

Steigerung der Wassernutzungseffizienz in der Pflanzenproduktion durch optimierte Kalkung – Entwicklung eines Anwendungsmodells für die landwirt. Umsetzung

A. Hanssen; R. Horn



Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF-Nr. 18484 N Steigerung der Wassernutzungseffizienz in der Pflanzenproduktion durch optimierte Kalkung - Entwicklung eines Anwendungsmodells für die landwirtschaftliche Umsetzung

Forschungsvereinigung:

Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.
Annastr. 67-71
50968 Köln



Forschungseinrichtung 1:

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde,
Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Hermann-Rodewald-Str. 2
24118 Kiel



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichungen und Vervielfältigungen
- auch auszugsweise - nur mit Genehmigung der
Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr.18484 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Thema.....	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungseinrichtung(en)	1
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	15
Einleitung	16
Material und Methoden.....	22
Lage und Geologie der Standorte:	22
Methoden:.....	27
Ergebnisse	34
pH-Werte, Kohlenstoff und Kationenaustauschkapazitäten:.....	34
Porengrößenverteilung	38
Porengrößenverteilung am Standort Barlt:	38
Porengrößenverteilung am Standort Struckum:	41
Porengrößenverteilung am Standort Cunnersdorf:	42
Wasserleitfähigkeit.....	43
Gesättigte Wasserleitfähigkeit am Standort Barlt:.....	43
Gesättigte Wasserleitfähigkeit am Standort Struckum:	45
Gesättigte Wasserleitfähigkeit am Standort Cunnersdorf:.....	47
Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u)	49
Diffusion und Porenindizes:	52
Diffusion und Porenindizes am Standort Barlt:	52
Diffusion und Porenindizes am Standort Struckum:.....	55
Diffusion und Porenindizes am Standort Cunnersdorf:	58
Oberflächeneigenschaften	59
Sorptivität	60
Kontaktwinkelmessungen.....	62
Respirationsversuche	68
Diskussion der Ergebnisse	69
Porengrößenverteilung	69

Wasserleitfähigkeiten.....	71
Gasaustausch/Diffusion	73
Oberflächeneigenschaften	74
Respirationsversuche	76
Empfehlungen	77
Zusammenfassung und Fazit	78
Literaturverzeichnis	81
A Anhang:	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Rahmenschema für Ackerland zur Einstufung der Kalkversorgung des Bodens nach pH-Klassen ((VDLUFA, 2000).....	19
Abbildung 2 Kalkdüngungsbedarf von Ackerböden: ph- CaCl_2 -Werte und jeweils zugehörige Kalkmengen in dt Cao/ha zur Erreichung und Erhaltung des optimalen pH-Bereiches (verändert nach (VDLUFA, 2000)).....	20
Abbildung 3 Profilbild von der Kleimarsch am Standort Barlt	23
Abbildung 4 Profilbild von der Kleimarsch am Standort Struckum	24
Abbildung 5 Profilbild des Parabraunerde-Pseudogley am Standort Cunnersdorf	26
Abbildung 6 pH-Werte (in CaCl_2) für den Standort Barlt, für 4 verschiedene Zeitpunkte (vor Versuchsanlage, 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung); die goldenen Boxplots stellen den Zeitpunkt vor Ausbringen des Kalkes dar. Die drei dunkler werdenden Boxplots pro Variante stellen die drei Probenahmen dar. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4	34
Abbildung 7 pH Werte (in CaCl_2) für den Standort Struckum, für 4 verschiedene Zeitpunkte (vor Versuchsanlage, 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung); die goldenen Boxplots stellen den Zeitpunkt vor Ausbringen des Kalkes dar. Die drei dunkler werdenden Boxplots pro Variante stellen die drei Probenahmen dar. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort n = 4	35
Abbildung 8 pH-Werte (in CaCl_2) für den Standort Cunnersdorf, für 2 verschiedene Zeitpunkte (April 2016 linker Teil der Boxplot-Paare, August 2016 rechter Teil der Boxplot-Paare). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk. n = 4.....	36
Abbildung 9 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Barlt in 10 cm Tiefe. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort n = 12.....	39
Abbildung 10 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Barlt in 30 cm Tiefe. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge	

nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 12 40

Abbildung 11 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Struckum in 10 cm Tiefe. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 12 41

Abbildung 12 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Struckum in 30 cm Tiefe. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 12 42

Abbildung 13 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Cunnersdorf für beide Probenahmen und beide Tiefen. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk. n = 12 43

Abbildung 14 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten am Standort Barlt in den Tiefen 10 und 30 cm und für drei verschiedene Probenahmeterminen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung), repräsentiert durch die dunkler werdenden Boxplots einer Farbe/Variante. Die roten Linien entsprechen den Grenzwerten der Einstufung nach KA5 (von unten aufsteigend: 1, 10, 40, 100, 300 cm/d). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 8 44

Abbildung 15 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten am Standort Struckum in den Tiefen 10 und 30 cm und für drei verschiedene Probenahmeterminen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung), repräsentiert durch die dunkler werdenden Boxplots einer Farbe/Variante. Die roten Linien entsprechen den Grenzwerten der Einstufung nach KA5 (von unten aufsteigend: 1, 10, 40, 100, 300 cm/d). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 8 46

Abbildung 16 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten am Standort Cunnersdorf in den Tiefen 10 und 30 cm und für 2 verschiedene Probenahmeterminen 18 Monate (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung). Die roten Linien entsprechen den Grenzwerten der

Einstufung nach KA5 (von unten aufsteigend: 1, 10, 40, 100, 300 cm/d). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk. n = 8	48
Abbildung 17 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u in cm^2/d) für den Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4	49
Abbildung 18 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u in cm^2/d) für den Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 26 Monate nach Kalkung. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4	51
Abbildung 19 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u in cm^2/d) für den Standort Cunnersdorf in 30 cm Tiefe, 18 Monate nach letzter Kalkung. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk.....	51
Abbildung 20 Relativer Sauerstoffdiffusionskoeffizient (D_s/D_o [-]), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminale. Die horizontale schwarze Linie steht für einen Wert von 0,002 welcher aus pflanzenbaulicher Sicht ein kritisches Minimum darstellt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4.....	53
Abbildung 21 Tortuositätsindices (T [-]), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminale; Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n= 4.	54
Abbildung 22 C_1 Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminale; Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n= 4.	55

Abbildung 23 Relativer Sauerstoffdiffusionskoeffizient (D_s/D_o [-]), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminale. Die horizontale schwarze Linie steht für einen Wert von 0,002, welcher aus pflanzenbaulicher Sicht ein kritisches Minimum darstellt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4	56
Abbildung 24 Tortuositätsindices (T [-]), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminale; Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n= 4.	57
Abbildung 25 C_1 Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminale; Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n= 4.	58
Abbildung 26 Relativer Sauerstoffdiffusionskoeffizient (D_s/D_o [-]), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung. Die horizontale schwarze Linie steht für einen Wert von 0,002 welcher aus pflanzenbaulicher Sicht ein kritisches Minimum darstellt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk. n = 4.....	59
Abbildung 27 Repellency Indizes am Standort Barlt (RI, dimensionslos, gemessen bei $\Psi_m = -60$ hPa) für die Tiefen 10 und 30 cm. Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminale (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei einem Wert von 1,95 der nach einigen Literaturquellen als kritischer Grenzwert fungiert, oberhalb dessen Benetzungshemmung auftritt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 12	60
Abbildung 28 Repellency Indizes am Standort Struckum (RI, dimensionslos, gemessen bei $\Psi_m = -60$ hPa) für die Tiefen 10 und 30 cm. Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminale (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei einem Wert von 1,95 der nach einigen Literaturquellen als	

kritischer Grenzwert fungiert, oberhalb dessen Benetzungshemmung auftritt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 12

