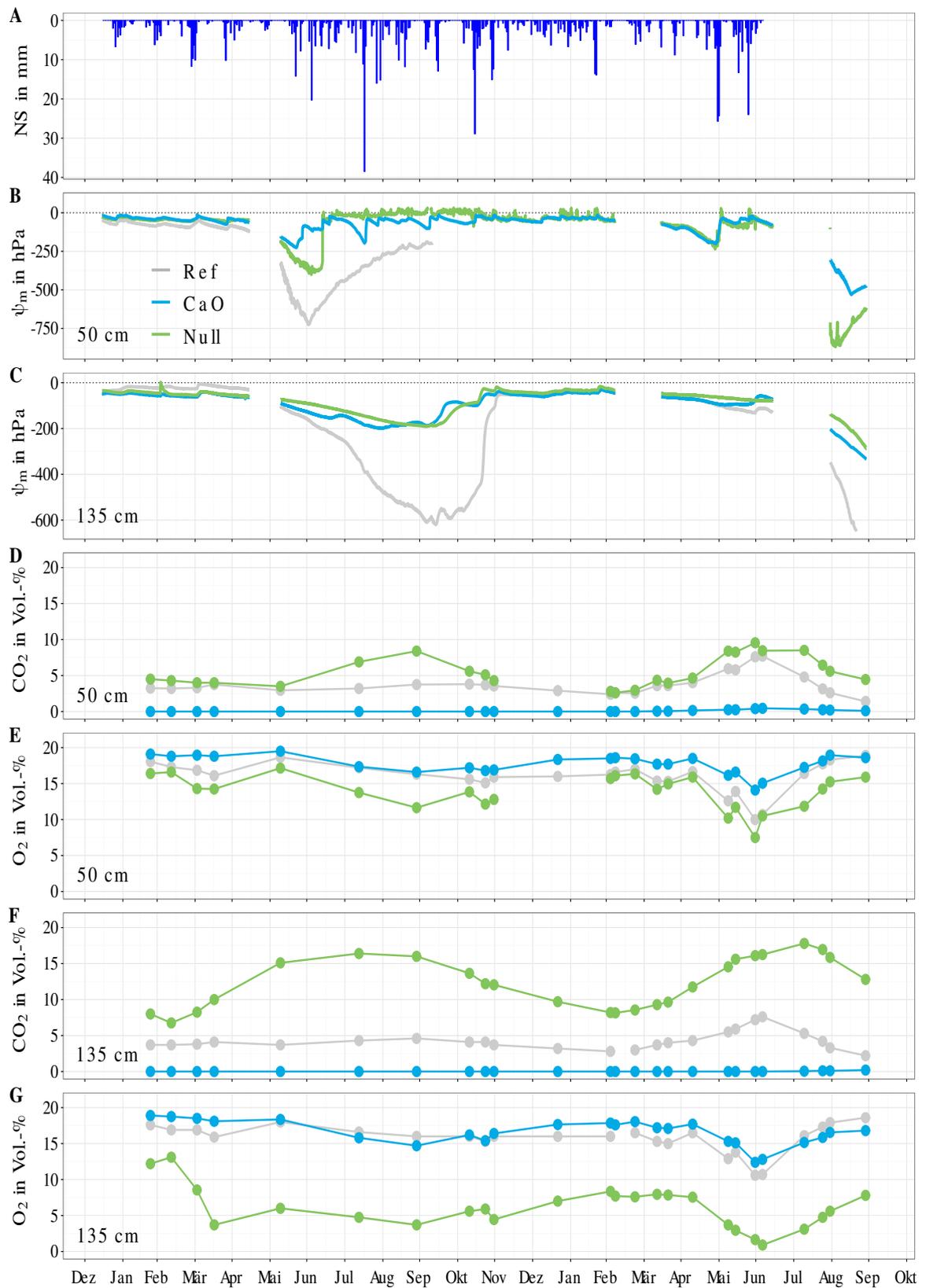


Abbildung 14: Standort Hannover Dezember 2014 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), CO<sub>2</sub>-Konzentration (D) und O<sub>2</sub>-Konzentration (E) in 50 cm, CO<sub>2</sub>-Konzentration (F) und O<sub>2</sub>-Konzentration (G) in 135 cm Tiefe.

### 3.6.3 Klein-Altendorf

Staunässe verhinderte auch an diesem Standort regelmäßige Probennahmen. Die Probennahme nach 17 Monaten erfolgte unter nassen Bedingungen. Dabei trat Staunässe in den Profilgruben bei einem Meter unter Geländeoberfläche auf. Es traten bei beiden Grabsimulationen nach 6 Monaten Sackungen auf. CaO sackte um ca. 20 cm ein, was der Höhe des angelegten Grabhügels entsprach. „Null“ sackte um 30-40 cm ein, wodurch eine Vertiefung von 10-20 cm entstand. Da in „Null“ im Unterschied zu CaO der gesamte Bodenaushub verfüllt wurde, kam es hier durch die Grabarbeiten zu einem größeren Verlust an Porenvolumen.

Die in Abbildung 15 dargestellten  $k_f$ -Werte sind für „CaO“ als sehr hoch und extrem hoch klassifiziert und liegen generell über den Werten von „Null“. Es liegen, außer für die Probennahme nach 17 Monaten, signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ vor. Durch die Grabarbeiten nimmt in 20 cm Tiefe die  $k_f$  bei „Null“ zu und fällt über den Untersuchungszeitraum tendenziell ab. In 50 cm Tiefe verringert sich  $k_f$  anfangs, steigt über den Untersuchungszeitraum in den Bereich von „Ref“. Sechs Monate nach Verfüllen ist in 90 cm Tiefe die  $k_f$  bei „Null“ im Vergleich zu „Ref“ erhöht, fällt aber im Untersuchungszeitraum in den als sehr gering klassifizierten Bereich.

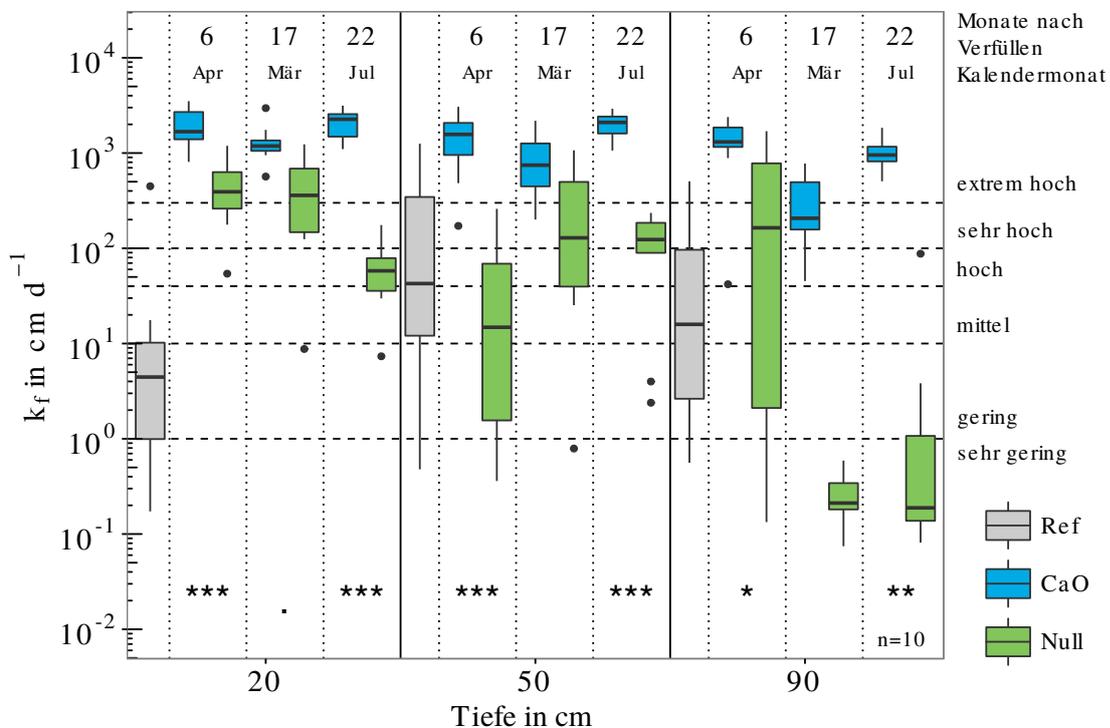


Abbildung 15: Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) für den Standort Klein-Altendorf 1 klassifiziert nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

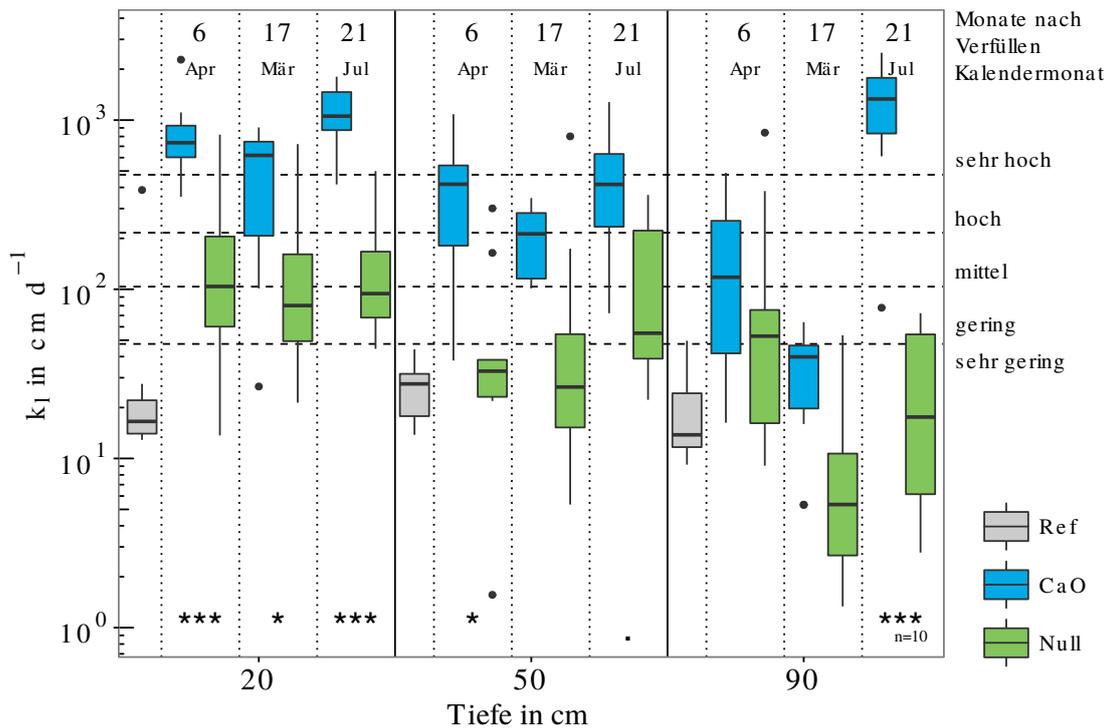


Abbildung 16: Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) bei  $\psi_m = -60$  hPa klassifiziert nach DVWK (1997) für den Standort Klein-Altendorf 1. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Die  $k_l$  ( $\psi_m = -60$  hPa) in Abb. 16 zeigt ein zu  $k_f$  vergleichbares Muster. Die Werte für „CaO“ können als mittel bis sehr hoch klassifiziert werden, eine Ausnahme bildet die Beprobung in 90 cm Tiefe 17 Monate nach Verfüllen (nasse Bedingungen bei Probennahme). Die Grabarbeiten führten für „Null“ zu einem Anstieg der  $k_l$  in 20 cm. Dies zeigt sich auch in 50 cm Tiefe, jedoch erst zur letzten Beprobung. In 90 cm Tiefe fallen die Werte allerdings nach einem initialen Anstieg in den sehr geringen Bereich.

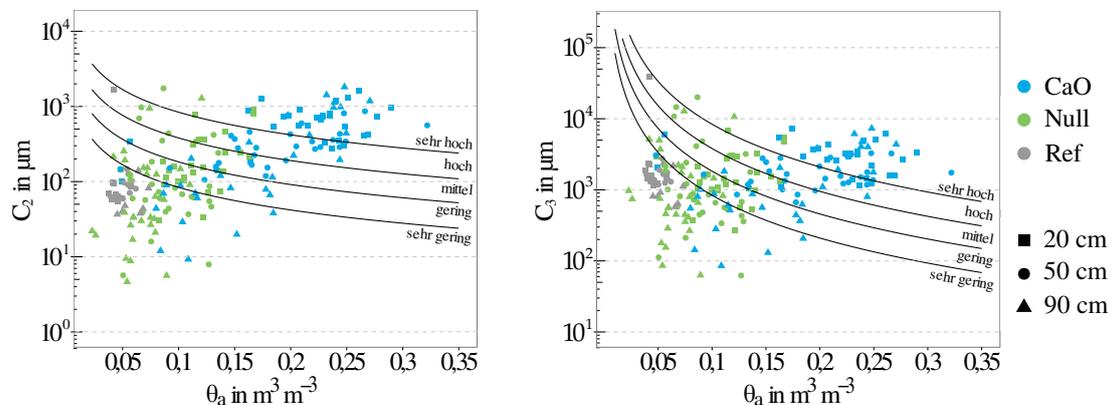


Abbildung 17:  $C_2$ -Index (links) und  $C_3$ -Index (rechts) für den Standort Klein-Altendorf 1, mit der Einstufung für  $k_l$  nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom Luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ).

### 3.6 Ergebnisse

Für die  $C_2$ - und  $C_3$ -Indizes in Abbildung 17 zeigen sich keine signifikanten Unterschiede (Anhang A.3), aber die Tendenz, dass sich die  $C_3$ -Werte von „CaO“ und „Null“ im Vergleich zu  $C_2$  annähern. Dies deutet auf Unterschiede in der Porengrößenverteilung und nicht in der Porenkontinuität. Wobei durch Erhöhung von  $\Theta_a$  die Wahrscheinlichkeit von untereinander verbundenen Poren steigt und für „CaO“ somit höher klassifizierte Werte gemessen werden können.

Die Wasserspannungskurven in Abbildung 18 zeigen für „CaO“ eine deutliche Zunahme der wGP im Vergleich zu „Null“. Für „Null“ lässt sich ein flacherer Verlauf als bei „CaO“ und „Ref“ feststellen, was auf einen Verlust an wGP hinweist. Für die Grabsimulationen lässt sich kein Unterschied in den Feinporenanteilen feststellen.

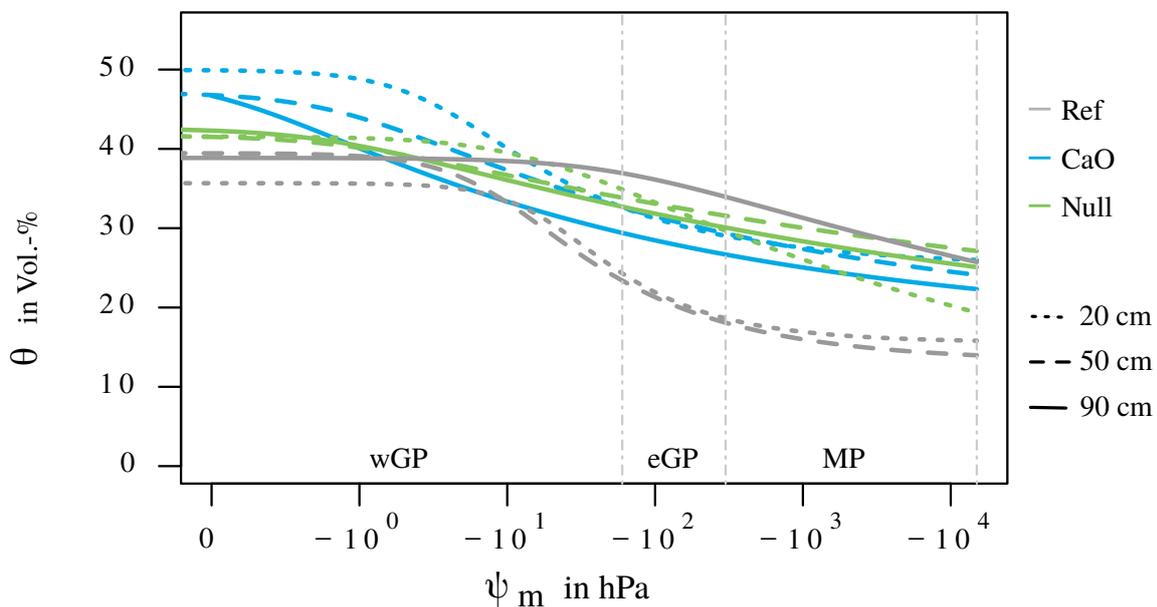


Abbildung 18: Wasserspannungskurven für den Standort Klein-Altendorf 1, mit den Bereichen der weiten Grobporen (wGP), engen Grobporen (eGP) und Mittelporen (MP).

Die gemessenen Matrixpotentiale und Bodengaszusammensetzungen sind in Abbildung 19 dargestellt. Aufgrund der Senkenlage und des relativ großen Einzugsgebietes der Senke führten bereits geringe Niederschläge zur Bildung von Wasseransammlungen in den Grabsimulationen, was sich in positiven  $\psi_m$  in allen Varianten widerspiegelte. Die  $\psi_m$  von „Null“ lagen im ungesättigten Perioden unter denen von „CaO“, was auf eine stärkere Austrocknung schließen lässt. Die Zunahme an wGP in „CaO“ führte hier aber dennoch zu einem verbesserten Gasaustausch im Vergleich zu „Null“ (Abbildung 19 D-G). In 50 cm Tiefe werden in „Null“ die geringsten  $O_2$ - und höchsten  $CO_2$ -Gehalte gemessen. In 135 cm Tiefe fielen die  $O_2$ -Gehalte an vier Messterminen in „Null“ auf unter 5 Vol.-%, verbleiben im Untersuchungszeitraum in „CaO“ aber größtenteils über 15 Vol.-%. Die in „CaO“ gemessenen  $O_2$ -Gehalte liegen auch größtenteils über denen von „Ref“. In beiden betrachteten Tiefen konnte in „CaO“ kein  $CO_2$  nachgewiesen werden.