..... 61

Abbildung 29 Repellency Indizes am Standort Cunnersdorf (RI, dimensionslos, gemessen bei $\Psi_m = -60$ hPa) für die Tiefen 10 und 30 cm, 23 Monate nach letzter Kalkung. Die schwarze horizontale Linie verläuft bei einem Wert von 1,95 der nach einigen Literaturquellen als kritischer Grenzwert fungiert, oberhalb dessen Benetzungshemmung auftritt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk. n = 12..... 62

Abbildung 30 Optische Kontaktwinkel am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die drei Probenahmetermine 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, gemessen an 3 unterschiedlichen Entwässerungsstadien (-60 hPa in Rot, -300 hPa in Grün und lufttrocken in Blau).. Die schwarze horizontale Linie verläuft bei 90°, oberhalb dessen die Werte als benetzungshemmend gelten (Bachmann et al., 2013). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 16 63

Abbildung 31 Optische Kontaktwinkel am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die drei Probenahmetermine 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, gemessen an 3 unterschiedlichen Entwässerungsstadien (-60 hPa in Rot, -300 hPa in Grün und lufttrocken in Blau). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei 90°, oberhalb dessen die Werte als benetzungshemmend gelten (Bachmann et al., 2013). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 16 64

Abbildung 32 Optische Kontaktwinkel am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die drei Probenahmetermine 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, gemessen an 3 unterschiedlichen Entwässerungsstadien (-60 hPa in Rot, -300 hPa in Grün und lufttrocken in Blau). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei 90°, oberhalb dessen die Werte als benetzungshemmend gelten (Bachmann et al., 2013). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 16 65

Abbildung 33 Optische Kontaktwinkel am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die drei Probenahmetermine 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, gemessen an 3 unterschiedlichen Entwässerungsstadien (-60 hPa in Rot, -300 hPa in Grün und lufttrocken in Blau). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei 90°, oberhalb dessen die Werte als benetzungshemmend gelten

(Bachmann et al., 2013). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 16	66
Abbildung 34 Kontaktwinkel nach Wilhelmy-Platten-Methode für den Standort Cunnersdorf. Dargestellt sind die beiden Tiefen 10 und 30 cm, so wie die beiden Probenahmen dargestellt durch den linken Boxplot (18 Monate nach letzter Kalkung) und rechten Boxplot (23 Monate nach letzter Kalkung). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk. n = 8	67
Abbildung 35 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung, n = 4.....	90
Abbildung 36 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	90
Abbildung 37 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante OK (Nullkalk Referenz) für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	91
Abbildung 38 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante KK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	91
Abbildung 39 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante KK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	92
Abbildung 40 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante BK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	92
Abbildung 41 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante BK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	93
Abbildung 42 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung, n = 4.....	93
Abbildung 43 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung, n = 4.....	94
Abbildung 44 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe, 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	94
Abbildung 45 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante OK (Nullkalk Referenz) für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	95
Abbildung 46 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante KK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	95
Abbildung 47 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante KK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	96
Abbildung 48 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante BK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	96
Abbildung 49 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante BK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, n = 4.....	97
Abbildung 50 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung, n = 4.....	97

Abbildung 51 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung, n = 4.....	98
Abbildung 52 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante OK (Nullkalk Referenz) für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4.	98
Abbildung 53 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante KK-1, für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4.	99
Abbildung 54 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante KK-1,5; für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4.	99
Abbildung 55 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante BK-1, für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4.	100
Abbildung 56 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante BK-1,5; für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4. ...	100
Abbildung 57 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung, n = 4.....	101
Abbildung 58 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung, n = 4.	101
Abbildung 59 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe, 26 Monate nach Kalkung, n = 4.	102
Abbildung 60 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante OK (Nullkalk Referenz) für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4.	102
Abbildung 61 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante KK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4.	103
Abbildung 62 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante KK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4. ...	103
Abbildung 63 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante BK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4.	104
Abbildung 64 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante BK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, n = 4. ...	104
Abbildung 65 C ₂ Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; n= 4.	105
Abbildung 66 C ₃ Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; n= 4.	105
Abbildung 67 Luftpermeabilität (in μm^2), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; n= 4.	106
Abbildung 68 C ₂ Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; n= 4.	106
Abbildung 69 C ₃ Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; n= 4.	107

Abbildung 70 Luftpermeabilität (in μm^2), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; $n = 4$.	107
Abbildung 71 Tortuositätsindices $T [-]$, $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung, $n = 4$.	108
Abbildung 72 C_1 Indices $[-]$, $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung, $n = 4$.	108
Abbildung 73 C_2 Indices $[-]$, $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung, $n = 4$.	109
Abbildung 74 C_3 Indices $[-]$, $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung, $n = 4$.	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Eigenschaften der Kleimarsch am Standort Barlt	24
Tabelle 2 Eigenschaften der Kleimarsch am Standort Struckum	25
Tabelle 3 Übersicht über die Kalkvarianten, sowie über die ausgebrachten Kalkmengen an den beiden Standorten Barlt und Struckum. Die Farben entsprechen den verwendeten Farben der Boxplots in den Abbildungen. OK = Nullkalk, Referenz; KK-1 Kohlensaurer Kalk (CaCO_3) in der Menge nach LUFA Empfehlung; KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk (CaCO_3) in der anderthalbfachen Menge der LUFA Empfehlung; BK-1 = Branntkalk (CaO) in der Menge nach LUFA Empfehlung; BK-1,5 = Branntkalk (CaO) in der anderthalbfachen Menge der LUFA Empfehlung.	25
Tabelle 4 Eigenschaften des Parabraunerde-Pseudogleys am Standort Cunnersdorf.....	27
Tabelle 5 Übersicht über die entnommenen Stechzylinder für ungestörte Bodenproben.	28
Tabelle 6 Einstufung der gesättigten Wasserleitfähigkeit nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (Ad-hoc, 2005).	30
Tabelle 7 Potentielle Kationenaustauschkapazitäten (in $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$) der einzelnen Varianten am Standort Barlt, 12 Monate nach Kalkung (August 2017), sowie die Anteile der einzelnen Kationen. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort.	37
Tabelle 8 Potentielle Kationenaustauschkapazitäten (in $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$) der einzelnen Varianten am Standort Struckum, 12 Monate nach Kalkung (August 2017), sowie die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort.	37
Tabelle 9 Potentielle Kationenaustauschkapazitäten (in $\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$) der einzelnen Varianten am Standort Cunnersdorf, 23 Monate nach letzter Kalkung (August 2016), sowie die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk.....	38
Tabelle 10 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten (geometrischer Mittelwert in cm/d) für den Standort Barlt für die beiden Tiefen 10 und 30 cm und die 3 Probenahmeterminen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Unterschiedliche kleine Buchstaben bei den Messwerten stehen für signifikante Unterschiede mit einem $p < 0,05$ (die statistische Bewertung umfasst jeweils eine Tiefe und einen Probenahmetermin. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 8$	45
Tabelle 11 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten (geometrischer Mittelwert in cm/d) für den Standort Struckum für die beiden Tiefen 10 und 30 cm und die 3 Probenahmeterminen (7, 12 und 26	

Monate nach Kalkung). Unterschiedliche kleine Buchstaben bei den Messwerten stehen für signifikante Unterschiede mit einem $p < 0,05$ (die statistische Bewertung umfasst jeweils eine Tiefe und einen Probenahmetermin. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 8$	46
Tabelle 12 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten (geometrischer Mittelwert in cm/d) für den Standort Cunnersdorf für die beiden Tiefen 10 und 30 cm und die 2 Probenahmeterminen (18 und 23 Monate nach letzter Kalkung). Unterschiedliche kleine Buchstaben bei den Messwerten stehen für signifikante Unterschiede mit einem $p < 0,05$ (die statistische Bewertung umfasst jeweils eine Tiefe und einen Probenahmetermin. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Branntkalk. $n = 8$	48
Tabelle 13 Respirationsrate (in $\mu\text{g CO}_2$ pro g getrocknetem Boden pro Stunde) von unterschiedlich lang inkubierten Bodenproben (auf -60 hPa entwässert) aus 10 cm Tiefe am Standort Barlt, 7 Monate nach der Kalkung (April 2017). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 4$	68
Tabelle 14 Respirationsrate (in $\mu\text{g CO}_2$ pro g getrocknetem Boden pro Stunde) von unterschiedlich lang inkubierten Bodenproben (auf -60 hPa entwässert) aus 10 cm Tiefe am Standort Struckum, 7 Monate nach der Kalkung (April 2017). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 4$	68
Tabelle 15 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha =$ Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1 - 1/n$ definiert ist, $k_f =$ gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^*d) am Standort Barlt in 10 und 30 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung (April 2017), $n = 4$	110
Tabelle 16 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha =$ Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1 - 1/n$ definiert ist, $k_f =$ gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^*d) am Standort Barlt in 10 und 30 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung (August 2017), $n = 4$	110
Tabelle 17 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha =$ Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1 - 1/n$ definiert ist, $k_f =$ gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^*d) am Standort Barlt in 10 und 30 cm Tiefe, 24 Monate nach Kalkung (August 2018), $n = 4$	110
Tabelle 18 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha =$ Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1 - 1/n$ definiert ist, $k_f =$ gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^*d) am Standort Struckum in 10 und 30 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung (April 2017), $n = 4$	111

Tabelle 19 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha =$ Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1 -$ $1/n$ definiert ist, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^2d^{-1}) am Standort Struckum in 10 und 30 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung (August 2017), $n = 4$	111
Tabelle 20 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha =$ Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1 -$ $1/n$ definiert ist, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^2d^{-1}) am Standort Struckum in 10 und 30 cm Tiefe, 26 Monate nach Kalkung (Oktober 2017), $n = 4$	111
Tabelle 21 Respirationsraten (in CO_2 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}$ getrockneter Boden $\cdot \text{h}^{-1}$) für den Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung	112
Tabelle 22 Respirationsraten (in CO_2 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}$ getrockneter Boden $\cdot \text{h}^{-1}$) für den Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 24 Monate nach Kalkung	112
Tabelle 23 Respirationsraten (in CO_2 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}$ getrockneter Boden $\cdot \text{h}^{-1}$) für den Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung	112
Tabelle 24 Respirationsraten (in CO_2 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}$ getrockneter Boden $\cdot \text{h}^{-1}$) für den Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 26 Monate nach Kalkung	113

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

OK	Nullkalk Referenzvariante
BK-1	Branntkalk in der einfachen Menge der VDLUFA Empfehlung
BK-1,5	Branntkalk in der anderthalbfachen Menge der VDLUFA Empfehlung
$C_1[-]$	Porenanteilindex
$C_2[-]$	Kontinuitätsindex
$C_3[-]$	Kontinuitätsindex
$CaCl_2$	Calciumchlorid
$CaCO_3$	Calciumcarbonat
CAH	Calcium-Aluminat-Hydrat
CaO	Calciumoxid (Branntkalk)
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CSH	Calcium-Silikat-Hydrat
$D_0[-]$	Diffusionskoeffizienten in freier Luft
$D_s[-]$	Diffusionskoeffizient im Boden
$D_s/D_0[-]$	relativer Sauerstoffdiffusionskoeffizient
dt	Dezitonne
g	Erdbeschleunigung
GPV in Vol.-%	Gesamtporenvolumen
ha	Hektar
hPa	Hektopascal
kf	gesättigte Wasserleitfähigkeit
KK-1	Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung
KK-1,5	Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge der VDLUFA Empfehlung
km	Kilometer
ku	ungesättigte Wasserleitfähigkeit
LK in Vol.-%	Luftkapazität
nFK in Vol.-%	nutzbare Feldkapazität
O_2	Sauerstoff
RI	Repellency Index
TW in Vol.-%	Totwasser
η	dynamische Viskosität
ρ_l	Dichte von Luft
T [-]	Tortuositätsindex

Einleitung

Der übergeordnete Begriff der Bodenstruktur ist definiert nach (Dexter, 1988) als die räumliche Heterogenität der verschiedenen Komponenten und/oder Eigenschaften der Böden auf verschiedenen Skalen. Einige dieser Komponenten oder Eigenschaften sind Wurzelwachstum, Wasserverfügbarkeit, Gastransport, Aggregatstabilität, biologische Aktivität. Eine nachhaltig funktionsfähige Bodenstruktur gilt daher als eine der wesentlichen Faktoren für stabile Erträge. Arbeiten über die Bedeutung der Bodenstruktur sind in der Literatur weit verbreitet und gehen weit zurück, zum Teil bis an das Ende des 19. Jahrhunderts, u.a. (Wollny, 1898). Ein wichtiger Faktor bei Betrachtung von Bodenstruktur ist das Porensystem und deren Stabilität sowie die Zu- und Durchgängigkeit der Poren und deren Wandungen. Die Zwischenräume im Boden, zwischen mineralischer Festsubstanz und organischer Substanz sind als Poren definiert, welche mit Luft, Wasser, aber auch Pflanzenwurzeln und Bodentiere gefüllt sein können. Somit spielt nicht nur die Porengrößenverteilung (Kapazitätsgröße) eine Rolle, sondern auch die Konnektivität und Tortuosität (Intensitätsgröße) dieser Poren. Die Konnektivität bezieht sich auf den Grad der Verbundenheit der Poren, während die Tortuosität sich auf den Grad der Gewundenheit der Poren bezieht. Diese Intensitätsgrößen spielen eine große Rolle beim Verständnis über die Verfügbarkeit von Wasser, Luft/Gasen und Nährstoffen im System Boden.

In Deutschland werden aktuell etwa 60 ha Boden pro Tag zu Siedlungs- und Verkehrsfläche umgewandelt, weltweit betrachtet gehen Schätzungen von 10 Millionen ha Boden pro Jahr aus, welche verloren gehen. Neben Versiegelung durch Baumaßnahmen sind Prozesse wie Bodenerosion, Wüstenbildung als Teil der Bodendegradation zu nennen (Chemnitz & Weigelt, 2015). Diesen Entwicklungen geht die wachsende Weltbevölkerung parallel einher, was zu einem zunehmenden Konflikt bezüglich der Ernährungssicherung führen wird (BMEL, 2015). Es wird notwendig sein, mit der zur Verfügung stehenden Fläche möglichst nachhaltig so viel Lebensmittel zu produzieren wie nötig ist. Betrachtet man dazu noch ändernde klimatische Bedingungen wie beispielweise häufigere und intensivere Dürreperioden sowie häufigere Starkregenereignisse (IPCC, 2014), kommen einer funktionsfähigen Bodenstruktur immer größere Bedeutung zu. Böden müssen Wasser speichern können, wenn es wenig verfügbar ist, aber ebenfalls Wasser in einem Maße ableiten können, dass es bei großer