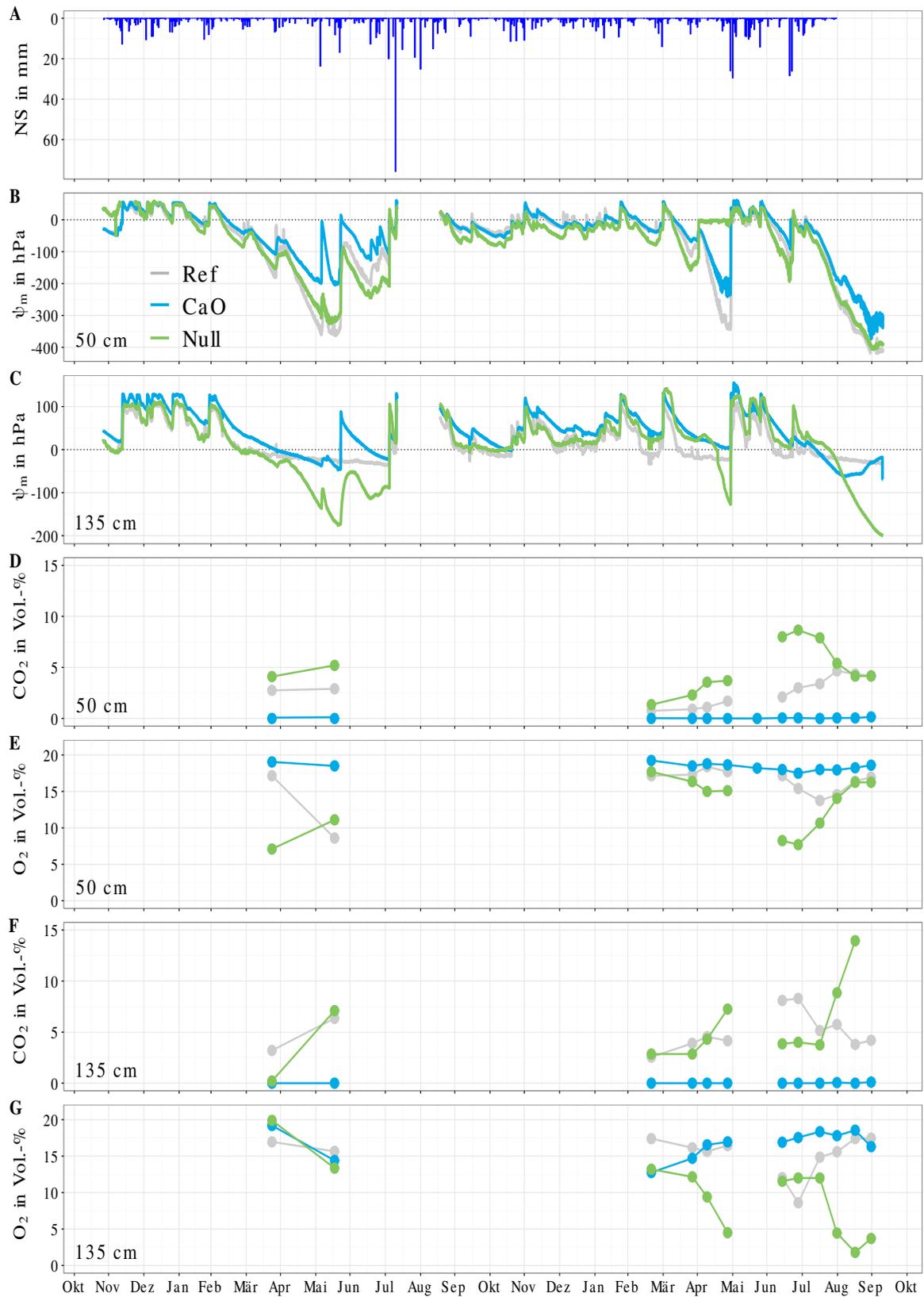


Abbildung 19: Standort Klein-Altendorf 1 Dezember 2014 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), CO<sub>2</sub>-Konzentration (D) und O<sub>2</sub>-Konzentration (E) in 50 cm, CO<sub>2</sub>-Konzentration (F) und O<sub>2</sub>-Konzentration (G) in 135 cm Tiefe.

### 3.6 Ergebnisse

Für den Standort Klein-Altendorf 2 liegen Ergebnisse aus einer Probenahme vor. Bisher traten nur leichte Sackungen von wenigen Zentimetern an beiden Grabsimulationen auf.

Die  $k_f$ -Werte für „CaO“ können als sehr hoch und extrem hoch klassifiziert werden und unterscheiden sich in den Tiefen 50 und 90 cm signifikant von „Null“ (Abbildung 20). Abgesehen von der Tiefe 50 cm führen die Grabarbeiten zu einer Zunahme der  $k_f$  im Vergleich zu „Ref“. Die in Abbildung 20 dargestellte  $k_l$  ( $\psi_m = -60$  hPa) von „CaO“ liegt im hohen bis sehr hohen Bereich. Signifikante Unterschiede zu „Null“ zeigen sich für die Tiefen 20 und 50 cm. Die auffällige breite Streuung der  $k_f$  und  $k_l$  von „Ref“ kann auf die hohe Zahl an Regenwurmgingen zurückgeführt werden.

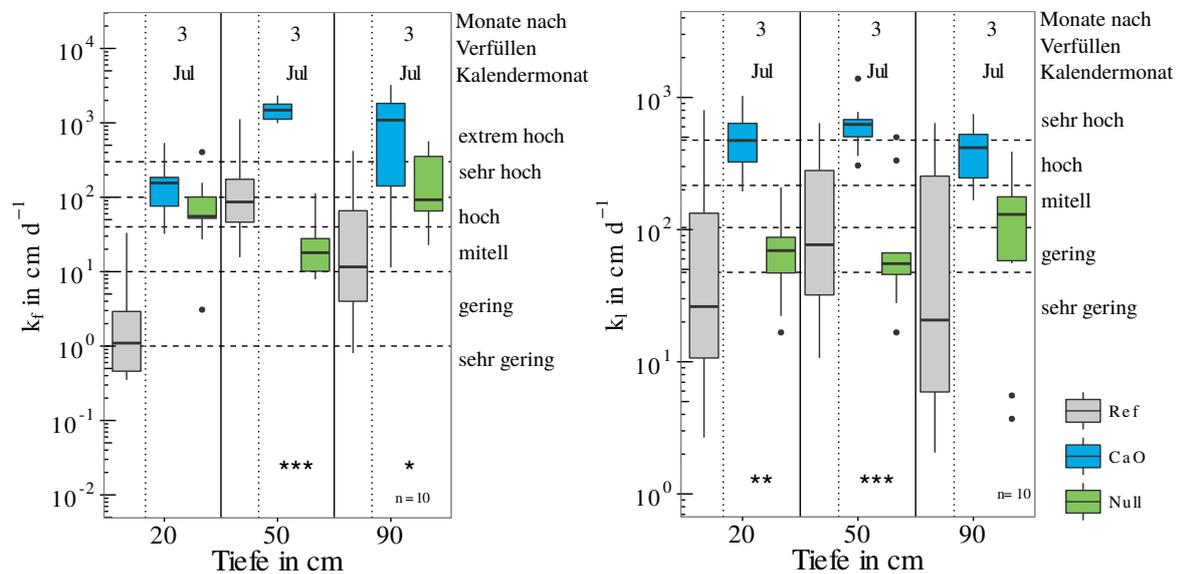


Abbildung 20: gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) (links) und Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) bei -60 hPa (rechts) für den Standort Klein-Altendorf 2. Klassifizierung von  $k_f$  nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und  $k_l$  nach DVWK (1997). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Der hohe Anteil an Regenwurmgingen in „Ref“ zeigt sich auch an den  $C_2$ - und  $C_3$ -Indizes ( $\psi_m = -60$  hPa) in Abbildung 21. Trotz der geringen  $\Theta_a$  von „Ref“ werden einzelne Werte als hoch und sehr hoch klassifiziert. Durch die Grabarbeiten nimmt  $\Theta_a$  in beiden Varianten zu, in „CaO“ allerdings deutlicher. Für „CaO“ und „Null“ ergeben sich keine signifikanten Unterschiede in  $C_2$  und  $C_3$  (Anhang A.3). Tendenziell liegen die Werte für  $C_2$  weiter auseinander als für  $C_3$ , was auf Unterschiede in der Porengrößenverteilung und weniger auf Unterschiede in der Porenkontinuität deutet. Eine höhere Diffusivität der Proben aus CaO im Vergleich zu „Null“ und „Ref“ ist auf beiden Löss-Standorten Klein-Altendorf 1 und 2 (Senke und Kuppe) zu finden (Abb. 22). Bereits 3 Monate nach Verfüllen der Gruben zeigt sich gerade auf dem trockenen Standort (Kuppe) eine signifikante Erhöhung des Diffusionskoeffizienten bei CaO-

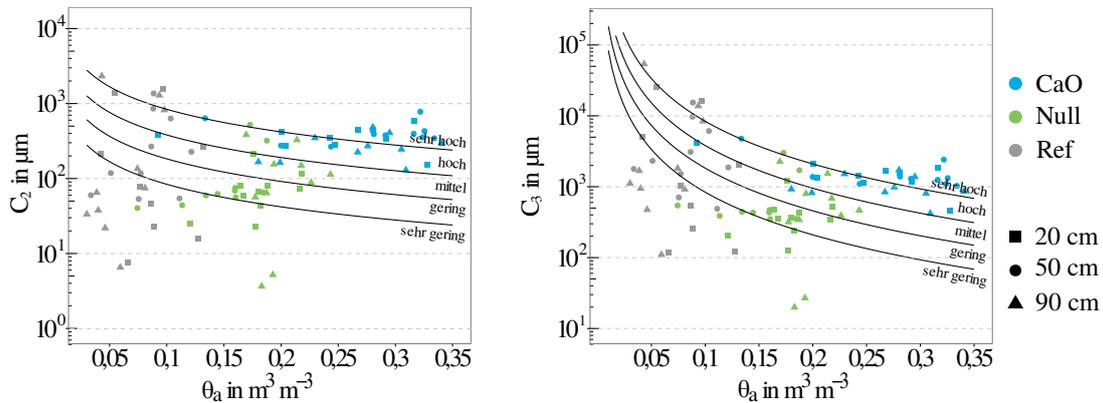


Abbildung 21:  $C_2$ -Index (links) und  $C_3$ -Index (rechts) ( $\psi_m = -60$  hPa) für den Standort Klein-Altendorf 2, mit der Einstufung für  $k_l$  nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ).

Applikation in beiden Tiefen. Im Vergleich dazu sind auf dem feuchteren Standort die Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zwar geringer, dennoch werden unter trockeneren Verhältnissen im Sommer nach 21 Monaten ebenfalls signifikant höhere Werte bei CaO-Zugabe in 50 und 90 cm Tiefe erreicht als ohne („Null“).

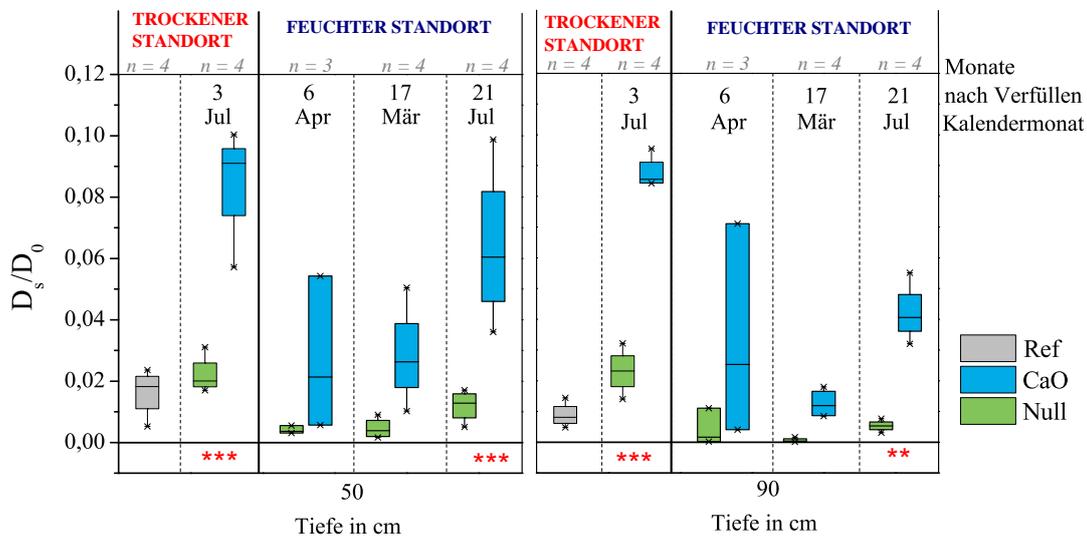


Abbildung 22: Relativer Diffusionskoeffizient ( $D_s/D_0$ ) in 50 und 90 cm Bodentiefe am Standort Klein-Altendorf 1 und 2 bei  $\psi_m = -60$  hPa. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Für diese Beprobungstermine werden im Vergleich zum Standort Hannover höhere  $C_1$ - und Tortuositätsindices erzielt, während die Unterschiede zwischen „CaO“ (höherer  $C_1$ -Index und geringere Tortuosität) und „Null“ in einem ähnlichen Bereich liegen (Tab. 10).

### 3.6 Ergebnisse

Tabelle 10: Luftgefülltes Porenvolumen ( $\Theta_a$ ),  $C_1$ - und Tortuositätsindices in 50 und 90 cm Bodentiefe für den Standort Klein-Altendorf bei  $\psi_m = -60$  hPa, MW=arithmetischer Mittelwert, STA=Standardabweichung, n=3-4.

		Monate nach Verfüllen der Grube							
		3		6		12		16	
		Kuppe				Senke			
Variante	Tiefe (cm)	$\Theta_a$ m <sub>3</sub> m <sub>-3</sub>							
		MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA
Null	50	0,04	0,01	0,08	0,05	0,02	0,01	0,20	0,10
Null	90	0,05	0,02	0,07	0,01	-	-	0,06	0,02
CaO	50	0,15	0,07	0,11	0,10	0,19	0,11	0,14	0,01
CaO	90	0,13	0,09	0,18	0,06	-	-	0,21	0,11
Variante	Tiefe (cm)	$C_1$ -Index							
		MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA
Null	50	0,06	0,01	0,08	0,08	0,02	0,01	0,11	0,06
Null	90	0,09	0,06	0,02	0,01	-	-	0,07	0,02
CaO	50	0,17	0,09	0,09	0,07	0,12	0,08	0,11	0,05
CaO	90	0,20	0,11	0,11	0,03	-	-	0,11	0,05
Variante	Tiefe (cm)	Tortuositätsindex							
		MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA
Null	50	4,17	0,51	7,00	7,09	7,64	2,17	3,43	1,05
Null	90	3,82	1,32	7,47	1,47	-	-	4,01	0,71
CaO	50	2,64	0,74	4,27	1,91	3,26	1,16	3,17	0,90
CaO	90	2,47	0,66	3,09	0,40	-	-	3,33	1,21

Die CaO-Zugabe führt nur zu einer deutlichen Erhöhung der Bodenrespiration in 50 cm Tiefe (Abb. 23). In 90 cm Tiefe treten in „CaO“ geringere bis keine Unterschiede im Vergleich zu „Null“ auf.

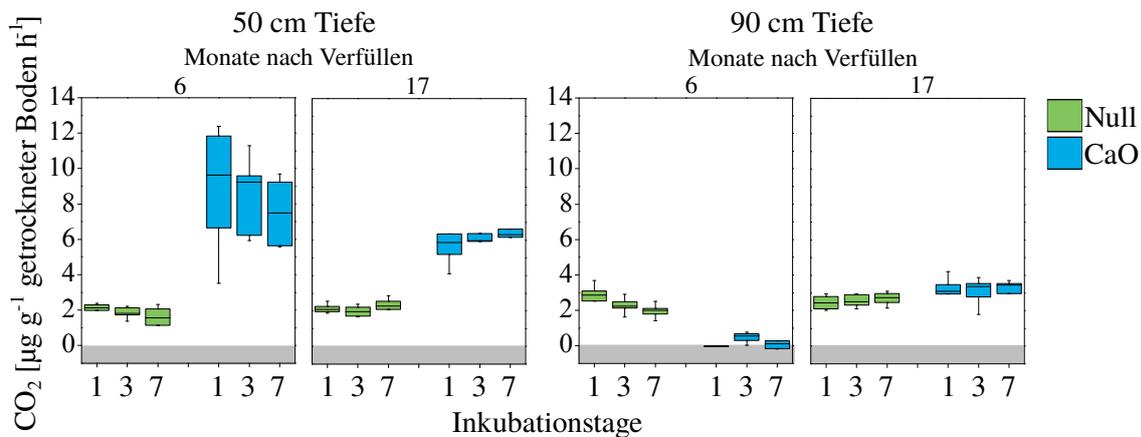


Abbildung 23: Respirationsrate von ungestörten, inkubierten Bodenproben aus 50 und 90 cm Tiefe am Standort Klein-Altendorf 1 bei  $\psi_m = -60$  hPa, n = 6.

Tabelle 11: pH-Wert, organischer Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) und Calciumcarbonatgehalt ( $CaCO_3$ ) der beprobten Tiefen 50 und 90 cm am Standort Klein-Altendorf 1, MW=arithmetischer Mittelwert, STA =Standardabweichung, n = 6.