Verfügbarkeit nicht zu Wassererosion, Verschlammung oder Staunässe kommt. Landwirtschaftlich genutzte Böden stehen grundsätzlich nicht nur aufgrund des Klimawandels unter Druck, auch sorgen unter anderem die stets steigenden Maschinengewichte für immer größere Lasten die auf den Böden wirken. Dies kann dazu führen, dass verschiedene Strukturparameter wie die Wasserleitfähigkeit, die pflanzenverfügbare Wasserspeicherkapazität, Gasdiffusion, Luftleitfähigkeit über Jahrzehnte negative Trends aufweisen (Kuncoro, et al., 2014), (Keller, et al., 2019). Durch langjährige Bodenbearbeitung kann es zu Verdichtung und damit zu abnehmenden Porositäten und schwächeren Aggregationen kommen, was die Bodenstruktur langfristig schwächt (Bronick & Lal, 2005). Dies kann unter anderem zu einer verringerten Durchwurzelung führen, welche als essenziell gilt um in Zukunft stabile Erträge zu sichern (Szatanik-Kloc, et al., 2018). Von mehreren Autoren sind verteilt über große Teile der Welt stagnierende Erträge (bspw. bei Winterweizen) zu beobachten, was unter anderem am sich ändernden Klima, aber auch an angesprochenen Bodenparametern begründet werden kann (Bracho-Mujica, et al., 2019), (Kage & Rose, 2019), (Keller, et al., 2019).

Eine mangelnde Versorgung mit Kalk kann auf mehreren bodenkundlichen Ebenen negative Effekte hervorrufen. So ist die Verfügbarkeit von vielen Nährstoffen für die Pflanzen häufig bei geringem pH-Wert minimiert, ebenso die Aktivität der Mikroorganismen. Auf physikalischer Ebene spielt vor allem die Flockung und Aggregation der Tonpartikel eine Rolle. Tonminerale bestehen aus Schichtsilikaten, die aus Tetraedern mit einem Siliciumion als Zentralatom und/oder Oktaedern mit Aluminium oder Magnesium als Zentralatom. Durch isomorphen Ersatz werden die Zentralatome durch weniger positiv geladene Ionen ersetzt (bspw. Al^{3+} ersetzt Si^{4+}), was eine negative Ladung zur Folge hat (Hillel, 1998). Diese negativ geladenen Austauschplätze von Tonpartikeln sind häufig mit einwertigen Kationen wie Kalium oder Natrium belegt, wodurch die umgebene diffuse Doppelschicht relativ gesehen sehr groß ist und die Tonpartikel kompakt geschichtet vorliegen. Durch eine Kalkung sind vermehrt freie Ca^{2+} Ionen in der Bodenlösung vorhanden, welche die Austauschplätze von Tonpartikeln belegen können. Dadurch wird die diffuse Doppelschicht, welche die Tonpartikel umgibt, komprimiert und eine Flockung und anschließende Aggregation der Tonpartikel möglich (Mahanta, et al., 2014). Durch diese Prozesse wird das Porengefüge umgewandelt und

es entsteht ein sogenanntes Kartenhausgefüge mit erhöhter Inter- und Intraaggregatporosität (Beetham, et al., 2014). Dieses neue Gefüge kann erhöhte Gesamtporenvolumina aufweisen, zumindest aber eine Änderung in der Porengrößenverteilung in Hinblick auf mehr Mittel- und enge Grobporen (Metelková, et al., 2012). In diesen Poren kann wiederum mehr Wasser pflanzenverfügbar gespeichert werden, aber auch in Zeiten von Wasserüberschuss besser abgeleitet werden. Der Gasaustausch in dem durch die Kalkung verbesserten Bodengefüge ist erhöht, dadurch wird die Sauerstoffversorgung des Bodenkörpers verbessert und Mikroorganismen sowie Pflanzenwurzeln profitieren von den günstigeren Bedingungen. Aktuelle Studien aus der Literatur befassen sich in den letzten Jahren wieder vermehrt mit der bodenphysikalischen Wirkung einer Kalkung und Auswirkungen auf Makroporosität (Hellner, et al., 2018), Aggregatstabilität (Bennett, et al., 2014) und allgemeinen physikalischen Prozessen (Holland, et al., 2018). Die Poren, die für die Eigenschaften von Bodengefügen hauptsächlich verantwortlich sind, sind die Sekundärporen, welche hauptsächlich durch Schrumpf-, Scherrissen und biologische Aktivität entstehen (Hartge & Horn, 2014). Hierbei zählt nicht nur der reine Anteil an den Poren, sondern für die diversen Transportprozesse vor allem auch die Kontinuität und Tortuosität dieser Poren. Gleichmäßige Porenleitungen spielen vor allem beim Abführen und nachführen von Bodenwasser eine entscheidende Rolle. Diese Poren werden durch reguläre Bodenbearbeitung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in ihrer Funktion gestört, die verbleibende Funktionalität hängt dann von der Aggregatstabilität ab. Die Aggregatstabilität kann durch eine ausreichende Kalkversorgung verbessert werden, vor allem beim Einsatz von Branntkalk (CaO) gibt es einige Ergebnisse aus der Literatur, die eine positive Wirkung auf die Aggregatstabilität nachweisen (Czeratzki, 1957) (Sommer, 1972) (Czeratzki, 1972) (Keiblinger, et al., 2016). Beim Einsatz von Branntkalk tritt als erster Schritt eine Sofortreaktion auf, dabei reagiert das Bodenwasser mit dem CaO und anschließend tritt weiterer Wasserverlust durch Wärmeentwicklung auf (Horn & Stępniewski, 2004). Durch diese Sofortreaktionen finden erste Strukturprozesse statt, die Wasserspannungen erhöhen sich (negativere Matrixpotenziale) und dadurch auch die Aggregatstabilität. Es können sehr hohe pH-Werte im Bereich von 12 erreicht werden, dadurch wird die Löslichkeit von Aluminaten und Silikaten erhöht, welche sich dann zu Calcium-Silikat-Hydrate (CSH) bzw. Calcium-Aluminat-Hydrate (CAH) verbinden können

(Bérubé, et al., 1990). Diese haben eine gelartige Konsistenz und können die angesprochenen, neu geschaffenen Porensysteme verkleben und dadurch stabilisieren, dies wird als puzzolanische Reaktion bezeichnet (Witt, 2002).

Kalkmengenempfehlungen:

Die Kalkmengenempfehlungen werden in Deutschland nach dem Standpunkt des Verbands Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) ausgerichtet. Die drei zentralen Einflussgrößen sind dabei die Textur bzw. die Bodenart, der Ausgangs pH-Wert und der Humusgehalt der Fläche. Die Textur wird in 6 Bodenartengruppen erfasst, welche dann in Abhängigkeit von dem Humusgehalt unterschiedliche pH-Bereiche bei den 5 pH-Klassen A-E erreichen (Abbildung 1).

Bodenart/ Bodenartengruppe (BG)	pH-Klasse	Humusgehalt des Bodens				
		< 4	4,1 bis 8,0	8,1 bis 15,0	15,1 bis 30	> 30,0
		pH-Werte der Klassen A bis E				
Sand, S BG 1 Tongehalt bis 5 % Ton- plus Feinschluffgehalt bis 7 %	A	≤ 4,5	≤ 4,2	≤ 3,9	≤ 3,6	
	B	4,6 bis 5,3	4,3 bis 4,9	4,0 bis 4,6	3,7 bis 4,2	
	C	5,4 bis 5,8	5,0 bis 5,4	4,7 bis 5,1	4,3 bis 4,7	
	D	5,9 bis 6,2	5,5 bis 5,8	5,2 bis 5,4	4,8 bis 5,1	
	E	≥ 6,3	≥ 5,9	≥ 5,5	≥ 5,2	
schwach lehmiger Sand, I'S BG 2 Tongehalt > 5 bis 12 % Ton- plus Feinschluffgehalt > 7 bis 16 %	A	≤ 4,8	≤ 4,5	≤ 4,1	≤ 3,7	
	B	4,9 bis 5,7	4,6 bis 5,3	4,2 bis 4,9	3,8 bis 4,5	
	C	5,8 bis 6,3	5,4 bis 5,9	5,0 bis 5,5	4,6 bis 5,1	
	D	6,4 bis 6,7	6,0 bis 6,3	5,6 bis 5,9	5,2 bis 5,5	
	E	≥ 6,8	≥ 6,4	≥ 6,0	≥ 5,6	
stark lehmiger Sand, IS BG 3 Tongehalt > 12 bis 17 % Ton- plus Feinschluffgehalt > 16 bis 23 %	A	≤ 5,0	≤ 4,7	≤ 4,3	≤ 3,8	
	B	5,1 bis 6,0	4,8 bis 5,5	4,4 bis 5,1	3,9 bis 4,7	
	C	6,1 bis 6,7	5,6 bis 6,2	5,2 bis 5,8	4,8 bis 5,4	
	D	6,8 bis 7,1	6,3 bis 6,7	5,9 bis 6,2	5,5 bis 5,8	
	E	≥ 7,2	≥ 6,8	≥ 6,3	≥ 5,9	
sandiger/schluffiger Lehm, sL/uL; BG 4 Tongehalt > 17 bis 25 % Ton- plus Feinschluffgehalt > 23 bis 35 %	A	≤ 5,2	≤ 4,9	≤ 4,5	≤ 4,0	
	B	5,3 bis 6,2	5,0 bis 5,7	4,6 bis 5,3	4,1 bis 4,9	
	C	6,3 bis 7,0 ¹⁾	5,8 bis 6,5	5,4 bis 6,1	5,0 bis 5,7	
	D	7,1 bis 7,4	6,6 bis 7,0	6,2 bis 6,5	5,8 bis 6,1	
	E	≥ 7,5	≥ 7,1	≥ 6,6	≥ 6,2	
schwach toniger Lehm bis Ton, t'L, tL, IT, T BG 5; Tongehalt > 25 % Ton- plus Feinschluffgehalt > 35 %	A	≤ 5,3	≤ 4,9	≤ 4,5	≤ 4,0	
	B	5,4 bis 6,3	5,0 bis 5,8	4,6 bis 5,4	4,1 bis 5,0	
	C	6,4 bis 7,2 ¹⁾	5,9 bis 6,7	5,5 bis 6,3	5,1 bis 5,9	
	D	7,3 bis 7,7	6,8 bis 7,2	6,4 bis 6,7	6,0 bis 6,3	
	E	≥ 7,8	≥ 7,3	≥ 6,8	≥ 6,4	
Hochmoor und saure Niedermoore, Mo ²⁾ BG 6	A, B					≤ 4,2
	C					4,3
	D, E					≥ 4,4

¹⁾ Auf karbonathaltigen Böden (freier Kalk): keine Erhaltungskalkung

²⁾ Auf sauren organischen Böden wird Ackernutzung nicht empfohlen. Auf einem Großteil der Niedermoore liegen die pH-Werte geogen bedingt > 6,5.

Abbildung 1 Rahmenschema für Ackerland zur Einstufung der Kalkversorgung des Bodens nach pH-Klassen (VDLUFA, 2000)

Zieht man anschließend den Ausgangs pH-Wert zugrunde, erhält man für gegebene Bodenartengruppen und Humusgehalte Kalkmengenempfehlungen in dt CaO/ha. Für die in diesem Projekt relevante Bodenartengruppe 5 „schwach toniger Lehm bis Ton“ ist der Kalkdüngungsbedarf in Abbildung 2 dargestellt.

pH-Klasse	Humusgehalt									
	≤ 4,0 %		4,1 bis 8,0 %		8,1 bis 15,0 %		15,1 bis 30 %		> 30	
	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO
Bodenartengruppe 5: t'L/tL/IT/T - schwach toniger Lehm bis Ton										
A	≤ 4,5	160	≤ 4,2	137	≤ 3,8	121	≤ 3,3	44		
	4,6	152	4,3	130	3,9	115	3,4	41		
	4,7	144	4,4	123	4,0	108	3,5	39		
	4,8	136	4,5	115	4,1	102	3,6	37		
	4,9	128	4,6	108	4,2	95	3,7	35		
	5,0	121	4,7	100	4,3	89	3,8	33		
	5,1	113	4,8	93	4,4	82	3,9	31		
	5,2	105	4,9	86	4,5	76	4,0	29		
	5,3	98								
B	5,4	90	5,0	78	4,6	69	4,1	27		
	5,5	82	5,1	71	4,7	63	4,2	25		
	5,6	75	5,2	69	4,8	56	4,3	23		
	5,7	67	5,3	56	4,9	50	4,4	21		
	5,8	59	5,4	49	5,0	43	4,5	19		
	5,9	52	5,5	41	5,1	37	4,6	17		
	6,0	44	5,6	34	5,2	30	4,7	14		
	6,1	36	5,7	27	5,3	24	4,8	12		
	6,2	29	5,8	19	5,4	17	4,9	10		
	6,3	21					5,0	8		
C	6,4-7,2	20	5,9-6,7	18	5,5-6,3	16	5,1-5,9	7		
D	7,3-7,7	-	6,8-7,2	-	6,4-6,7	-	6,0-6,3	-		
E	≥ 7,8	-	≥ 7,3	-	≥ 6,8	-	≥ 6,4	-		

Abbildung 2 Kalkdüngungsbedarf von Ackerböden: pH-CaCl₂-Werte und jeweils zugehörige Kalkmengen in dt CaO/ha zur Erreichung und Erhaltung des optimalen pH-Bereiches (verändert nach (VDLUFA, 2000))

Unter mitteleuropäischem Klima ist die Entkalkung von Böden ein natürlicher Prozess in der Bodenentwicklung. Neben dem Niederschlagswasser sind die mikrobielle Bodenatmung, Wurzelaktivität, Einsatz sauer wirkender Düngemittel und die Abfuhr mit der Ernte zu berücksichtigen. In der Summe ist mit einem Entzug von 200-700 kg CaO/ha/a zu rechnen, stark abhängig von Standortfaktoren wie Bodenart, Niederschlagsmenge und auch der Fruchtfolge (Zimdahl, 2015). Den Entzügen stehen Zuführungen in Form von Düngekalk entgegen. Hierbei ist auffällig, dass im Vergleich zu anderen Düngemitteln nicht mit der ähnlichen Präzision gedüngt wird, sondern vielerorts nach Erfahrung über viele Jahre hinweg dieselbe Menge Kalk auf die Flächen gelangt. Im Rahmen der Bodenzustandserhebung wurden in Deutschland über 3000 Standorte beprobt und analysiert und bezüglich des pH-Wertes kam das Ergebnis heraus, dass 42 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Kalk unterversorgt sind. In Schleswig-Holstein auf tonreichen, ackerbaulich genutzten Flächen ist der Anteil der mit Kalk unterversorgten Böden in den letzten Jahren auf etwa 50 % angewachsen (Lausen &

Gosch, 2012). Mit Hinblick auf die bereits angedeuteten bodenphysikalischen Effekte einer Kalkung, welche in den Kalkmengenempfehlungen nicht berücksichtigt werden stellt sich die Frage nach der aktuellen Gültigkeit der angewendeten Kalkmengenempfehlungen.