		Monate nach Verfüllen der Grube			
		6		17	
Variante	Tiefe (cm)	pH in $CaCl_2$			
		MW	STA	MW	STA
Null	50	7,12	0,14	7,09	0,03
Null	90	7,10	0,06	7,10	0,08
CaO	50	8,39	0,08	8,16	0,15
CaO	90	8,98	0,09	8,30	0,11
Variante	Tiefe (cm)	$C_{org}$ in %			
		MW	STA	MW	STA
Null	50	0,44	0,17	0,32	0,05
Null	90	0,51	0,11	0,48	0,12
CaO	50	1,16	0,19	0,90	0,26
CaO	90	0,47	0,07	0,62	0,15
Variante	Tiefe (cm)	$CaCO_3$ in %			
		MW	STA	MW	STA
Null	50	0	-	0	-
Null	90	0	-	0	-
CaO	50	1,93	0,97	1,72	0,43
CaO	90	3,70	0,62	1,95	0,75

Der pH-Wert steigt vom neutralen Bereich auf den „schwach bis mäßig alkalischen“ Bereich (Ad-hoc-AG Boden 2005) durch die Zugabe von CaO an (Tab. 11). Das bei der Carbonatisierung gebildete  $CaCO_3$  erreicht 6 Monate nach Verfüllen der Gruben einen Wert von 3,7 % in 90 cm Tiefe (maximal 4,7), während in 50 cm Tiefe und nach darauffolgender Beprobung nach 17 Monaten Werte von 2 % nicht mehr überstiegen werden. Weiterhin verfügen Proben aus 50 cm Tiefe der „CaO“-Variante über die höchsten  $C_{org}$ -Werte.

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse des Monitorings dargestellt. Deutlich erkennbar ist die initiale Austrocknung von „CaO“. In 50 cm Tiefe sinkt im Vergleich zu „Ref“ das  $\psi_m$  in „CaO“ um ca. 400 hPa, in „Null“ um ca. 100 hPa. Ende Mai steigt  $\psi_m$  nach zwei Niederschlagsereignissen bis in den nah-gesättigten Bereich, was in beiden Tiefen eine Zunahme der  $CO_2$ -Konzentration und Abnahme der  $O_2$ -Konzentration in „Null“ zur Folge hat. Für „Null“ und „CaO“ vergleichbare  $O_2$ -Konzentrationen werden erst nach einer Trockenphase im Juli erreicht. In „CaO“ lässt sich über den Untersuchungszeitraum kein  $CO_2$  nachweisen.

### 3.6 Ergebnisse

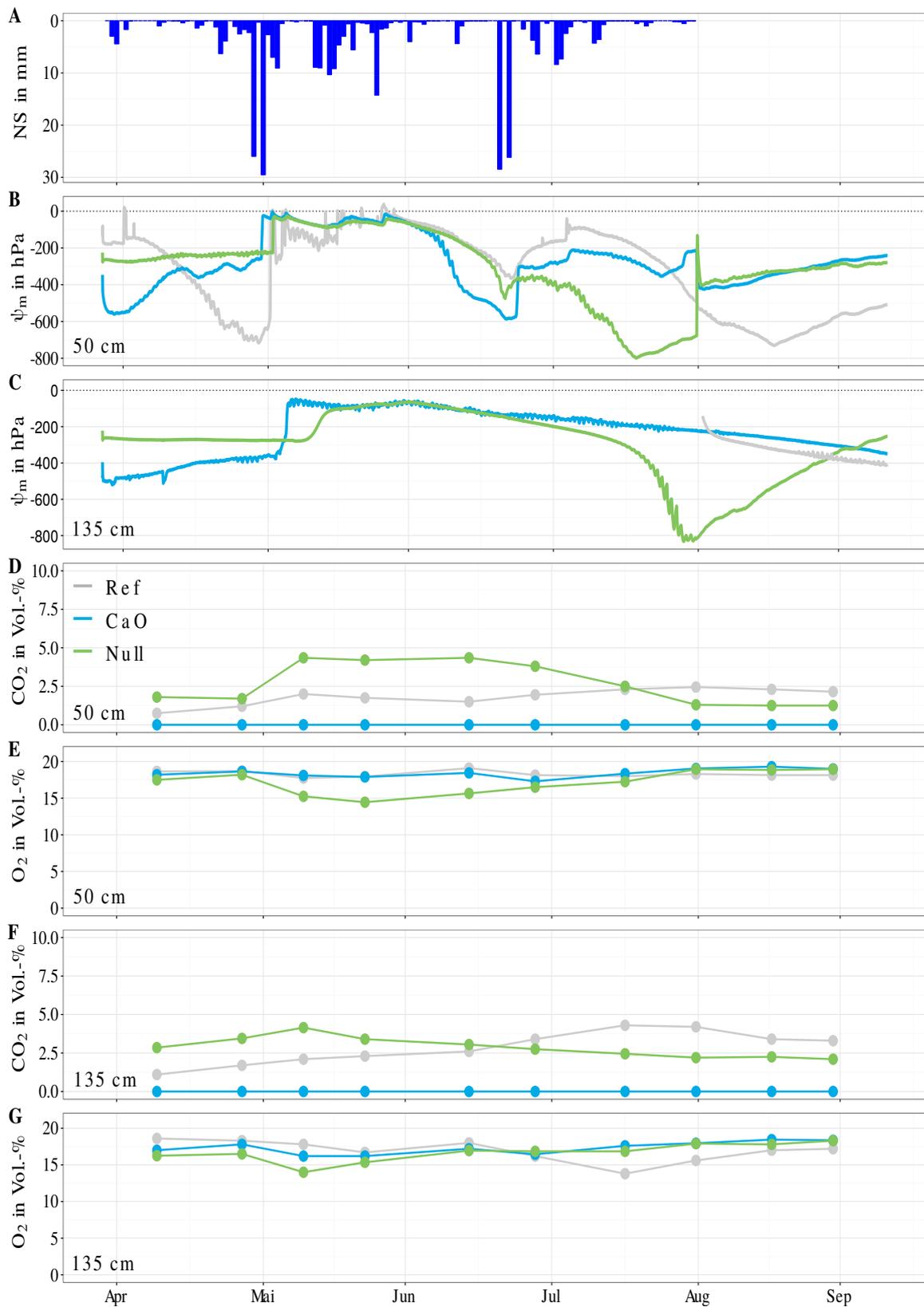


Abbildung 24: Monitoring am Standort Klein-Altendorf 2 für den Zeitraum Dezember 2014 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), CO<sub>2</sub>-Konzentration (D) und O<sub>2</sub>-Konzentration (E) in 50 cm, CO<sub>2</sub>-Konzentration (F) und O<sub>2</sub>-Konzentration (G) in 135 cm Tiefe.

### 3.6.4 Frankfurt am Main

Aufgrund der Durchmischung des Bodens mit zerkleinertem Ausgangsgestein, und damit hohem Skelettanteil, konnten an diesem Standort keine Stechzylinderbehebungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse beschränken sich daher auf das Monitoring von Matrixpotentialen und Bodengaszusammensetzung. In „Ref“ konnte das Monitoring nur in 50 cm Tiefe durchgeführt werden, da eine Installation im Ausgangsgestein nicht möglich war. Sackungen konnten für beide Grabsimulationen nicht festgestellt werden

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse des Monitorings zusammengefasst. Durch das Einmischen von CaO konnte eine initiale Trocknung auf  $\psi_m = -600$  in 50 cm Tiefe und  $\psi_m = -200$  in 135 cm Tiefe erreicht werden, die in 50 cm Tiefe bis zum nächsten größeren Niederschlagsereignis, in 90 cm Tiefe etwas länger anhielt. Bis in die Sommermonate zeigten „CaO“ und „Null“ ähnliche Verläufe, „Null“ zeigte anschließend bis in den Herbst niedrigere Matrixpotentiale. Ab April 2015 trocknete in 50 cm Tiefe „Ref“ im Vergleich zu den geschütteten Varianten deutlich stärker aus.

„CaO“ und „Null“ unterscheiden sich kaum in ihrem  $O_2$ -Gehalt, deutlicher ausgeprägt sind die Unterschiede der  $CO_2$ -Gehalte. Für „CaO“ lässt sich in 50 cm kein  $CO_2$  nachweisen, in 135 cm erst ab Juni 2015, wobei hier die Gehalte deutlich unter denen von „Null“ bleiben.

### 3.6 Ergebnisse

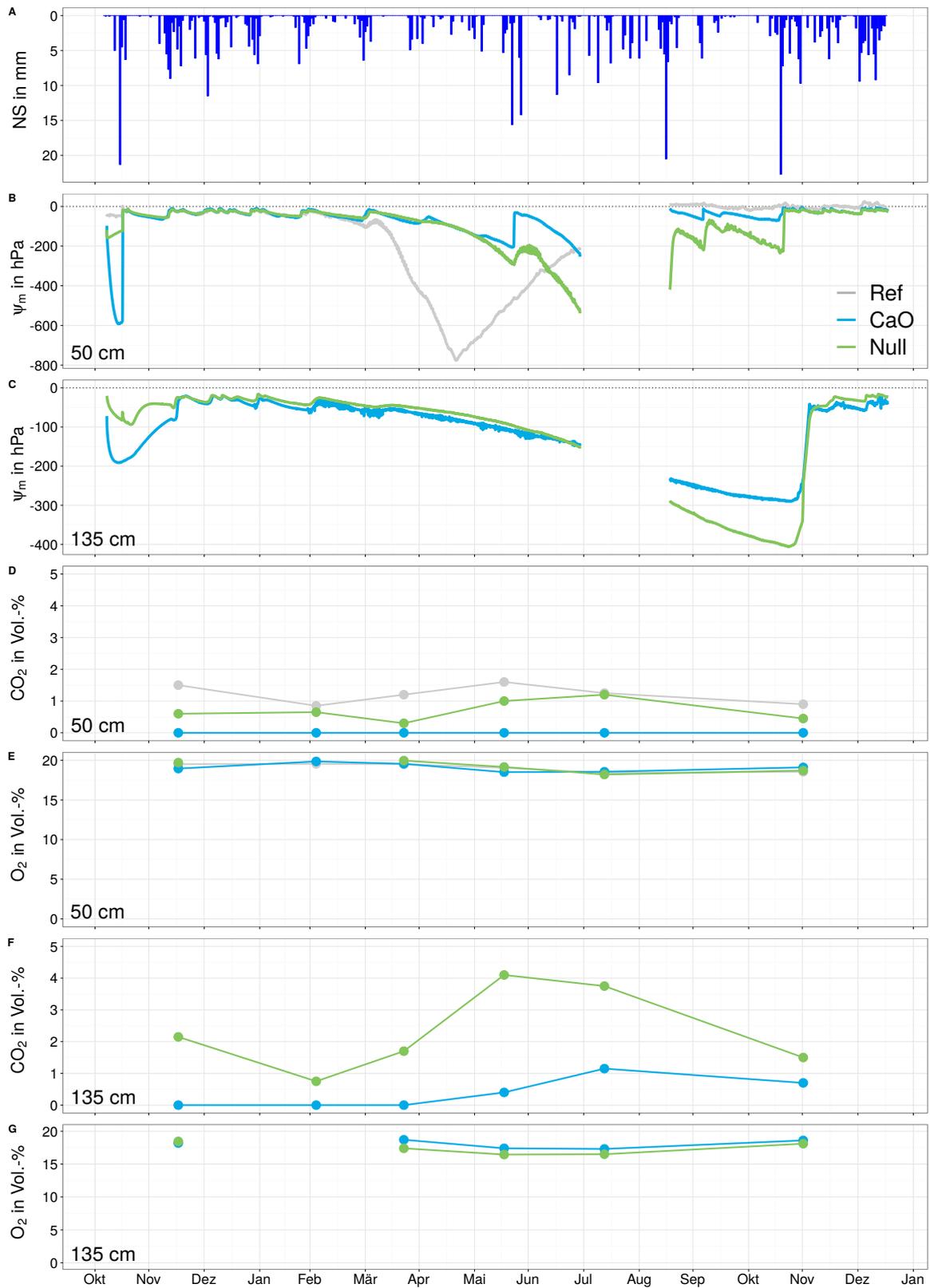


Abbildung 25: Monitoring am Standort Frankfurt am Main für den Zeitraum Oktober 2014 bis Januar 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentiale in 50 cm (B), Matrixpotentiale in 135 cm (C),  $CO_2$ -Konzentration (D) und  $O_2$ -Konzentration (E) in 50 cm,  $CO_2$ -Konzentration (F) und  $O_2$ -Konzentration (G) in 135 cm.

### 3.6.5 Hohenschulen

Die Probennahme erfolgte 33 Monate nach Verfüllen der Gruben. Während sich bei „CaO“ noch ein Grabhügel erhalten hat, zeigt sich bei „Null“ eine Vertiefung von ca. 10 cm, die auf eine Sackung (und damit einem Verlust an Porenvolumen) in dieser Variante schließen lässt.

Die in Abbildung 26 dargestellten Median-Werte von  $k_f$ - und  $k_l$  von „CaO“ liegen über denen von „Null“. Die  $k_f$  und  $k_l$  von „CaO“ streut im Vergleich zu „Null“ in den hoch bis sehr hoch eingestuftem Bereich. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ bestehen für  $k_l$  in 20 cm Tiefe. Für  $k_f$  (tiefenunabhängig) und für  $k_l$  in 50 cm Tiefe lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen.

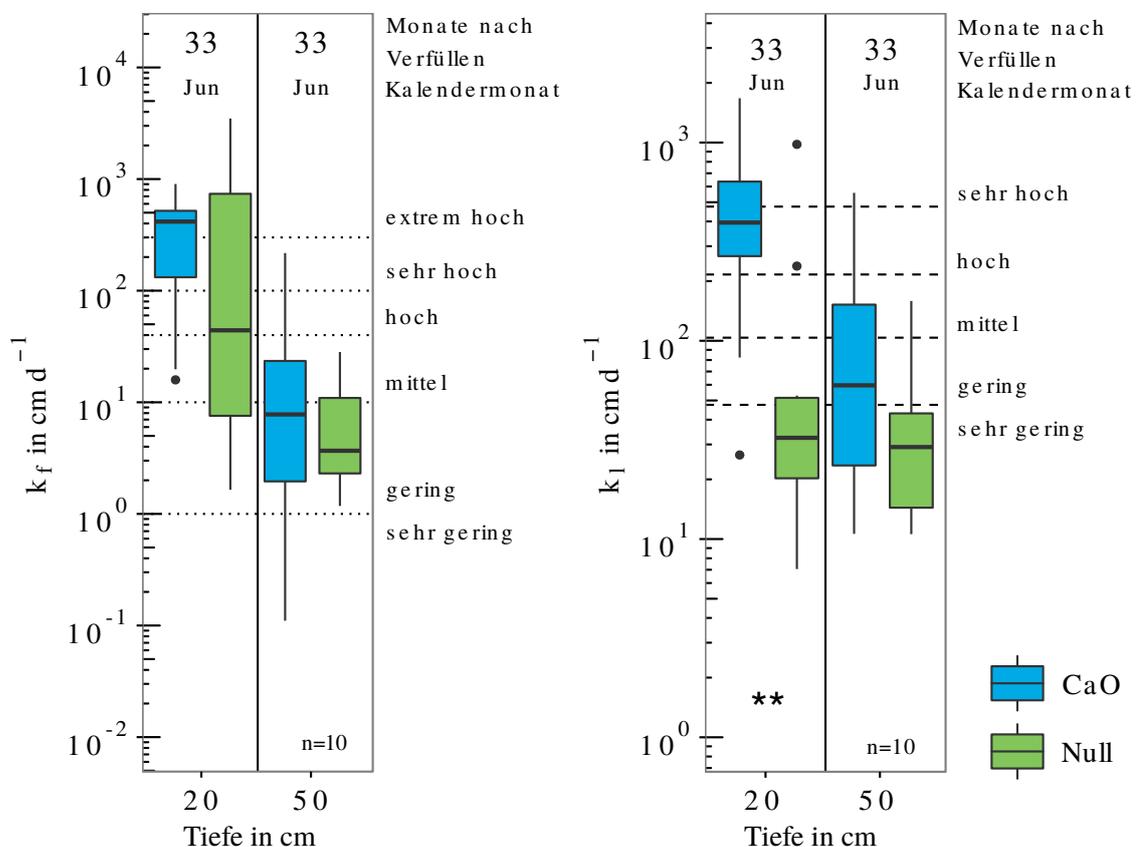


Abbildung 26: Gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) (links) und Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) ( $\psi_m = -60$  hPa) (rechts) für den Standort Hohenschulen. Klassengrenzen für  $k_f$  nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und  $k_l$  nach DVWK (1997). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

Zwischen „CaO“ und „Null“ bestehen keine signifikanten Unterschiede in  $C_2$  und  $C_3$  (Anhang A.3). Allerdings weist „CaO“ in 20 cm Tiefe zum einen höhere  $\Theta_a$  auf als „Null“ zum anderen streuen die Werte hier deutlich in die als hoch und sehr hoch klassifizierten Bereiche (Abbildung 27).

### 3.6 Ergebnisse

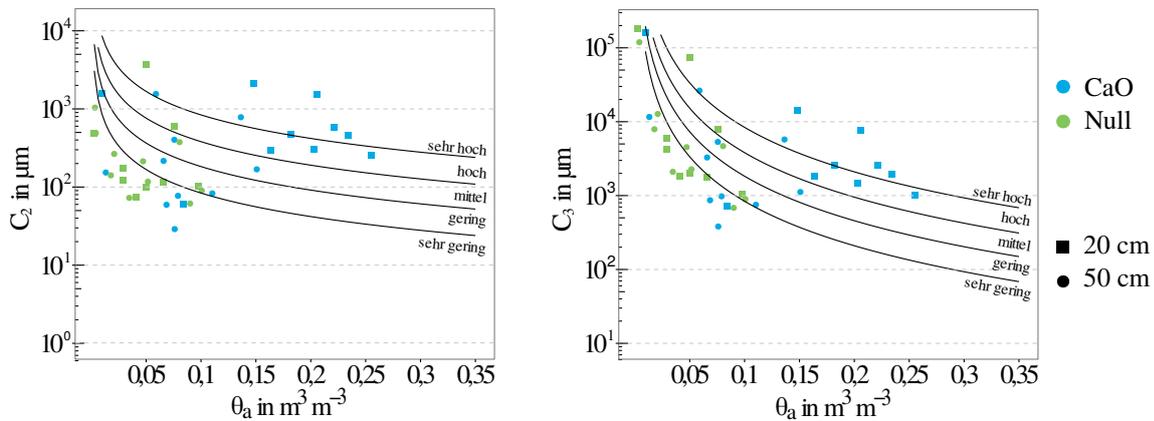


Abbildung 27:  $C_2$ -Index (links) und  $C_3$ -Index (rechts) ( $\psi_m = -60$  hPa) für den Standort Hohenschulen, mit der Einstufung für  $k_l$  nach DVWK (1997) in Abhängigkeit vom luftgefüllten Porenvolumen ( $\Theta_a$ ).

Die Wasserspannungskurven in Abbildung 28 zeigen für „Null“ deutlich flachere Verläufe im Bereich der wGP und damit einen geringen Anteil dieser Porenklasse. Im Vergleich dazu zeigt „CaO“ im Bereich der weiten Grobporen (wGP) einen steileren Verlauf, was einen höheren Anteil an wGP bedeutet.

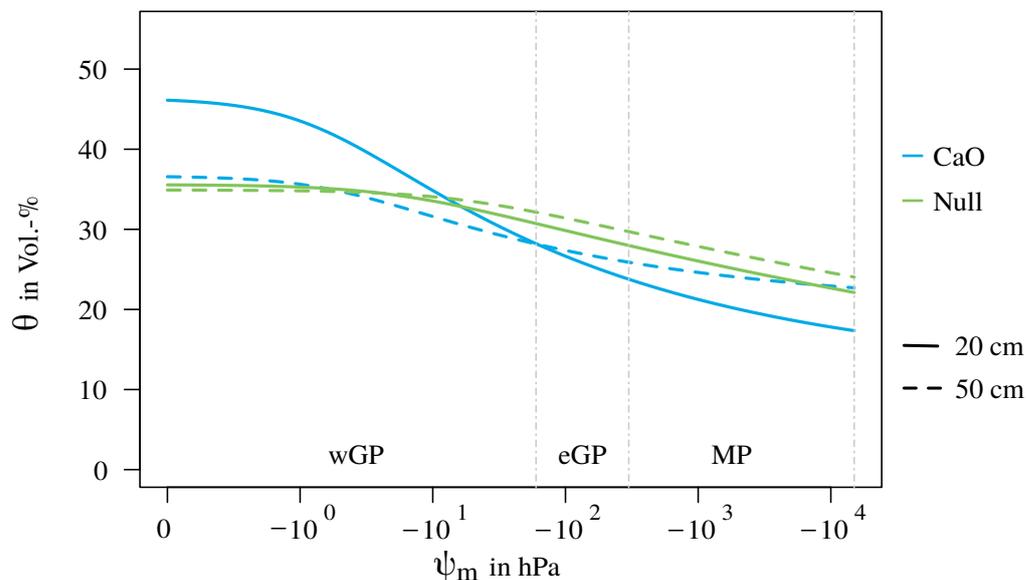


Abbildung 28: Wasserspannungskurven für den Standort Hohenschulen, mit den Bereichen der weiten Grobporen (wGP), engen Grobporen (eGP) und Mittelporen (MP).

Die Ergebnisse des Monitorings sind in Abbildung 29 dargestellt. In beiden Tiefen zeigt sich anhand positiver  $\psi_m$  für alle Varianten von Herbst bis Frühjahr und nach starken Niederschlagsereignissen Staunässe. Die vergleichbaren Verläufe der  $\psi_m$  von „CaO“ und „Null“ deuten für ungesättigten Bedingungen, bei den zugrunde liegenden unterschiedlichen Verläufen der Wasserspannungskurven, für „CaO“ auf einen höheren Anteil von  $\Theta_a$ .

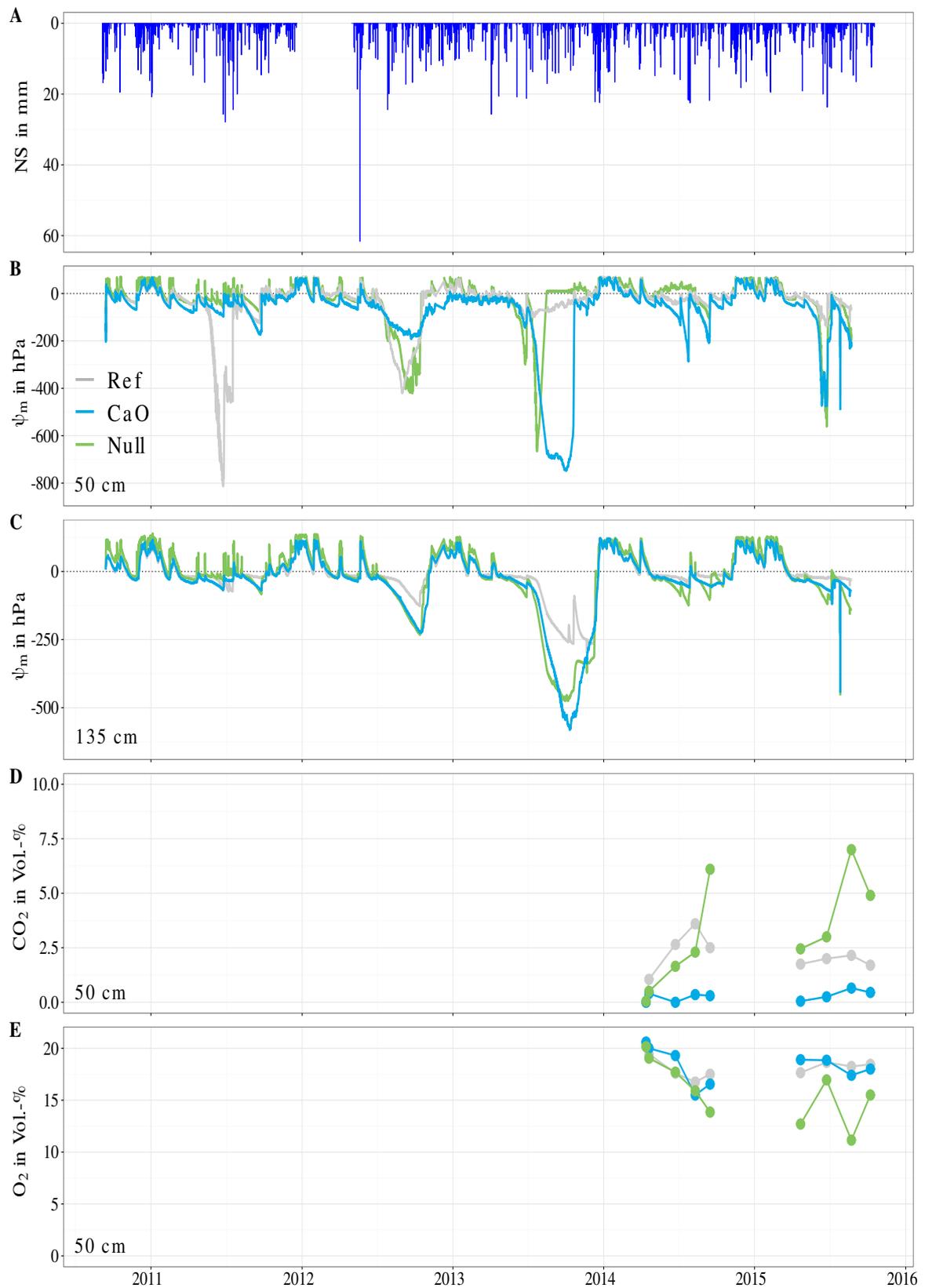


Abbildung 29: Monitoring am Standort Hohenschulen für den Zeitraum September 2011 bis Oktober 2016 mit Niederschlag (A), Matrixpotentialen in 50 cm (B), Matrixpotentialen in 135 cm (C), CO<sub>2</sub>-Konzentration (D) und O<sub>2</sub>-Konzentration (E) in 50 cm Tiefe.

### 3.6 Ergebnisse

---

Die Bodengasmessungen (Abb. 29 D und E) bestätigen dies. In 50 cm Tiefe werden in „Null“ höhere CO<sub>2</sub>-Gehalte und geringere Sauerstoff (O<sub>2</sub>)-Gehalte gemessen als in „CaO“. Messungen in 135 cm Tiefe waren aufgrund wassergefüllter Bodengassonden nicht möglich.

### 3.7 Diskussion der Ergebnisse

Über den Abbau von bestatteten Leichen entscheiden nach Fiedler und Graw (2003) neben Eigenschaften der Leiche und dem Bestattungsprozess auch die Standort-eigenschaften des Friedhofs. Während die Leiche und der Bestattungsprozess nur in geringem Ausmaß beeinflussbar sind, kann durch Sanierungsmaßnahmen wie Bodenaustausch (Uldin und Aeschlimann 2011) oder Grabkammersysteme (Schmidt 2009) auf den Gashaushalt des Grabes Einfluss genommen werden. Durch beide Maßnahmen entstehen neben hohen Kosten große Mengen Bodenaushub, die an anderer Stelle abgelagert werden müssen. Eine kostengünstige Alternative stellt eine Strukturmelioration des vorhandenen Bodenmaterials dar, das anschließend vor Ort weiter verwendet werden kann. Hartge (1972) unterscheidet Bodenverbesserungsmittel, die direkt zu einer Änderung der Porengrößenverteilung führen (z.B. Fremdkörnungen), von Bodenverbesserungsmitteln, die stabilisierend auf eine maschinelle Veränderung der Porengrößenverteilung wirken (z.B. Branntkalk).

Der Standort Frankfurt zeigt, dass die Einmischung einer Fremdkörnung (das zu Geröllgrus zerkleinerte Ausgangsgestein) eine positive Wirkung auf die O<sub>2</sub>-Gehalte bis in 135 cm Tiefe hat und diese durch Einmischen von CaO nicht gesteigert werden kann. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Mischungsverhältnis von Boden und Ausgangsgestein bei ca. 1:1 liegt. Aufgrund dieser geologischen Sonderstellung ist der Standort Frankfurt von der weiteren Betrachtung ausgenommen.

Damit eine ausreichende Sauerstoffversorgung für den Verwesungsprozess gewährleistet ist, ist ein möglichst ungestörter Gasaustausch zwischen Atmosphäre, Deckschicht und Sargzone notwendig. Aus bodenphysikalischer Sicht ist hierfür nicht nur die Menge von luftgefüllten Poren, sondern auch deren Kontinuität und Konnektivität entscheidend. Der für den Sauerstofftransport entscheidende Prozess, die Diffusion, ist dabei im Gegensatz zur Luftleitfähigkeit weniger von der Leitfunktion der größten Pore als vielmehr von der Kontinuität und Tortuosität des gesamten luftgefüllten Porenraums abhängig (Ball et al. 1988; Hillel 2003; Stepniewski und Glinski 1985).

Durch die Zugabe von Branntkalk konnte eine deutliche Verbesserung der Diffusionsrate in Zusammenhang mit höherer Kontinuität ( $C_1$ ) und geringerer Tortuosität gebracht werden. In Abhängigkeit der Standorteigenschaften (Bodentyp und Bodenart) weisen die Diffusionsraten zwar eine unterschiedlich hohe Streuung im Jahresverlauf auf, dennoch erhöht sich durch die CaO-Zugabe die Diffusionsrate auf allen Standorten durchschnittlich um das 4-fache. Im Gegensatz dazu sind Diffusionsraten ohne die Zugabe von CaO für einen Großteil vergleichbar mit denen von verdichteten tonreichen Böden ( $D_s/D_0 < 0,01$ ) (Stepniewski et al. 1994) und liegen damit im oberen kritischen Grenzbereich von 0,02–0,005, ab dem die Bodenbelüftung z.B. aus pflanzenphysiologischen Sicht als unzureichend angesehen

wird (Fiedler 2001; Stepniewski und Glinski 1985; Flühler 1972). Mengede und Burghardt (2003) fanden vergleichbar geringe Diffusionskoeffizienten in 75–80 cm Grabtiefe eines Friedhofsbodens, den sie mit dem Verlust von Porenkontinuität in Verbindung gebracht haben.

Dagegen weisen die Daten der hier untersuchten Böden mit CaO-Zugabe auf eine höhere Funktionalität der Poren hin, d.h. auf einen höheren Anteil der luftgefüllten Poren der am Gasaustausch teilnimmt (Fish und Koppi 1994). Die Stärke des Zusammenhangs zwischen luftgefülltem Porenraum und Diffusivität (die Funktionalität) ist standortabhängig. Über den Beprobungszeitraum gesehen deuten höhere  $k_l$ -Werte, höhere  $C_1$ -,  $C_2$ - und  $C_3$ -Indices, geringere Tortuositätsindices und höherer  $O_2$ -Gehalte an, dass die bessere Funktionalität der Poren bei CaO-Zugabe auch zeitlich beständig bleibt, d.h. eine ausreichend hohe Stabilisierung dieser Poren bzw. der Kontaktpunkte zwischen den Mineralpartikeln gewährleistet sein muss. Diese findet zu Beginn durch die bereits erwähnte initiale Trocknung während der Löschreaktion (Gleichung 1 auf Seite 3) von CaO statt (Witt 2002), die eine Zunahme der Kohäsion zwischen den Partikeln durch kontrahierende Wassermenisken erzeugt (Bohne et al. 1985; Horn und Smucker 2005). Eine Zunahme der Kohäsion kann möglicherweise auch durch eine mikrobielle Umwandlung von CaO zu  $CaCO_3$  und Ausfällung in Form von Kalkbrücken zwischen den Bodenpartikeln („Biomineralisation“) verursacht sein, die besonders bei geringer Wassersättigung und geringen  $CaCO_3$ -Gehalten eine hohe Bindungsstärke aufweisen (Cheng et al. 2013).

Für die tonreicheren Standorte Klein-Altendorf und Fehmarn ist eine Stabilisierung der Porenstruktur zusätzlich über eine Erhöhung der Aggregatstabilität durch Quellungs- und Schrumpfungsprozesse zu erwarten. Hartge und Ellies (1977) konnten in diesem Zusammenhang eine deutliche Zunahme an stabilen Grobporen in einem tonreichen wiederverfüllten Boden 2,5 Jahre nach CaO-Zugabe nachweisen. An den Standorten Fehmarn, Hannover, Klein-Altendorf 1 und Hohenschulen ist anhand der für „CaO“ und „Null“ unterschiedlich verlaufenden Wasserspannungskurven eine Stabilisierung der bei Grabarbeiten geänderten Porengrößenverteilung durch Branntkalk nachweisbar. Der durch Grabarbeiten erhöhte Anteil an wGP konnte erhalten werden, am Standort Hohenschulen bereits über einen Zeitraum von 33 Monaten. Durch eine intensivere Einmischung von CaO auf den Standorten Fehmarn und Klein-Altendorf ist anzunehmen, dass sich dieser Strukturbildungseffekt stärker abzeichnen würde. So liegen die gemessenen Tortuositätsindices noch deutlich über denen von strukturierten Böden, die z.B. für den Löss-Standort Klein-Altendorf für Böden mit einem gut ausgebildetem Strukturporennetzwerk (Bioporen) unterhalb von 2 liegen, damit weniger tortuos ist (Uteau et al. 2013).

In Hinblick auf die  $C_1$ -Indices findet für die Beprobungen in den trockenen Sommermonaten ( $C_1 > 0,2$ ) für die „CaO“-Variante eine Annäherung an Werte des strukturierten Lössbodens (Uteau et al. 2013) statt. Damit zeigt sich, dass durch die lockere Schüttung nicht nur eine quantitative Verbesserung (mehr Porenraum), son-

dem auch eine qualitative Verbesserung (Funktionalität) des Porensystems für den Gastransport erzielt wird. Dass Quellungs- und Schrumpfungsprozesse wahrscheinlich auch in der „Null“-Variante eine Rolle spielen, deutet sich in den steigenden Diffusionskoeffizienten und  $C_1$ -Indices in 50 cm Tiefe bei der jeweils letzten Beprobung im Sommerhalbjahr am Standort Hannover (August 2016), Klein-Altendorf 2 (Juli 2016) und Fehmarn (August 2016) an. Die Zunahme der  $C_1$  (Porenkontinuität) und Abnahme der Tortuosität kann hier in Verbindung mit ersten leitfähigen Strukturporen gebracht werden (Groenevelt et al. 1984; Fish und Koppi 1994; Dörner et al. 2012).