Um die genannten möglichen Effekte einer Kalkung, bzw. einer ausreichenden Kalkversorgung, vor allem auf tonreichen ackerbaulich genutzten Standorten zu untersuchen wurden folgende Arbeitshypothesen formuliert:

Arbeitshypothesen:

Hypothese 1: Die eigens definierte Boden-Wasser-Nutzungseffizienz wird durch eine Kalkzufuhr verbessert.

Hypothese 2: Die Variation in der Kalkmenge und der Kalkform haben einen Einfluss auf die Parameter der Boden-Wasser-Nutzungseffizienz.

Hypothese 3: Die Kalkmengenempfehlungen müssen um eine bodenphysikalische Komponente erweitert werden, welche die Bodenstruktur berücksichtigt.

Definition der Boden-Wasser-Nutzungseffizienz:

Der Begriff „Wassernutzungseffizienz“ stammt aus dem Pflanzenbau und beschreibt das Verhältnis von fixiertem CO₂ der Photosynthese und Wasserverlust durch Transpiration von Wasser über die Spaltöffnung wieder. Um eine Verwechslung zu vermeiden wird in dieser Arbeit von der Boden-Wasser-Nutzungseffizienz gesprochen (BWNE), die im Folgenden kurz definiert wird. Die BWNE besteht in diesem Fall aus den 3 Faktoren bzw. Messgrößen der *Wasserretention* (Wasserspeicherung), *Wasserleitfähigkeit* und *Oberflächeneigenschaften* (Sorptivität und Kontaktwinkel). Damit werden verschiedene Bereiche abgedeckt auf denen eine Kalkung positive Einflüsse haben kann. Dabei werden sowohl Kapazitäts- als auch Intensitätsgrößen betrachtet, ebenso werden verschiedene Skalen betrachtet um die Ergebnisse vergleichbar und übertragbar zu machen.

Zusätzlich werden weitere Faktoren der Bodenstruktur untersucht, die auf den ersten Blick nur indirekt mit der BWNE zu tun haben. Diese umfassen Diffusionsmessungen sowie Respirationmessungen und erfassen dementsprechend weitere Parameter, welche Aussagen über die Bodenstruktur zulassen.

Material und Methoden

Lage und Geologie der Standorte:

Die Standorte Barlt und Struckum liegen nahe der Westküste in Schleswig-Holstein in den Marschen, damit zu der Bodenregion des Küstenholozäns. Barlt im südlichen Dithmarschen grenzt zwischen der alten Marsch und dem nach Osten beginnenden Geestrücken. Struckum liegt im Kreis Nordfriesland etwa 15 km nördlich der Kreisstadt Husum. Ähnlich wie der Standort in Barlt liegt der Standort Struckum im Bereich der alten Marsch im Geestrandbereich. Alte Marschen im Geestrandbereich sind die ältesten sedimentierten Gezeitenböden und liegen häufig charakteristisch über ehemaligen Geestrandmooren. Tonreiche Sedimente werden im Zuge der Ablagerung am weitesten landeinwärts transportiert und bilden daher heutzutage die charakteristischen tonreichen alten Marchböden. Typische Bodentypen sind Kleimarsch, Knickmarsch und Organomarsch. In Barlt wurde eine Kleimarsch kartiert (Abbildung 3), ein im Oberboden bereits entkalkter Marschboden. Ab 130 cm Tiefe beginnt ein Torfkörper der für ein ehemaliges Geestrandmoor spricht, welches von Gezeitsedimenten überlagert wurde. Der Standort wird ackerbaulich genutzt, die Fruchtfolge ist durch Druschfrüchte wie Winterweizen, Winterraps und Wintergerste dominiert, gelegentlich kommen auch Sommerungen zum Einsatz. In Struckum wurde ebenfalls eine Kleimarsch kartiert (Abbildung 4), hier war ebenfalls ein Torfkörper im Untergrund, ab 115 cm Tiefe beginnend zu finden. Die Fruchtfolge ist ähnlich wie in Barlt, Getreide und Raps nur bei ungünstigen Wetterbedingungen für die Aussaat im Herbst folgt eine Sommerung im Folgejahr.



Abbildung 3 Profilbild von der Kleimarsch am Standort Barlt

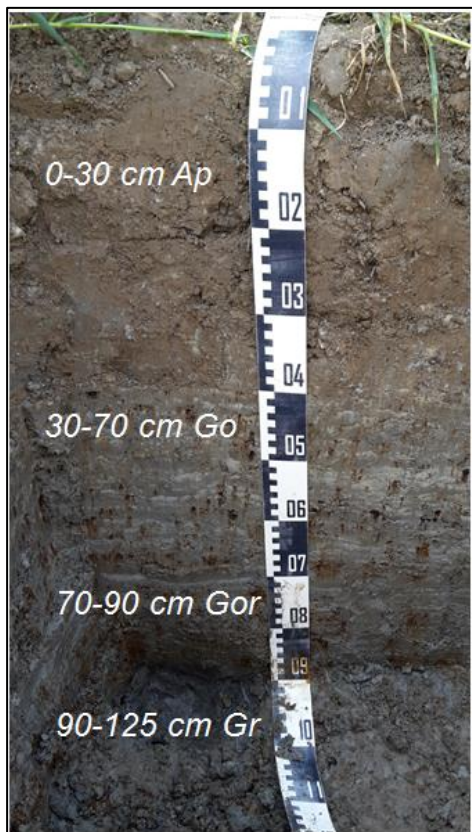


Abbildung 4 Profilbild von der Kleimarsch am Standort Struckum

Einige grundlegende Charakteristika für beide Standorte sind in den Tabellen 1 und 2 gegeben. Aufgrund der hohen Tongehalte und der niedrigen pH-Werte wurden die beiden Standorte ausgewählt, da dadurch eine schnelle Wirkung des Kalkes und die anschließenden Effekte erwartet wurden.

Tabelle 1 Eigenschaften der Kleimarsch am Standort Barlt

Tiefe cm	Horizont Symbol	Sand Gew. %	Schluff Gew. %	Ton Gew. %	Textur Symbol	pH CaCl ₂	Corg %
0-27	Ap	10 ± 1	45 ± 3	45 ± 4	Tu2	5,5 ± 0,2	3,4 ± 0,2
27-95	Go	7 ± 1	56 ± 2	37 ± 2	Tu3	5,3 ± 0,2	1,6 ± 0,3
95-120	Gr	7 ± 1	58 ± 3	35 ± 2	Tu3	5,8 ± 0,1	2,8 ± 0,2

Tabelle 2 Eigenschaften der Kleimarsch am Standort Struckum

Tiefe cm	Horizont Symbol	Sand Gew. %	Schluff Gew. %	Ton Gew. %	Textur Symbol	pH CaCl ₂	Corg %
0-30	Ap	16 ± 1	57 ± 2	27 ± 2	Lu	4,7 ± 0,2	1,5 ± 0,1
30-70	Go	10 ± 2	70 ± 3	20 ± 3	Lu	5,1 ± 0,2	1,2 ± 0,1
70-90	Gor	8 ± 2	66 ± 3	26 ± 3	Lu	4,9 ± 0,3	0,8 ± 0,2
90-125	Gr	8 ± 1	68 ± 2	24 ± 2	Lu	5,5 ± 0,2	0,5 ± 0,2

Die Versuche sind auf den Standorten Barlt und Struckum gleich angelegt, in randomisierter Blockanlage mit 4-facher Wiederholung. Die Parzellengrößen betragen in Barlt 6*18 m und in Struckum 6*21 m und sind aufgeteilt in eine Ernteparzelle und eine Beprobungsparzelle. Angelegt wurden die Versuche Ende August 2016 auf den Stoppeln der abgeernteten Wintergetreidefrüchte. Eingearbeitet wurde zeitnah mit der Stoppelbearbeitung mit Scheibeneggen und anschließend zur Saadbereitung der kommenden Wintergetreidefrüchte erfolgte ein Pflugdurchgang. Insgesamt sind 5 verschiedene Kalkvarianten angelegt, die kreuzklassifizierten Stickstoffvarianten sind für ein weiteres Projekt und sind kein Bestandteil dieser Arbeit. Die Kalkvarianten sind in Tabelle 3 dargestellt, die Farben werden in den Abbildungen für die jeweiligen Varianten beibehalten.