Inwieweit eine Beeinträchtigung der Bodenlebewesen durch die Erhöhung des pH-Werts bei Zugabe von CaO stattfindet, sollte anhand von Respirationsraten ( $\text{CO}_2$ -Emission) geprüft werden. Für alle Standorte zeigt sich jedoch kein einheitlicher Trend, da nach CaO-Zugabe sowohl Zunahmen als auch Abnahmen der Respirationsraten im Vergleich zur „Null“-Variante auftraten. Dabei können Zunahmen u.a. eine Folge der höheren mikrobiellen Aktivität z.B. durch pH-Wert Erhöhung (DeLaune et al. 1981; Haynes und Naidu 1998) sein und/oder in Zusammenhang mit einer Steigerung der Mineralisierungsrate durch eine verbesserte Sauerstoffversorgung, die in der „CaO“-Variante durch die Erhöhung der Diffusionsrate ermöglicht wird, stehen (Stepniewski und Stepniewska 2009; Ball 2013). Im Umkehrschluss lassen sich die geringen Respirationsraten am Standort Fehmarn u.a. auf eine vergleichsweise schlechtere Belüftung (geringere Diffusivität) zurückführen. Zusätzlich sind höhere Respirationsraten bei Proben mit höheren  $C_{org}$ -Gehalten, d.h. höherer Energiezufuhr für den mikrobiellen Stoffwechselprozess zu finden, die durch die räumlich heterogene Verteilung bei Verfüllung der Gruben in beiden Varianten „CaO“ und „Null“ auftreten. Dieser Effekt ist beispielsweise am Standort Hannover bei der Beprobung nach 12 Monaten in beiden Varianten und am Standort Klein-Altendorf 1 für die „CaO“-Variante in 50 cm Tiefe zu erkennen. Andererseits kann die Änderung im pH-Wert die Zusammensetzung der Mikroorganismen ändern, deren Aktivität bei Überschreiten des Toleranzbereiches (bei pH 10) abnehmen kann (Schotsmans et al. 2014). Wie auch bei Deltedesco et al. (2015) zeigt sich aber in dieser Arbeit, dass eine mögliche Schädigung der Bodenlebewesen ggf. nur über kurze Zeit auftritt. Vielmehr ist hier die Ursache für geringe, bzw. negative  $\text{CO}_2$ -Werte ( $\text{CO}_2$ -Aufnahme des Bodens) in chemischen Prozessen zu finden. Durch die ablaufende Carbonatisierung (Gleichung 5 auf Seite 3) wird  $\text{CO}_2$  verbraucht (Witt 2002), das zuvor bei der Bodenatmung mikrobiell freigesetzt wird. Dies lässt sich für alle Standorte anhand höherer  $\text{CaCO}_3$ -Gehalte der Proben mit negativen  $\text{CO}_2$ -Werten belegen (Hannover 6 und 9 nach Verfüllen der Gruben; Klein-Altendorf 1 und Fehmarn in 90 cm). Auch Schotsmans et al. (2014) beschreiben ein Absinken der  $\text{CO}_2$ -Konzentration unmittelbar nach CaO-Zugabe in einem Freilandversuch. Dass dieser Prozess auch über einen Zeitraum von 2 Jahren anhält, wird durch das Bodengas-Monitoring bestätigt. An allen neuangelegten Standorten konnte über den Versuchszeitraum kein  $\text{CO}_2$

nachgewiesen werden. Unter der Annahme, dass CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gehalt summiert ca. 21 Vol.-% ergeben, liegen die gemessenen CO<sub>2</sub>-Gehalte am Standort Hohenschulen noch nach 5 Jahren unter den zu erwartenden Gehalten. Damit ist bei der Betrachtung von gemessenen Respirationsraten zu berücksichtigen, dass in Abhängigkeit von der Intensität der Carbonatisierung die Menge an freigesetztem CO<sub>2</sub> für die „CaO“-Variante unterschätzt wird. Hinweise auf eine negative Beeinträchtigung des Bodenlebewesens bzw. der biologischen Aktivität sind anhand dieser Ergebnisse nicht festzustellen.

Nach Dent et al. (2004) wird bei der Verwesung von Leichen durch die Bildung von Abbaugasen, unter aeroben Bedingungen v.a. Kohlenstoffdioxid, Porenraum belegt. Dies mindert das für den Sauerstofftransport von der Bodenoberfläche zum Sarg zur Verfügung stehende Porenvolumen. CaO kann einen Teil des bei der Verwesung entstehenden Kohlenstoffdioxids binden und es sollte mehr Porenraum für den abwärtsgerichteten Transport von Sauerstoff zur Verfügung stehen.

Leichenwachs kann unter aeroben Bedingungen abgebaut werden (Fründ und Schoenen 2009). Sollte ein Verdacht auf die Bildung von Leichenwachs in bestehenden Gräbern vorliegen, kann das Einmischen von Branntkalk auch zur nachträglichen Verbesserung der O<sub>2</sub>-Verfügbarkeit und damit dem Abbau des Leichenwachses angewendet werden.

An den Standorten Frankfurt, Hannover und Fehmarn kann für „Ref“ im Frühjahr und Sommer eine stärkere Austrocknung (geringere  $\psi_m$ ) festgestellt werden. Dies kann auf ein intaktes sekundäres Porensystem zurückgeführt werden, das Niederschlagswasser schnell ableitet (Zehe und Flühler 2001). In beiden Grabsimulationen stellen sich im Vergleich dazu höhere  $\psi_m$  ein, was auf eine Zerstörung dieser vertikalen Fließwege und Störung des Bodenwasserhaushalts durch die Grabarbeiten deutet. Die Meliorationsmaßnahme zeigt unabhängig von Textur und Ausgangswassergehalt positive Auswirkungen auf die Bodenstruktur des geschütteten Bodens und die Sauerstoffverfügbarkeit im Grabraum. Für eine initiale Trocknung haben sich 20 kg CaO m<sup>-3</sup> bewährt. Ausschlaggebender Faktor für den Erfolg der Meliorationsmaßnahme ist eine gleichmäßige Durchmischung des Bodens mit Branntkalk. Dies ist bei sehr bindigen Böden (Fehmarn) erschwert und erfordert besondere Sorgfalt beim Ausbaggern der Gräber. Mit der im Projekt verwendeten Methodik, den Branntkalk bereits während des Aushebens der Gruben einzumischen, kann eine gleichmäßige Verteilung deutlich verbessert werden. Staunässe kann durch die Meliorationsmaßnahme nicht verhindert werden.

#### **Veränderung der Vorhabensdurchführung**

Die Vorhabensdurchführung wurde in drei Punkten geändert, welche das Anlegen der Grabsimulationen, das Monitoring von Redoxpotentialen und die Beprobungsintervalle betrafen.

Nach SVLFG (2010) müssen Grabwände durch Verbaumaßnahmen gegen Einsturz

gesichert werden. Dies erfolgt auf Friedhöfen häufig mit einem Kastenverbau, der während der Grabarbeiten abgesenkt und erst nach Verfüllen des Grabes herausgezogen wird. Damit sind die Grabwände für ein mechanisches Aufbrechen von Schleifspuren nicht zugänglich. Diese Maßnahme wurde in den mit Branntkalk behandelten Grabsimulationen daher nicht umgesetzt. Der Verlauf der  $\psi_m$  am Standort Hohenschulen, an dem ein Aufbrechen der Schleifspuren in „CaO“ stattgefunden hat, zeigt, dass dies keinen nennenswerten Effekt auf die Bildung von Staunässe hatte. Unter diesen Bedingungen sind neben der Applikation von Branntkalk dennoch Drainagen notwendig.

Für das Monitoring der Redoxpotentiale konnte je Variante und Tiefe eine Redoxsonde mit Platinelektrode verbaut werden. Diese Platinelektrode ist ca. 3 mm lang und misst das Redoxpotential in einem Volumen (ca. 2 mm<sup>3</sup>) das deutlich unter dem repräsentativen Elementarvolumen von Böden (nach Kutílek und Nielsen (1994)  $\geq 100$  cm<sup>3</sup>) liegt. Greenwood und Goodman (1967) zeigten, dass in Böden zwischen wassergesättigten und luftgefüllten Bereichen auf der Mikroskala scharfe Übergänge bestehen. Um eine Aussage bezüglich des Redoxpotentials eines Bodens treffen zu können, ist daher eine Mehrzahl an Parallelessungen notwendig (Fiedler et al. 2007). An den aus „CaO“ entnommenen ungestörten Bodenproben zeigten sich nach Abschluss der Laboruntersuchungen Kalkkrusten. Diese Krustenbildung kann auch für die Platinelektrode angenommen werden und verfälscht das Messergebnis (Fiedler et al. 2007). Die an den Versuchsstandorten durchgeführten Redoxmessungen standen zum Teil im Widerspruch zu Bodengas- und Matrixpotentialmessungen. Zur Messung der O<sub>2</sub>-Verfügbarkeit sind die eingesetzten Bodengassonden geeigneter. Für eine Messung werden ca. 100 ml Bodenluft entnommen. Dies entspricht bei  $\Theta_a = 0,2$  m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> einem Bodenvolumen von 500 cm<sup>3</sup> das damit innerhalb des repräsentativen Elementarvolumens von Böden liegt. Der Redoxzustand einzelner Aggregate ist für die Sauerstoffversorgung des Grabes weniger von Bedeutung als ein luftgefülltes Porensystem zwischen einzelnen Aggregaten.

Durch häufig auftretende Staunässe konnten vor allem an den Standorten Fehmarn und Klein-Altendorf 1 die Probennahmen nicht in drei monatigen Abständen erfolgen. Am Standort Hannover und Klein-Altendorf 1 zeigte sich, dass Probennahmen in sehr feuchtem Zustand (Hannover: Probennahme nach 6 Monaten in 90 cm Tiefe, Klein-Altendorf 1: Probennahme nach 17 Monaten in 90 cm Tiefe) zu einer Abnahme der gemessenen  $k_f$ -,  $k_l$ - und  $D_s/D_0$ -Werte von „CaO“ führte, wobei die Abnahme von  $k_l$  stärker ausfiel als die von  $k_f$ . Dies wird auf die Erschütterungen während des Einschlagens der Stechzylinder zurückgeführt, die in „CaO“ zu einer Verdichtung führen. Daraus lässt sich ableiten, dass Branntkalk das Bodengefüge zwar stabilisiert, die stabilisierende Wirkung auch bei Sättigung erhalten bleibt, aber durch zusätzliche mechanische Belastung nahe Sättigung verloren geht. Werden mit Branntkalk stabilisierte Böden unter nassen Bedingungen erneut umgegraben, ist eine initiale Trocknung durch erneutes Einmischen von Branntkalk notwendig.

### 3.8 Handlungsempfehlung

Branntkalk hat texturunabhängig positive Auswirkungen auf das Bodengefüge und damit auch auf die Sauerstoffversorgung im Grabraum. Bei der Anwendung muss auf eine gleichmäßige Vermischung von Branntkalk und Boden geachtet werden. Auch wenn die Bildung von Haftnässe und der dadurch verringerte Sauerstofftransport in der Sargüberdeckung mit der Branntkalkapplikation verhindert wird, kann dennoch Staunässe auftreten und so zum Sauerstoffabschluss des Sarges führen („Badewanneneffekt“). Staunässe kann nur durch Drainagen beseitigt werden. Einen Überblick über notwendige Meliorationsmaßnahmen liefert Tab. 12. Die initiale pH-Wert-Erhöhung durch Branntkalk führt nicht zu einer Beeinträchtigung der biologischen Aktivität (bei einem pH-Ausgangsbereich von 6-7,5).

Tabelle 12: Meliorationsmaßnahmen in Abhängigkeit von Bodenart und Grund-/Stauwassereinfluß

	nicht bindiger Boden (Sande)		bindiger Boden (Lehme, Schluffe, Tone)	
	< 2,5 m	> 2,5 m	< 2,5 m	> 2,5 m
Grundwasserstand, Stauwassereinfluss				
Melioration	Branntkalk + Drainage	Branntkalk	Branntkalk + Drainage	Branntkalk
Einarbeiten von Branntkalk	Einstreuen während des Ausbaggerns		Einstreuen während des Ausbaggerns. In kleinen Schritten mit halb gefüllter Schaufel arbeiten, um Bildung großer Schollen zu vermeiden	

#### Bezug und Lagerung von Branntkalk:

- Verpackter Branntkalk löscht auch bei Kontakt mit Luftfeuchtigkeit ab, da das Verpackungsmaterial nicht vollständig abdichtet. Die Löschreaktion muss aber beim Mischen mit Bodenaushub erfolgen. Es wird daher empfohlen Branntkalk über den Landhandel zu beziehen und diesen nicht länger als 2 Monate und in einem trockenen Raum zu lagern. Aufgrund der geringeren Staubentwicklung ist gekörnter Branntkalk zu verwenden.
- Es kann Branntkalk mit einem Reingehalt an CaO von 55-100 % verwendet werden.
- Die aufzuwendende Menge an Branntkalk ist mit dessen Reingehalt an CaO zu berechnen, wobei das Ziel eine Einmischung von 20 kg CaO pro m<sup>3</sup> Boden ist.

$$\text{Branntkalk in kg} = \frac{20 \text{ kg}}{\text{Reingehalt CaO in kg kg}^{-1}}$$

Bei einem Reingehalt von 55 % werden pro m<sup>3</sup> Boden ca. 36,4 kg Branntkalk benötigt, bei einem Reingehalt von 77 % lediglich ca. 25 kg Branntkalk.

### **Arbeitsschutz:**

- Branntkalk wirkt reizend auf Haut und Atemwege und kann Augenschäden verursachen. Es ist das Sicherheitsdatenblatt für Calciumoxid zu beachten, das von den jeweiligen Herstellern bezogen werden kann.
- Eine Unterweisung der Anwender über Gebrauchs- und Verhaltensweisen und die Verwendung geeigneter Körperschutzmittel hat vor Einsatz zu erfolgen.

### **Arbeitsschritte beim Ausheben und Verfüllen des Grabes:**

- Der Branntkalk ist auf einer wasserundurchlässigen Unterlage oder in einer Wanne neben dem Grab bereitzustellen, um Kontakt mit feuchtem Untergrund zu vermeiden.
- Die Grasnarbe und der organische Oberboden müssen entfernt und können kompostiert werden. Dadurch wird verhindert, dass organisches Material, das sauerstoffzehrend wirkt beim anschließenden Verfüllen eingearbeitet wird. Der Branntkalk wird auf die freigelegte Fläche gestreut und es wird mit dem Ausheben des Grabes begonnen.
- Der Branntkalk ist sukzessive während des Aushebens in die Grube zu streuen, damit eine Durchmischung von Boden und Branntkalk beim Ausheben und anschließend beim Verfüllen des Grabes stattfindet. Ist die Grube angelegt sollte der gesamte Branntkalk bereits im Aushub eingemischt sein.
- Bei sehr bindigen Böden sollte, um die Durchmischung zu verbessern, die Grube schrittweise mit der Baggerschaufel ausgeschabt werden. Die Bildung großer Schollen, in die kein Branntkalk eingemischt wird, kann so minimiert werden.
- Bei feuchter Witterung ist der gekalkte Aushub bis zum Verfüllen mit einer Plane abzudecken.
- Der Aushub ist locker zu verfüllen und weder mit der Baggerschaufel noch mit Rüttelplatten zu verdichten. Es kann ein Grabhügel angelegt werden.

### **Grabpflege:**

- Um die lockere Schüttung zu erhalten sind Lastaufbringungen auf das Grab zu vermeiden.

### 3.9 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

---

- Durch die Stabilisierung mit Branntkalk kann der Grabhügel auch nach 6 Monaten noch vorhanden sein. Dieser darf nicht mit einem Bagger oder Rüttelplatte durch Verdichten des Bodens eingeebnet werden, sondern muss abgetragen werden.
- Nach Kompostauftrag kann das Grab bepflanzt werden. Negative Auswirkungen des Branntkalks auf die Bepflanzung wurden nicht festgestellt.

#### **Nachbelegung:**

- Branntkalk stabilisiert langanhaltend das Bodengefüge. Diese stabilisierende Wirkung geht bei hoher Wassersättigung jedoch verloren.
- Wenn ein mit Branntkalk verbessertes Grab für eine Nachbelegung wieder geöffnet wird, muss bei hoher Wassersättigung (Hände werden beim kneten einer Bodenprobe deutlich feucht) wieder Branntkalk (20 kg CaO pro m<sup>3</sup> Boden) zur Trocknung des Bodenaushubes eingesetzt werden.

### 3.9 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

#### **Publikation**

Filser, S., Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2015). „Branntkalk zur Strukturmelioreation von geschüttetem Boden“. In: Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, München. Berichte der DGB.

Filser, S., Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2016). „Stabilisierung von Bodenaushub bei Erdbestattungen“. Marktredwitzer Bodenschutztag, Tagungsband 9, S. 85-87.

Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2017)(in press). Changes in soil aeration and soil respiration of simulated grave soils after quicklime application. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, DOI:10.1002/jpln.201600351

#### **Präsentation**

Filser, S., Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2015). „Branntkalk zur Strukturmelioreation von geschüttetem Boden“. Vortrag. Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, München.

Filser, S., Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H., Horn, R. (2015). „Soil backfill stabilisation with quicklime“. Poster. SUSTAIN-Tagung, Kiel.

---

## 4 Fazit

Durch die Einmischung von Branntkalk in den Bodenaushub kann dieser beim Verfüllen stabilisiert und dadurch Porenraum erhalten werden. Die stabilisierende Wirkung kann auch nach 33 Monaten noch nachgewiesen werden, geht aber bei erneuten Grabarbeiten unter nassen Bedingungen verloren. Das stabilisierte Porensystem reicht zwar in seiner Qualität nicht an ein natürlich gewachsenes sekundäres Porensystem heran (kaum präferenzielle Fließwege und dadurch höhere Matrixpotentiale) ist in seiner Funktionalität für den Gasaustausch aber mit einem natürlichen Porensystem vergleichbar. In der mit Branntkalk verbesserten Grabsimulation konnten im Vergleich zur Grabsimulation ohne Branntkalk:

- höhere Luftleitfähigkeiten,
- höhere relative Diffusionskoeffizienten,
- geringere Tortuositäten,
- höhere Porenkontinuitäten ( $C_1$ -,  $C_2$ - und  $C_3$ -Indizes) und
- höhere  $O_2$ -Konzentrationen

gemessen werden.

Staunässe kann durch eine Strukturmelioration mit Branntkalk nicht verhindert werden, hier sind Drainagen notwendig. Die Meliorationsmaßnahme lässt sich in den bestehenden Bestattungsablauf integrieren und kann von Friedhofsmitarbeitern durchgeführt werden. In der entwickelten Handlungsempfehlung sind die notwendigen Arbeitsschritte zusammengefasst.