Tabelle 3 Übersicht über die Kalkvarianten, sowie über die ausgebrachten Kalkmengen an den beiden Standorten Barlt und Struckum. Die Farben entsprechen den verwendeten Farben der Boxplots in den Abbildungen. OK = Nullkalk, Referenz; KK-1 Kohlensaurer Kalk (CaCO₃) in der Menge nach LUFA Empfehlung; KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk (CaCO₃) in der anderthalbfachen Menge der LUFA Empfehlung; BK-1 = Branntkalk (CaO) in der Menge nach LUFA Empfehlung; BK-1,5 = Branntkalk (CaO) in der anderthalbfachen Menge der LUFA Empfehlung.

Variante	Bedeutung	Ausgebrachte Menge Barlt	Ausgebrachte Menge Struckum
OK	Nullkalk-Referenz	-	-
KK-1	Kohlensaurer Kalk nach VDLUFA- Empfehlung	75 dt/ha	166,7 dt/ha
KK-1,5	Kohlensaurer Kalk in der 1,5-fachen Menge der	112,5 dt/ha	250 dt/ha

	VDLUFA- Empfehlung		
BK-1	Branntkalk nach VDLUFA- Empfehlung	40 dt/ha	88,9 dt/ha
BK-1,5	Branntkalk in der 1,5-fachen Menge der VDLUFA- Empfehlung	60 dt/ha	133,3 dt/ha

Der Standort Cunnersdorf liegt etwa 15 km östlich von Leipzig und damit im Bereich der Leipziger Tieflandbucht, die wiederum zu der Bodenregion der Altmoränenlandschaft gehört. Das Ausgangsmaterial für die Bodenentwicklung ist hier eine in der Mächtigkeit variierende Sandlößdecke über saaleeiszeitlichem Geschiebemergel. Der kartierte Bodentyp ist ein Parabraunerde-Pseudogley. Ein Profilbild ist in Abbildung 5 dargestellt und einige Eigenschaften in Tabelle 4 aufgelistet.

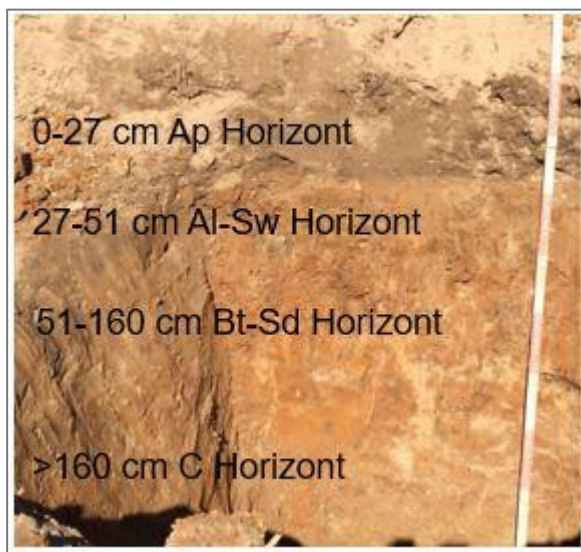


Abbildung 5 Profilbild des Parabraunerde-Pseudogley am Standort Cunnersdorf

Der Versuch in Cunnersdorf wurde 1996 etabliert, es wurde ein randomisierter Blockversuch mit 4-facher Wiederholung angelegt. Aufgrund der langen Laufzeit des Versuches wurde dieser Standort beprobt, um eventuelle Vergleiche zu neu angelegten

Versuchen ziehen zu können. Gekalkt wurde in den Jahren 1996, 1997, 1998, 2000, 2002 (jeweils 20 dt/ha Reinkalk), 2005, 2009 (12 dt/ha) und 2014 (15 dt/ha). Insgesamt sind 6 Varianten angelegt, eine Kontrolle ohne Kalk und 5 verschiedene Kalkformen, ohne Mengenvarianten wie in Barlt und Struckum. Beprobte wurden aufgrund der Vergleichbarkeit nur die reinen Formen des Kohlensäuren Kalkes und des Branntkalkes. Das Profil wurde nicht direkt im Versuch, sondern aufgrund des begrenzten Platzes etwa 20 Meter auf dem Nebenschlag angelegt und beprobt. Der Nebenschlag gehört grundsätzlich zum selben Feld und ist aufgrund einer recht homogenen Fläche repräsentativ, was durch Bohrstockkartierung auf dem Kalkversuch überprüft wurde.

Tabelle 4 Eigenschaften des Parabraunerde-Pseudogleys am Standort Cunnersdorf

Tiefe cm	Horizont Symbol	Sand Gew. %	Schluff Gew. %	Ton Gew. %	Textur Symbol	pH CaCl ₂	Corg %
0-27	Ap	44 ± 3	45 ± 3	11 ± 2	Slu	4,8 ± 0,1	0,9 ± 0,1
27-51	Al-Sw	46 ± 2	38 ± 2	16 ± 1	Sl4	4,8 ± 0,1	0,5 ± 0,1
51-160	Bt-Sd	63 ± 3	17 ± 2	20 ± 3	Ls4	4,7 ± 0,1	0,3 ± 0,1
>160	C	52 ± 2	25 ± 1	23 ± 2	Ls4	5,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1

Methoden:

Für die Laboruntersuchungen wurden im Feld neben gestörten vor allem ungestörte Bodenproben entnommen. Dazu wurden Edelstahl Stechzylinder vertikal in den Boden eingetrieben und vorsichtig entnommen. Die beiden untersuchten Tiefen sind 10 cm und 30 cm aus denen ebenfalls gestörte Beutelpuben gezogen wurden, um weitere Standarduntersuchungen durchzuführen. Pro Variante wurden insgesamt 28 Zylinder (100 cm³) zur Bestimmung der Porengrößenverteilung, der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf), dem optischen Kontaktwinkel (OCA) und der Sorptivität verwendet. 8 Stechzylinder (471 cm³) wurden für Diffusionsmessungen, sowie für die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (ku) genutzt. Aus 4 flachen Zylindern (263 cm³) wurden im Labor kleine Zylinder ausgestochen, mit denen unter anderem der Feinporenanteil (pF 4,2) bestimmt wurde, sowie die Respiration. Ein Überblick über die Messungen und der Zylinderwiederholungen ist in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5 Übersicht über die entnommenen Stechzylinder für ungestörte Bodenproben.