Sollte die Meliorationsmaßnahme auf Friedhöfen Anwendung finden, wäre eine messtechnische Begleitung des Verwesungsprozesses von Interesse. Über die im Projekt verwendeten Bodengasmessungen könnten bei tatsächlichen Bestattungen Aussagen zur  $CO_2$ -Aufnahme von Branntkalk und zum Gastransport bei in-situ  $O_2$ - und  $CO_2$ -Gradienten getroffen werden. Dies wäre mit der vorhandenen Messtechnik und entsprechender Kooperation mit Friedhöfen umsetzbar. Ein Weiterführen der Beprobungen an den angelegten Standorten ist vor dem Hintergrund der weiteren Strukturentwicklung der Null-Variante, bzw. der anhaltenden Strukturstabilisierung der CaO-Variante von Interesse. Die Fragestellungen sind hier:

- In welcher Zeitspanne entwickelt sich in geschütteten Boden ein natürliches sekundäres Porensystem?
- Wie langanhaltend ist eine Strukturmelioration mit Branntkalk?

## Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. KA5. Hrsg. von Ad hoc Arbeitsgruppe Boden. Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers.
- Al-Mukhtar, M., A. Lasledj und J. F. Alcover (2014). „Lime consumption of different clayey soils“. In: *Applied Clay Science* 95, S. 133–145.
- Ball, B. C. (2013). „Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation“. In: *European Journal of Soil Science* 64.3, S. 357–373.
- Ball, B. C., M. F. O’sullivan und R. Hunter (1988). „Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage“. In: *Journal of Soil Science* 39.3, S. 327–339.
- Beese, F., B Meyer und J Pollehn (1979). „Veränderung des Scher-und Kompressionsverhaltens von Ap-Horizont-Material aus Löß-Parabraunerden durch Kalkung“. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 142.2, S. 245–257.
- Bérubé, M.-A., M. Choquette und J. Locat (1990). „Effects of lime on common soil and rock forming minerals“. In: *Applied Clay Science* 5.2, S. 145–163.
- Blume, H. P., K. Stahr und P. Leineweber (2010). *Bodenkundliches Praktikum*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Bohne, H., H. Graf von Reichenbach, K. H. Hartge und R. Tippkötter (1979). „Stabilisierung von Tonaggregaten mit verschiedenen Ca-Verbindungen“. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 29, S. 207–212.
- Bohne, H., K. H. Hartge und H. Graf von Reichenbach (1985). „Einfluß und Wirkungsweise von CaO bei der Belastung von Aggregaten“. In: *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker-und Festgesteinen*. Springer, S. 672–680.
- Bretz, F., T. Hothorn und P. Westfall (2016). *Multiple comparisons using R*. CRC Press.
- Cheng, L., R. Cord-Ruwisch und M. A. Shahin (2013). „Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 50.1, S. 81–90.
- Czeratzki, W. (1957). „Untersuchungen über Krümelstabilität in einem Kalkversuch“. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde : zugl. Organ d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 78.2-3, S. 121–135.
- (1972). „Die Beeinflussung von Aggregatstabilität, Plastizität und Wasserbindung bei der Bodenstabilisierung durch mittlere und hohe Gaben von Kalkhydrat“. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 133.1-2, S. 45–53.
- DeLaune, R. D., C. N. Reddy und W. H. Patrick (1981). „Organic matter decomposition in soil as influenced by pH and redox conditions“. In: *Soil Biology and Biochemistry* 13.6, S. 533–534.
- Deltedesco, E., L.-M. Bauer, H. Unterfrauner, R. Peticzka, F. Zehetner und K. M. Keiblinger (2015). „Effekt von Kalkungsmaßnahmen auf die Strukturstabilisierung und Mikrobiologie von landwirtschaftlichen Böden“. In: *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft* 82, S. 19–26.

- Dent, B. B., S. L. Forbes und B. H. Stuart (2004). „Review of human decomposition processes in soil“. In: *Environmental Geology* 45.4, S. 576–585.
- Dörner, J., D. Dec, E. Feest, N. Vásquez und M. Díaz (2012). „Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage“. In: *Soil and Tillage Research* 125, S. 52–60.
- DVWK (1997). „Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden : Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten“. In: *DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft*. 2. Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. 235, 7 S.
- DWD Climate Data Center (CDC) (2016). *Langjährige Stationsmittelwerte für die Klimareferenzperiode 1981-2010, für aktuellen Standort und Bezugsstandort, Version V0.x*.
- Fiedler, H. J. (2001). *Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten*. Expert Verlag.
- Fiedler, S. und M. Graw (2003). „Decomposition of buried corpses, with special reference to the formation of adipocere“. In: *Naturwissenschaften* 90.7, S. 291–300.
- Fiedler, S., M. J. Vepraskas und J. L. Richardson (2007). „Soil redox potential: importance, field measurements, and observations“. In: *Advances in Agronomy* 94, S. 1–54.
- Fish, A. N. und A. J. Koppi (1994). „The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space“. In: *Geoderma* 63.3-4, S. 255–264.
- Flühler, H. (1972). „Sauerstofftransport im Boden“. Diss. ETH Zürich.
- Fründ, H.-C. und D. Schoenen (2009). „Quantification of adipocere degradation with and without access to oxygen and to the living soil“. In: *Forensic science international* 188.1, S. 18–22.
- Ghezzehei, Teamrat A und Dani Or (2000). „Dynamics of soil aggregate coalescence governed by capillary and rheological processes“. In: *Water Resources Research* 36.2, S. 367–379.
- Greenwood, D. J. und D. Goodman (1967). „Direct measurements of the distribution of oxygen in soil aggregates and in columns of fine soil crumbs“. In: *Journal of Soil Science* 18.1, S. 182–196.
- Groenevelt, P. H., B. D. Kay und C. D. Grant (1984). „Physical assessment of a soil with respect to rooting potential“. In: *Geoderma* 34.2, S. 101–114.
- Harrach, T., G. Werner und A. Wourtsakis (1972). „Wirkung des Kalkes auf Gefügeeigenschaften einer Parabraunerde in einem polyfaktoriellen Tiefenbearbeitungs- und Kalkungsversuch“. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 15, S. 107–110.
- Hartge, K. H. (1966). „Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben“. In: *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 7, S. 155–163.

- (1969). „Die Sackungsneigung als Aspekt der Strukturstabilität“. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 122.3, S. 250–259.
- (1972). „Ziel und Grenzen der Anwendung von natürlichen und synthetischen Bodenverbesserungsmitteln“. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 15, S. 111–116.
- Hartge, K. H. und A. Ellies (1976). „Über die Wirkung von Branntkalk als Stabilisator von Verfüllungsmaterial in Dränggraben“. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*.
- (1977). „Mechanismen der Aggregatstabilisierung in einem Tonboden mittels Branntkalk“. In: *Geoderma* 17.1, S. 47–55.
- Hartge, K. H. und R. Horn (2014). *Einführung in die Bodenphysik*. Hrsg. von Jörg Bachmann; Rainer Horn; Stephan Peth. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers.
- Haynes, R. J. und R. Naidu (1998). „Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review“. In: *Nutrient cycling in agroecosystems* 51.2, S. 123–137.
- Hillel, D. (2003). *Introduction to environmental soil physics*. Academic press.
- Horn, R. und A. Smucker (2005). „Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils“. In: *Soil and Tillage Research* 82.1, S. 5–14.
- Horn, R. und W. Stępniewski (2004). „Modification of mineral liner to improve its long-term stability“. In: *International agrophysics* 18.4, S. 317–324.
- Horn, R., H. Taubner, M. Wuttke und Th. Baumgartl (1994). „Soil physical properties related to soil structure“. In: *Soil and Tillage Research* 30.2, S. 187–216.
- Keiblinger, K. M., L. M. Bauer, E. Deltedesco, F. Holawe, H. Unterfrauner, F. Zehetner und R. Peticzka (2016). „Quicklime application instantly increases soil aggregate stability“. In: *International Agrophysics* 30.1, S. 123–128.
- Kümmerle, E., G. Seidenschwann und R. Blum (1993). *Geologische Karte von Hessen 1: 25000; Geologische Karte von Hessen. 5818: Erläuterungen*. Frankfurt a. M. Ost: mit 31 Abbildungen, 36 Tabellen und 3 Beiblättern. Hessisches Landesamt für Bodenforschung.
- Kutílek, M. und D. R. Nielsen (1994). *Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines*. Catena Verlag.
- Kwaad, F. J. P. M. und H. J. Mu (1994). „Degradation of soil structure by welding a micromorphological study“. In: *Catena* 23.3, S. 253–268.
- Li, P., S. Vanapalli und T. Li (2016). „Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting“. In: *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8.2, S. 256–274.
- Loughnan, F. C. (1969). *Chemical weathering of the silicate minerals*. Elsevier, New York.

- Mahanta, K. K., G. C. Mishra und M. L. Kansal (2014). „Estimation of the electric double layer thickness in the presence of two types of ions in soil water“. In: *Applied Clay Science* 87, S. 212–218.
- Mengede, R. und W. Burghardt (2003). „Zur Störung der Gasdiffusion in Friedhofsböden“. In: *Berichte der DBG* 102, S. 529–530.
- Metelková, Z., J. Boháč, R. Přikryl und I. Sedlářová (2012). „Maturation of loess treated with variable lime admixture: Pore space textural evolution and related phase changes“. In: *Applied clay science* 61, S. 37–43.
- Moldrup, P., T. Olesen, T. Komatsu, P. Schjønning und D. E. Rolston (2001). „Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases“. In: *Soil Science Society of America Journal* 65.3, S. 613–623.
- Pell, M., J. Stenström und U. Granhall (2005). „Soil respiration“. In: *Microbiological methods for assessing soil quality*. Hrsg. von J. Bloem, D. W. Hopkins und A. Benedetti. Wageningen: CABI, S. 117–127.
- Peth, S. (2004). „Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subartisch-alpinen Tundrenstandorten“. Diss. Universität Kiel.
- R Core Team (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Ramsay, W. J. H. (1986). „Bulk soil handling for quarry restoration“. In: *Soil use and management* 2.1, S. 30–39.
- Rolston, D. E. und P. Moldrup (2002). „Gas Diffusivity“. In: *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, S. 1113–1139.
- Schaarschmidt, F. und L. Vaas (2009). „Analysis of trials with complex treatment structure using multiple contrast tests“. In: *HortScience* 44.1, S. 188–195.
- Scheffer, K. (1972). „Parameter und Jahresgang der Strukturwirkung meliorativer Kalkung von Löß-Parabraunerde-Ap-Horizonten“. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 15, S. 85–93.
- Schmidt, M. (2009). „Die Leichenlipidbildung auf Friedhöfen-Maßnahmen zur Prophylaxe und Sanierung“. Diss. Universität Tübingen.
- Schoenen, D. und H. Schoenen (2013). „Adipocere formation—The result of insufficient microbial degradation“. In: *Forensic science international* 226.1, S. 301–306.
- Schotsmans, E. M. J., J. Denton, J. N. Fletcher, R. C. Janaway und A. S. Wilson (2014). „Short-term effects of hydrated lime and quicklime on the decay of human remains using pig cadavers as human body analogues: Laboratory experiments“. In: *Forensic science international* 238, 142–e1.
- Schwarzer, K. und K. Duphorn (2011). *Die deutsche Ostseeküste*. Hrsg. von R.-O. Niedermeyer, R. Lampe, W. Janke, K. Schwarzer, K. Duphorn, H. Kliewe und F. Werner. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. Kap. Exkursion 6, Wagrien und Fehmarn.

- Seki, K. (2007). „SWRC fit; a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure“. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4, S. 407–437.
- Sommer, C. (1972). „Modellversuche über den Einfluß hoher Kalkgaben auf die Verdichtbarkeit eines Bodens“. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 15, S. 65–72.
- Stepniewski, W. und J. Glinski (1985). *Soil aeration and its role for plants*. CRC Press, Inc.
- Stepniewski, W. und Z. Stepniewska (2009). „Selected oxygen-dependent process-Response to soil management and tillage“. In: *Soil and Tillage Research* 102.2, S. 193–200.
- Stepniewski, W., B. C. Ball, B. D. Soane und C. van Ouwerkerk (1994). „Effects of compaction on soil aeration properties.“ In: *Soil compaction in crop production*. S. 167–189.
- Stoltz, G., O. Cuisinier und F. Masrouri (2012). „Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil“. In: *Applied clay science* 61, S. 44–51.
- SVLFG (2010). *Sicher arbeiten auf Friedhöfen*. Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau.
- Sweeney, D. A., D. K. H. Wong und D. G. Fredlund (1988). *Effect of lime on a highly plastic clay with special emphasis on aging*. 1190.
- Uldin, T. und E. Aeschlimann (2011). „Zweite Verwesungsstudie durchgeführt“. In: *Friedhofskultur* 101, S. 19.
- Uteau, D., S. K. Pagenkemper, S. Peth und R. Horn (2013). „Root and time dependent soil structure formation and its influence on gas transport in the subsoil“. In: *Soil and Tillage Research* 132, S. 69–76.
- Vetter, H. und A. Klasink (1977). *Kalkwirkung auf Marschböden*. Frankfurt am Main: DLG-Verlag.
- Wichtmann, H. (1972). „Der Einfluß des Kalks auf die Infiltrationskapazität eines Schlufflehm Bodens“. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 15, S. 117–126.
- Willatt, S. T. (1987). „Influence of aggregate size and water content on compactability of soil using short-time static loads“. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* 37.3-4, S. 107–115.
- Witt, K. J. (2002). „Zement–Kalk–Stabilisierung von Böden“. In: *Geotechnik Seminar Weimar 2002*.
- Zehe, E. und H. Flühler (2001). „Preferential transport of isoproturon at a plot scale and a field scale tile-drained site“. In: *Journal of Hydrology* 247.1, S. 100–115.
- Zimmermann, I. (2012). „Entwicklung einer umweltgerechten Erdbestattungspraxis im Hinblick auf die Folgewirkungen auf Böden, Grundwasser und Atmosphäre“. Diss. Universität Kiel.

# A Anhang

## A.1 Profildbilder

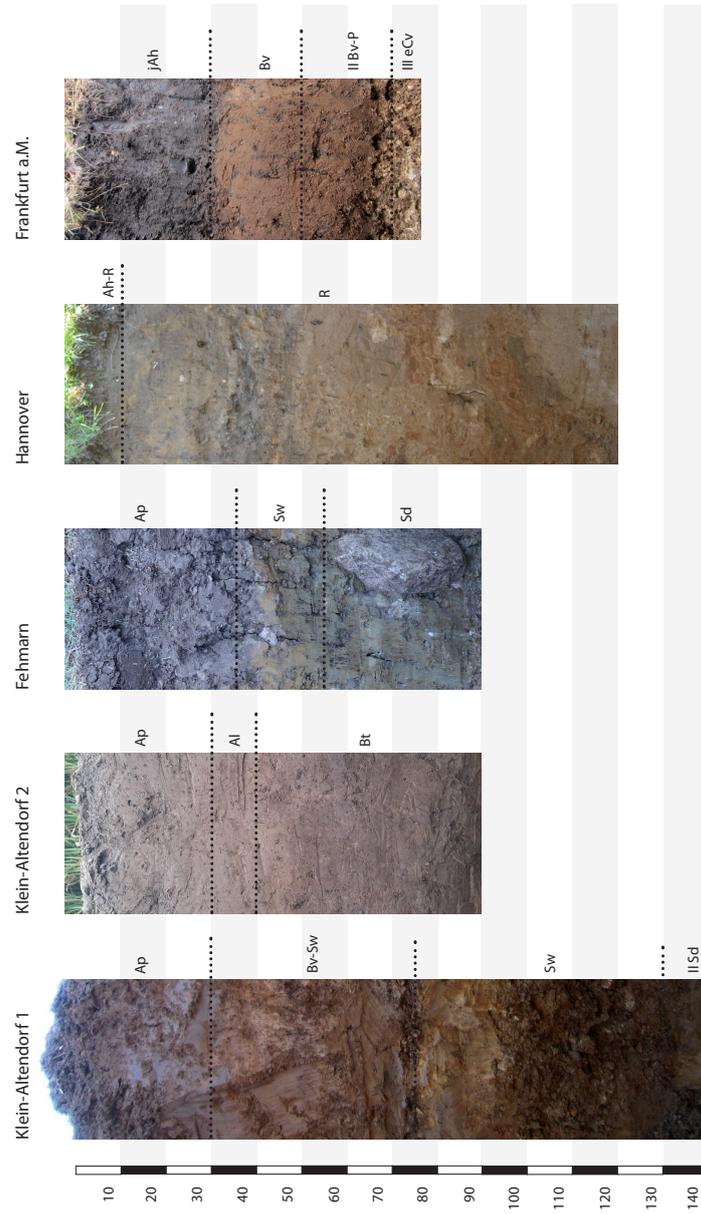


Abbildung 30: Bodenprofile der Versuchsstandorte

## A.2 Trockenrohddichte und Luftkapazität

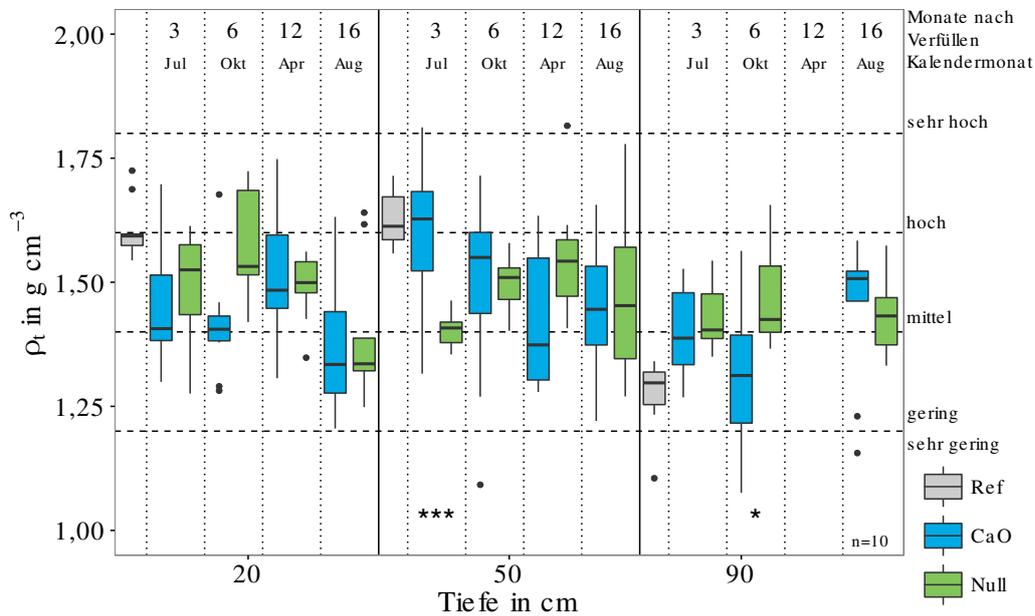


Abbildung 31: Trockenrohddichte  $\rho_t$  am Standort Fehmarn, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

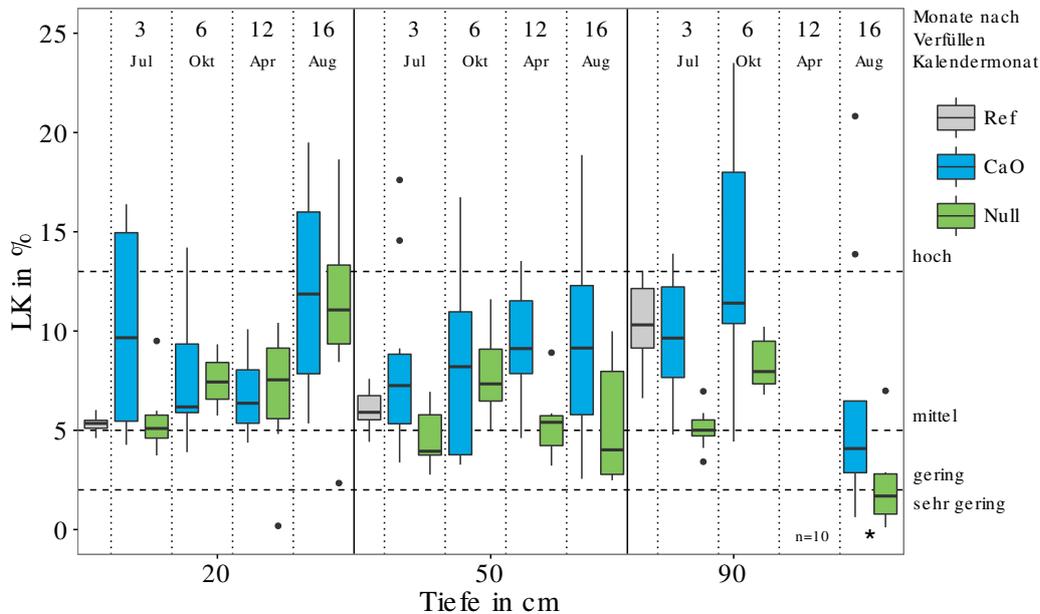


Abbildung 32: Luftkapazität LK am Standort Fehmarn, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

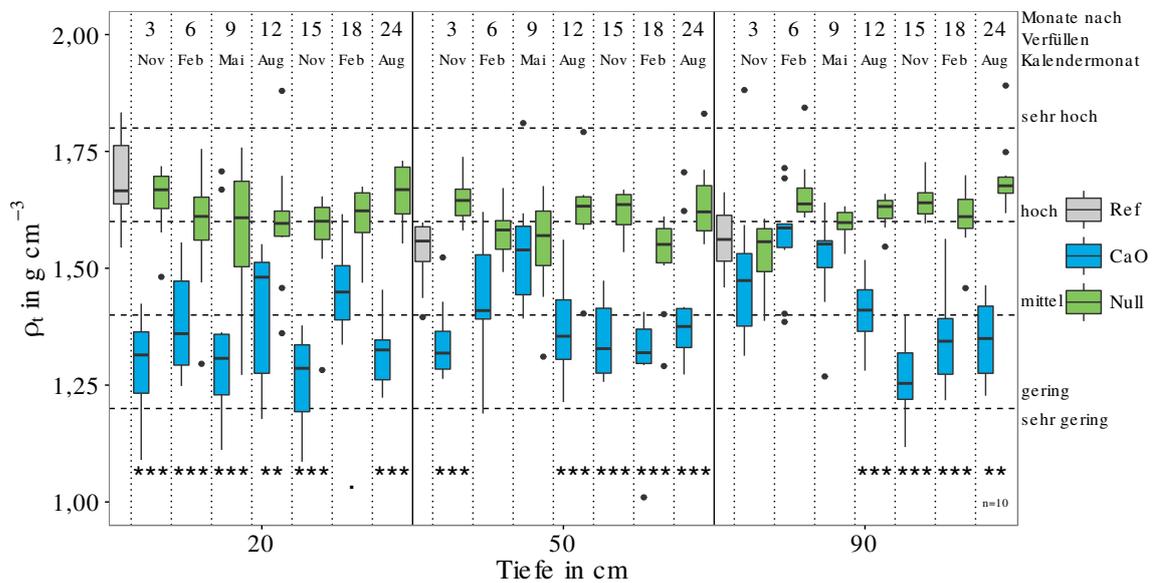


Abbildung 33: Trockenrohddichte  $\rho_t$  am Standort Hannover, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

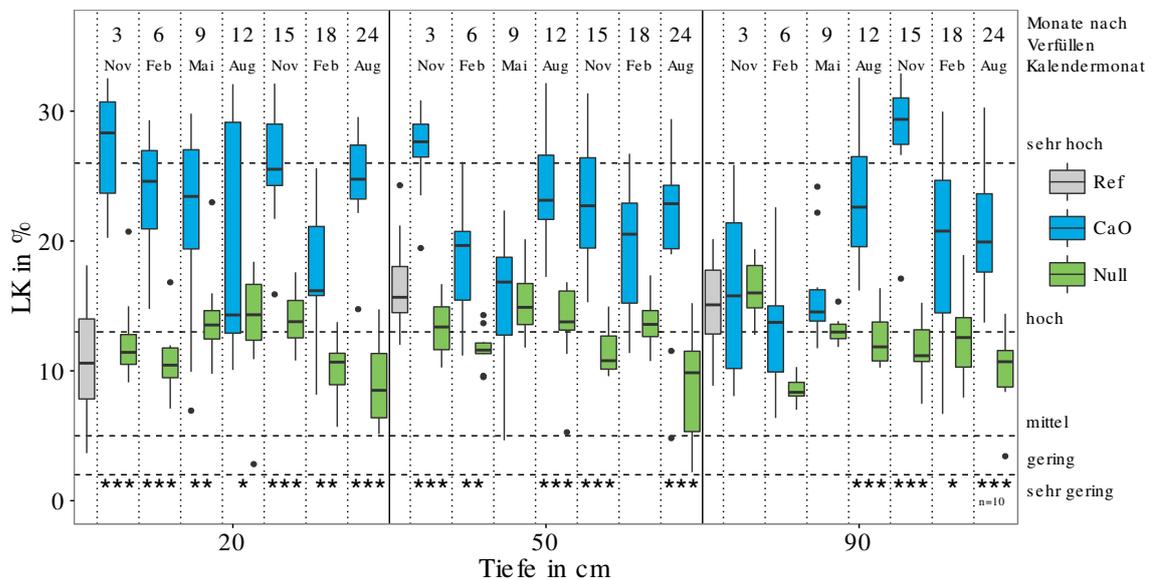


Abbildung 34: Luftkapazität LK am Standort Hannover, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

## A.2 Trockenrohddichte und Luftkapazität

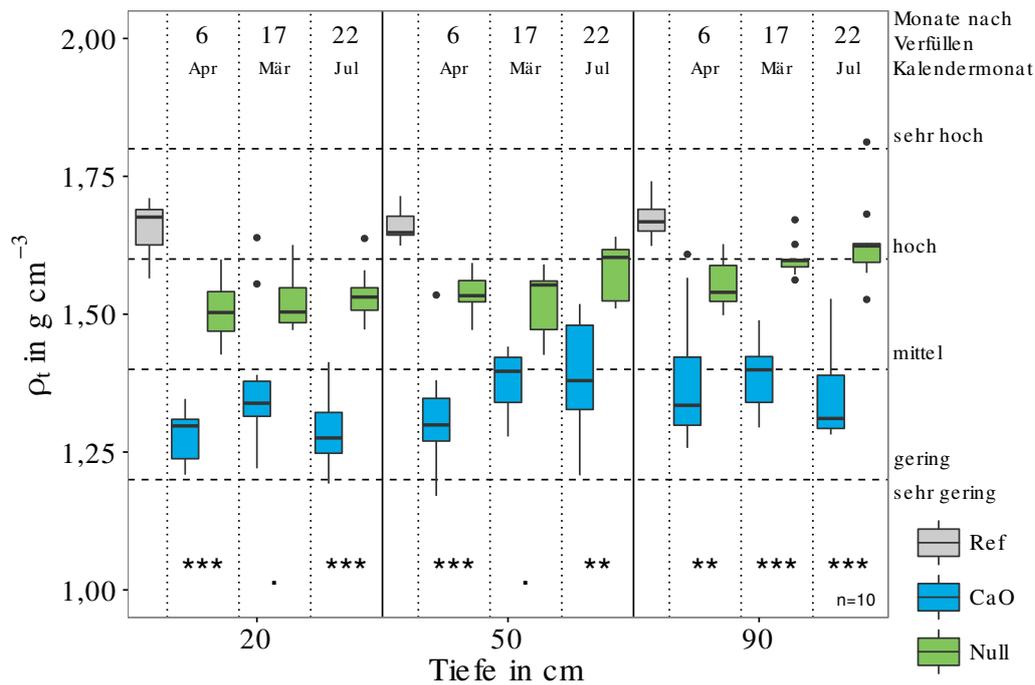


Abbildung 35: Trockenrohddichte  $\rho_t$  am Standort Klein-Altendorf 1, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungszeitpunkt sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

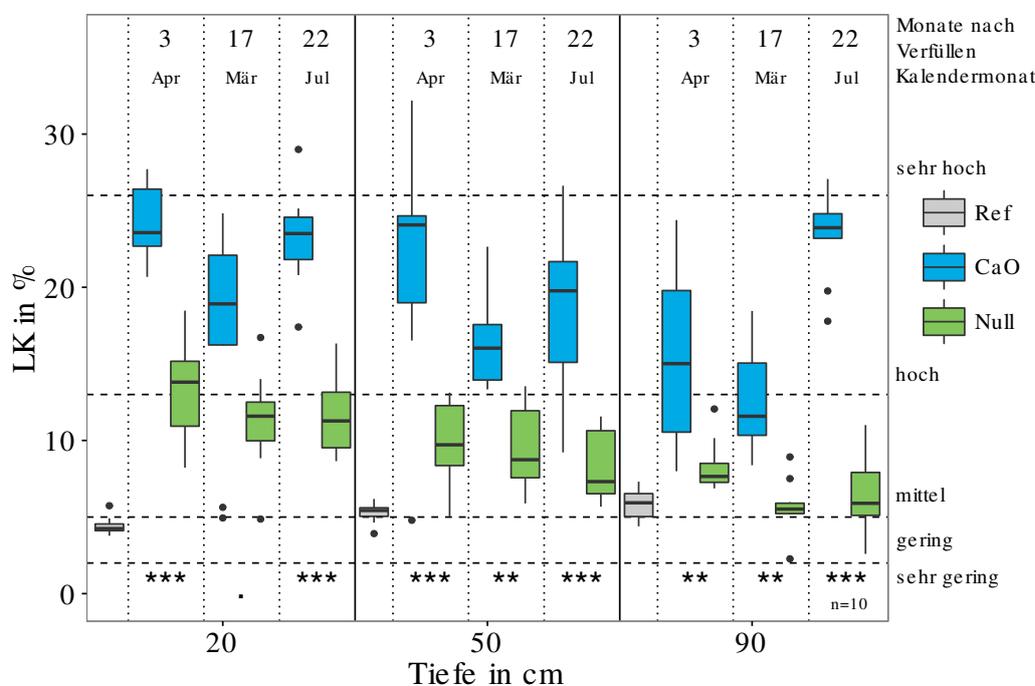


Abbildung 36: Luftkapazität LK am Standort Klein-Altendorf 1, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungszeitpunkt sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und  $\cdot$  ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

## A.2 Trockenrohddichte und Luftkapazität

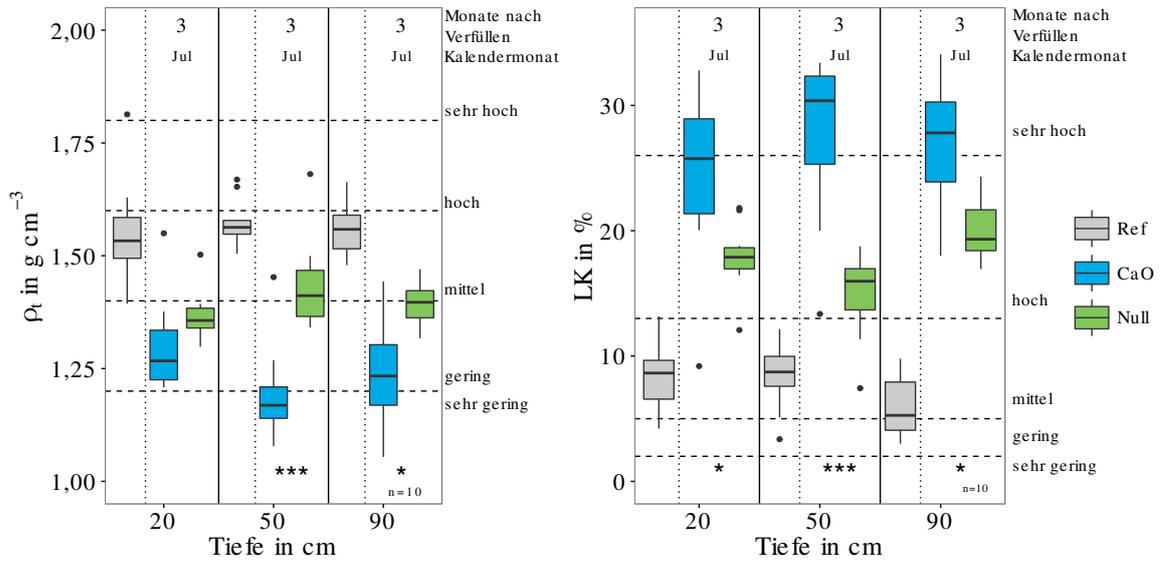


Abbildung 37: Trockenrohddichte  $\rho_t$  und Luftkapazität LK am Standort Klein-Altendorf 2, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

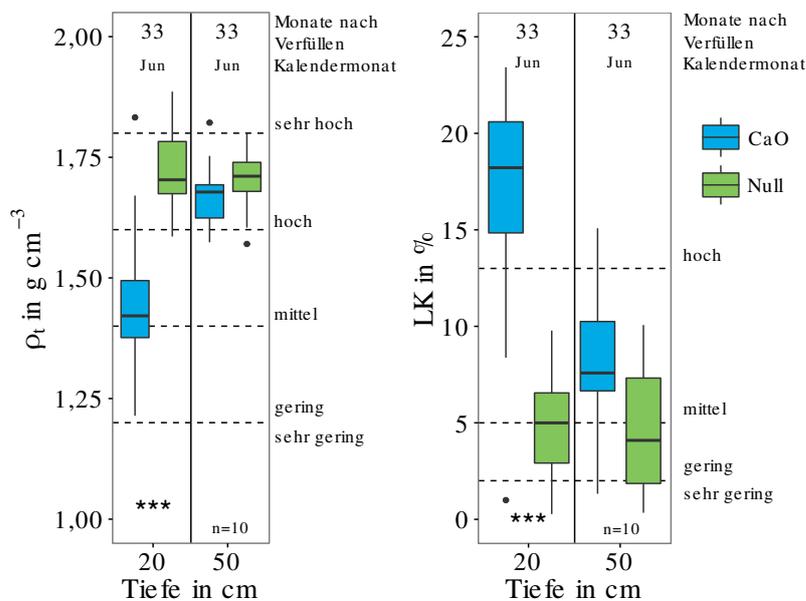


Abbildung 38: Trockenrohddichte  $\rho_t$  und Luftkapazität LK am Standort Hohenschulen, Klassengrenzen nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

### A.3 C<sub>2</sub>- und C<sub>3</sub>-Indizes

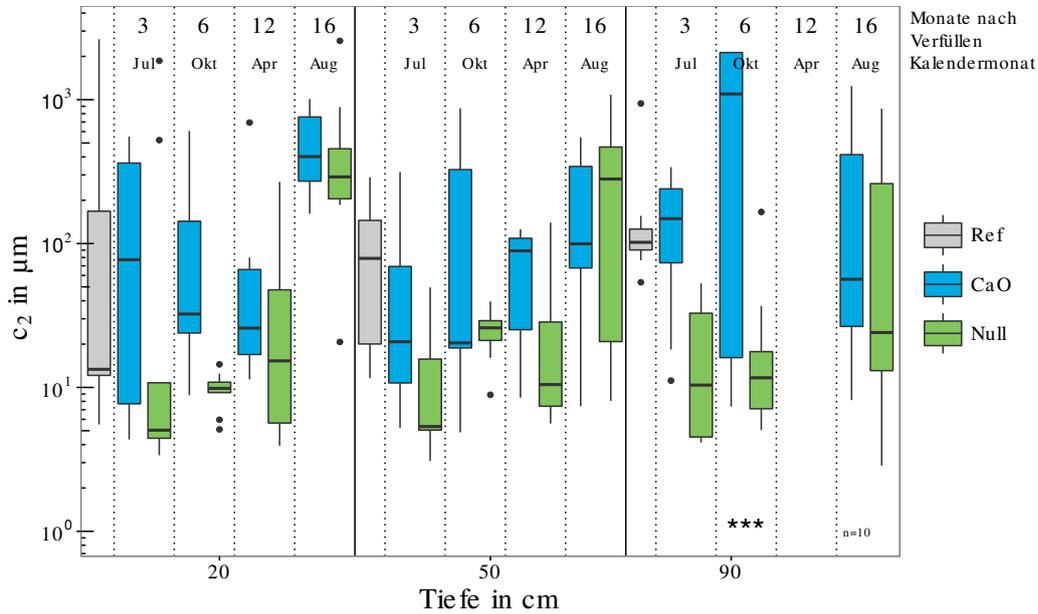


Abbildung 39: C<sub>2</sub>-Index am Standort Fehmar. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* (0,01 < p ≤ 0,05), \*\* (0,001 < p ≤ 0,01), \*\*\* (p ≤ 0,001) und · (0,05 < p ≤ 0,1, für Trends) angegeben.

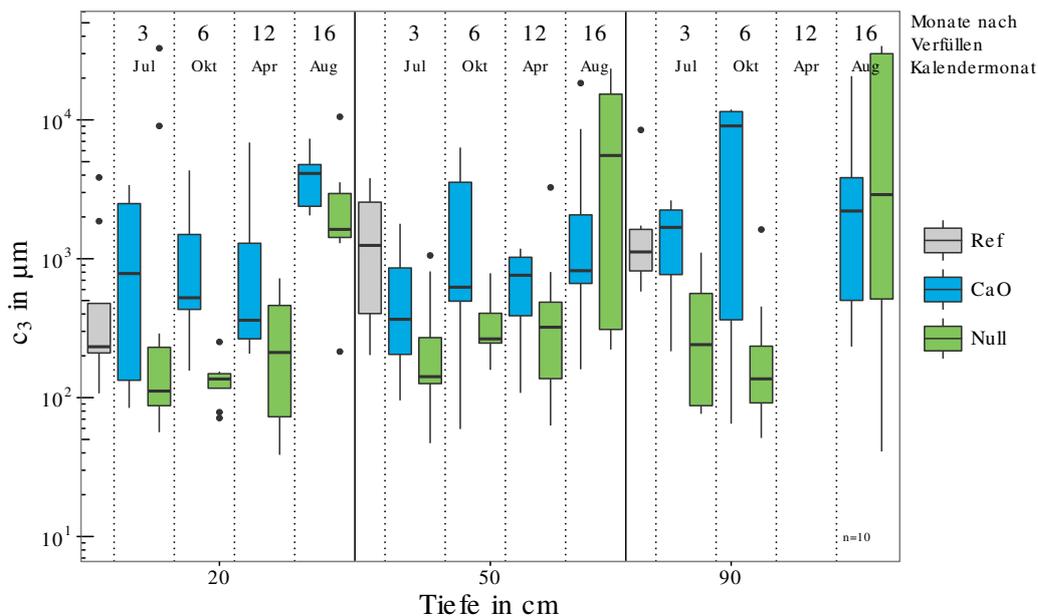


Abbildung 40: C<sub>3</sub>-Index am Standort Fehmar. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* (0,01 < p ≤ 0,05), \*\* (0,001 < p ≤ 0,01), \*\*\* (p ≤ 0,001) und · (0,05 < p ≤ 0,1, für Trends) angegeben.

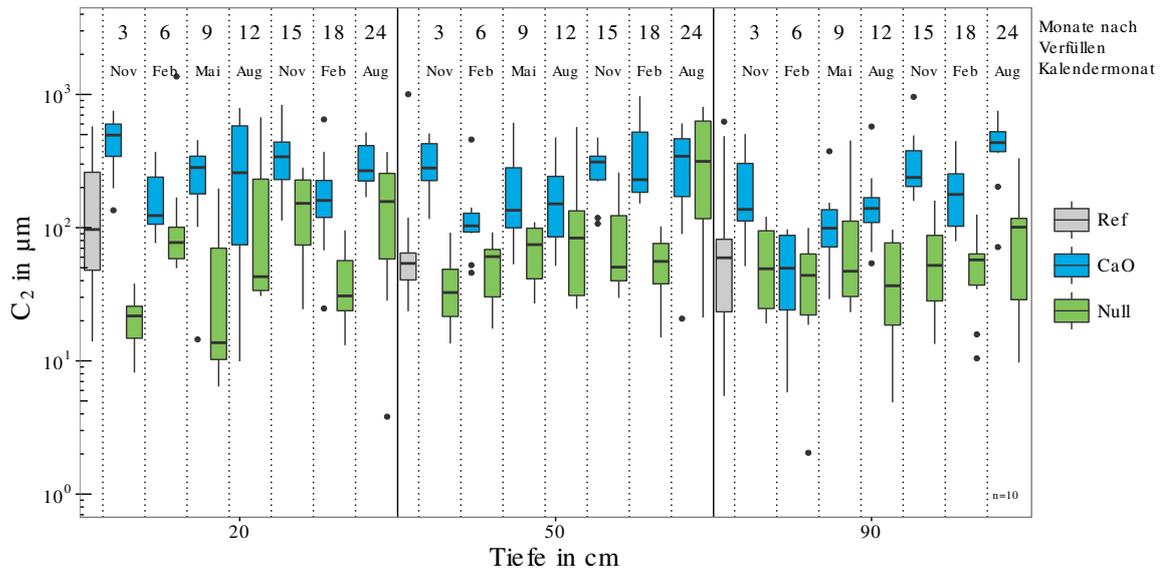


Abbildung 41: C<sub>2</sub>-Index am Standort Hannover. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

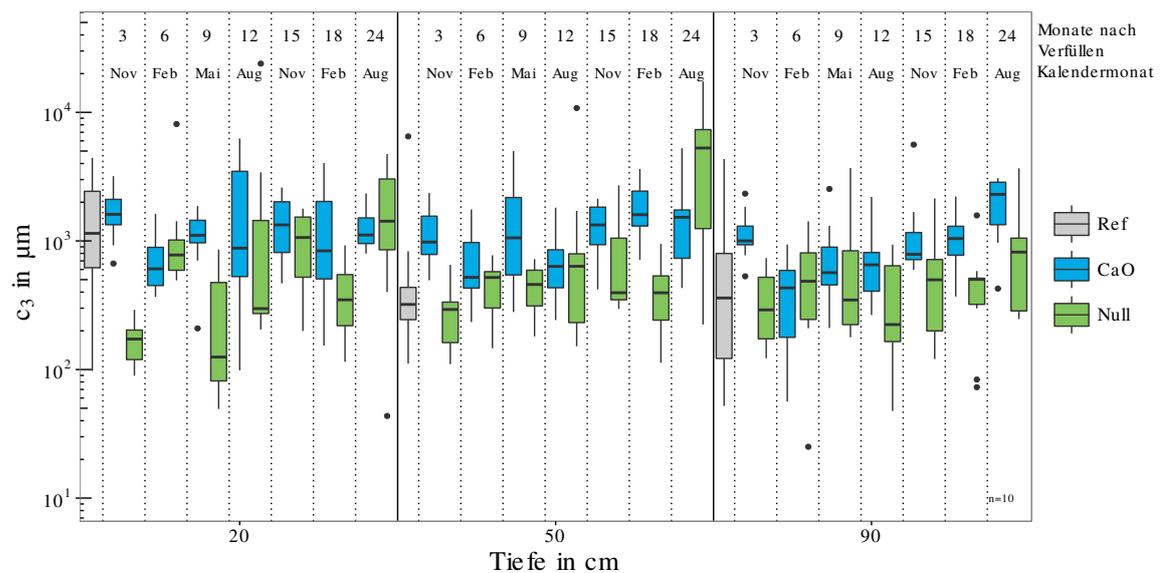


Abbildung 42: C<sub>3</sub>-Index am Standort Hannover. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

### A.3 C<sub>2</sub>- und C<sub>3</sub>-Indizes

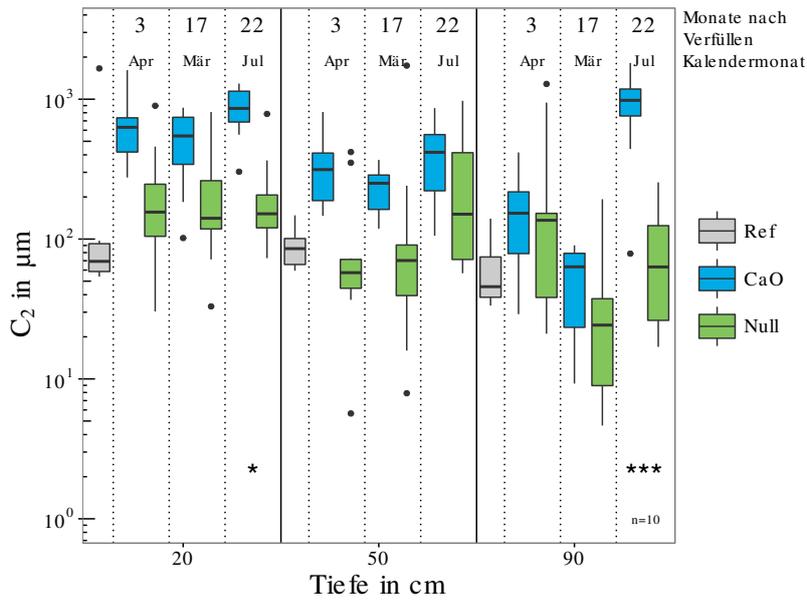


Abbildung 43: C<sub>2</sub>-Index am Standort Klein-Altendorf 1. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

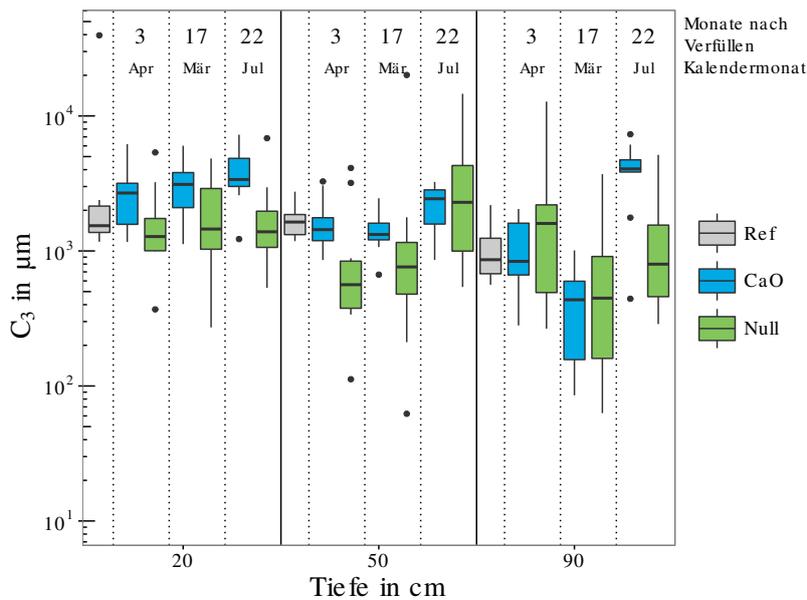


Abbildung 44: C<sub>3</sub>-Index am Standort Klein-Altendorf 1. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

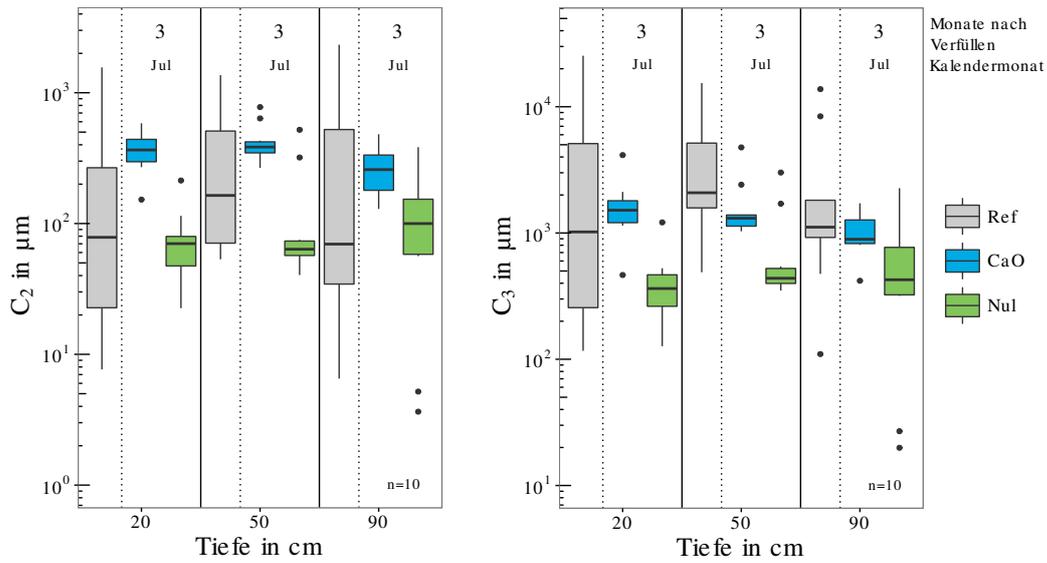


Abbildung 45: C<sub>2</sub>- und C<sub>3</sub>-Index am Standort Klein-Altendorf 2. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

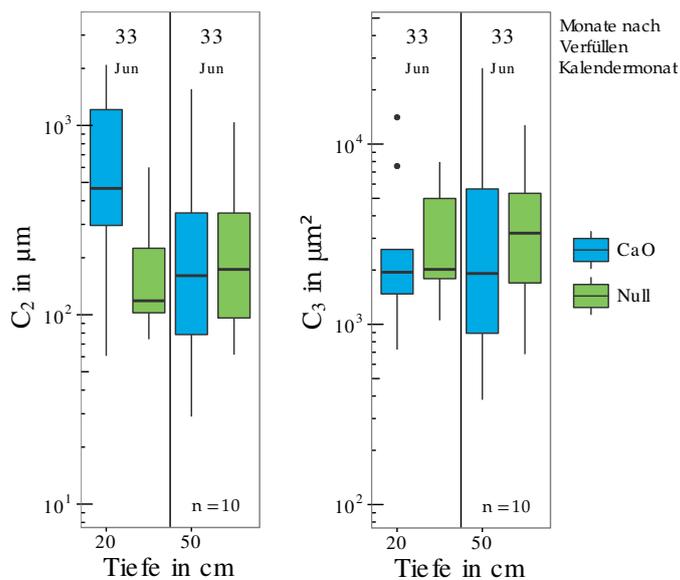


Abbildung 46: C<sub>2</sub>- und C<sub>3</sub>-Index am Standort Hohenschulen. Signifikante Unterschiede zwischen „CaO“ und „Null“ zum jeweiligen Beprobungstermin sind mit \* ( $0,01 < p \leq 0,05$ ), \*\* ( $0,001 < p \leq 0,01$ ), \*\*\* ( $p \leq 0,001$ ) und · ( $0,05 < p \leq 0,1$ , für Trends) angegeben.

## A.4 Diffusivität

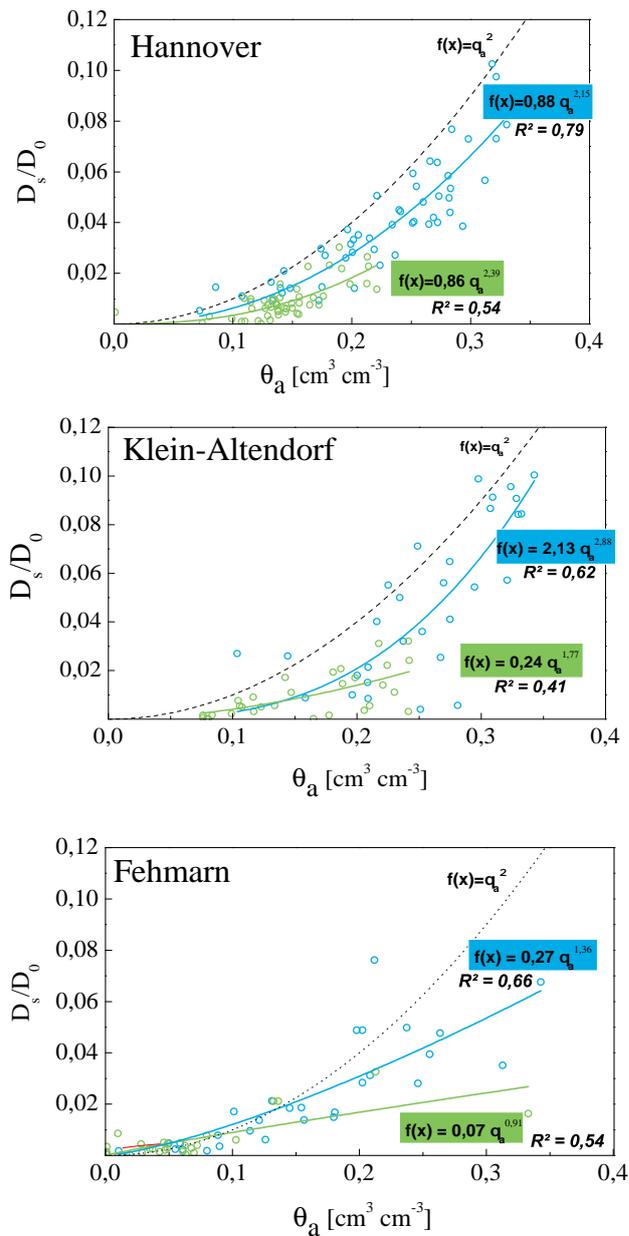


Abbildung 47: Standortspezifischer Zusammenhang zwischen luftgefülltem Porenvolumen ( $\Theta_a$ ) und Diffusivität ( $D_s/D_0$ ) der beprobten Tiefen 50 und 90 cm mit („CaO“) und ohne Zugabe von CaO („Null“) bei  $\psi_m = -60$  hPa