Anzahl	Zylinder	Größe	Tiefen	Messung
12	klein	100 cm ³	10, 30 cm	Porengrößenverteilung
8	klein	100 cm ³	10, 30 cm	kf
4	klein	100 cm ³	10, 30 cm	OCA
4	klein	100 cm ³	10, 30 cm	Sorptivität
4	groß	471 cm ³	10, 30 cm	Diffusion
4	groß	471 cm ³	10, 30 cm	ku
4	flach	263 cm ³	10, 30 cm	pF 4,2; Respiration

Von dem horizontweise beprobten gestörten Material wurden Korngrößenverteilung, pH-Wert, Kohlenstoffgehalte, Carbonatgehalt, Stickstoffgehalte sowie Kationenaustauschkapazität bestimmt. Dazu wurde das Material an der Luft getrocknet und anschließend auf 2 mm gesiebt. Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde die Sieb- und Pipettanalyse nach (DIN ISO 11277, 2002) verwendet (Hartge & Horn, 2009). Die pH-Werte wurden an 10 g Boden mit 25 ml 0,01 M CaCl₂ Lösung mittels einer Glaselektrode elektrometrisch bestimmt (Blume, et al., 2011). Der Carbonatgehalt wurde mit der Scheibler-Analyse bestimmt, wobei aus dem Boden freigesetztes CO₂ gasvolumetrisch bestimmt wird und mit aktueller Temperatur und Luftdruck der Carbonatgehalt berechnet wird (Blume, et al., 2011). Bei der Bestimmung der Kationenaustauschkapazität wurden die basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium (Summe = S-Wert) atomabsorptionsspektrophotometrisch gegen Kalibrierstandards mit bekannten Konzentrationen bestimmt (Blume, et al., 2011). Der H-Wert nach Schachtschabel wurde mit der Bodenreaktion in 0,5 M Calciumacetat [Ca(C₂H₃O₂)₂] ermittelt (Schlichting, et al., 1995). Der S-Wert und der H-Wert nach Schachtschabel ergeben in der Summe die potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}).

Zur Bestimmung der Porengrößenverteilung wurden die Stechzylinder zunächst kapillar mit destilliertem Wasser aufgesättigt und dann stufenweise über keramische Unterdruckplatten und Überdruckdrucktöpfen entwässert. Die einzelnen Entwässerungsstufen entsprechen dabei den Grenzwerten zur Einteilung der verschiedenen Porengrößenklassen. Weite Grobporen (wGP, > 50 µm) entsprechen dem

Matrixpotenzialbereich von 0 und -60 hPa. Enge Grobporen (eGP, 50-10 µm) entwässern zwischen -60 und -300 hPa, Mittelporen (MP, 10-0,2 µm) zwischen -300 und -15.000 hPa. Feinporen (FP, < 0,2 µm) entwässern bei Matrixpotenzialen von größer -15.000 hPa. Am Ende jeder Messung erfolgt eine Trocknung bei 105 °C über 16 h, um die Trockenrohdichte zu bestimmen. Über eine Gewichtsbestimmung nach der jeweiligen Entwässerungsstufe lassen sich die Porengrößenverteilungen errechnen und nach KA5 bewerten (Ad-hoc, 2005). Nach jeder Entwässerungsstufe wird die Luftleitfähigkeit gemessen, in einem Acryldurchflussmessgerät mit eingebautem Schwebkörper, weitere Informationen siehe (Peth, 2004). Mit der Bestimmung der Luftleitfähigkeit lässt sich, zusammen mit der Viskosität der Luft (η), der Dichte von Luft (ρ_l) und der Erdbeschleunigung (g) daraus anschließend die Luftpermeabilität berechnen (Formel 1), die im Zusammenhang mit der Luftkapazität für die Bestimmung die beiden Indizes C_2 (Formel 2) und C_3 (Formel 3) nach (Groenevelt, et al., 1984) genutzt werden kann. Die Indizes lassen Aussagen über Porenkontinuitäten im Boden zu, so sind unterschiedliche Werte beim C_2 Index ein Merkmal für unterschiedliche Porenkontinuitäten und Porengrößenverteilungen. Der C_3 Index bezieht sich allein auf die Porenkontinuität.

$$ka = \frac{kl * \eta}{\rho_l * g} \quad (1)$$

Die C_2 und C_3 Indizes werden an den Proben für die Diffusionsmessungen, sowie den Proben der Porengrößenbestimmung (Druckstufe -60 hPa) bestimmt, bzw. deren luftgefüllte Porenvolumina werden zur Berechnung verwendet.

$$C2 = \frac{ka}{\theta a} \quad (2)$$

$$C3 = \frac{ka}{\theta a^2} \quad (3)$$

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) wurde unter instationären Bedingungen mit einem Haubenpermeameter nach (Hartge, 1966) bestimmt. Die Bodenproben wurden erst kapillar aufgesättigt und dann mit Wasser überstaut, anschließend wurden 3 Wiederholungsmessungen je Zylinder durchgeführt (Hartge & Horn, 2009).

Die gesättigten Wasserleitfähigkeiten werden nach Bodenkundlicher Kartieranleitung in 6 verschiedene Stufen eingeordnet. Einen Überblick liefert Tabelle 6, in den Abbildungen mit den Boxplots stehen die roten Linien jeweils von unten ausgehend für die Grenzwerte

Tabelle 6 Einstufung der gesättigten Wasserleitfähigkeit nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (Ad-hoc, 2005).

Bezeichnung	Gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm/d
sehr gering	< 1
gering	1 bis < 10
mittel	10 bis < 40
hoch	40 bis < 100
sehr hoch	100 bis < 300
extrem hoch	> 300

Für die Bestimmung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit (k_u) werden Stechzylinderproben mit je zwei TDR-Nadeln und Tensiometern ausgestattet, um den Wassergehalt und die Matrixpotenziale im Laufe einer Entwässerung aufzuzeichnen. Die instationäre Evaporationsmethode (Plagge, 1991) ermöglicht die Berechnung der k_u über die Gradienten der Wassergehalte und Matrixpotenziale. Die erhaltenen Daten können mit dem Programm RETC (van Genuchten, et al., 1991) weiterbearbeitet und angepasst werden, um die Wasserleitfähigkeitsfunktion zu bestimmen.

Die Diffusionsmessungen wurden an einem Doppel-Kammer-System nach (Rolston & Moldrup, 2002) durchgeführt. Dabei wird die Bodenprobe in einem 471 cm³ Stechzylinder aufgesättigt und auf – 60 hPa entwässert. Dem Zylinder wird dann eine Kammer jeweils unter- und oberhalb Gas-dicht aufgesetzt und in die obere Kammer wird synthetische Luft (20,95 % O₂), in die untere Kammer wird elementarer Stickstoff (0 % O₂) gefüllt. In den Kammern befinden sich Sauerstoffsensoren (UNISENSE A/S), die während der gesamten Messung die Sauerstoffkonzentrationen in den beiden Kammern aufzeichnen. Das gesamte System wird so abgedichtet, dass ein Gasaustausch der beiden Kammern nur noch durch die Bodenprobe erfolgen kann. Die Sauerstoffkonzentrationen in den beiden Kammern nähern sich im Laufe der Messung an, bis sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Für die Berechnung der Diffusionskoeffizienten werden die ersten 4 Stunden der Messung verwendet (Mordhorst, et al., 2017). Der dimensionslose relative

Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_s/D_o stellt den Diffusionskoeffizient im Boden (D_s) dem Diffusionskoeffizienten in freier Luft (D_o) entgegen. D_o ist eine feste Größe von $2,01 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^2 \cdot \text{s)}$, der D_s wird nach Formel 4 berechnet, in der die Gaskonzentrationen (C_{eq}), die Sauerstoffkonzentration (c), das Volumen der Gaskammern (V), die Länge der Probe (L), die Probenquerschnittsfläche (A) und die Zeit (t) einfließen.

$$D_s = \frac{-\ln\left(\frac{\Delta C}{2} * C_{eq}\right) * V * L}{A * t * 2} \quad (4)$$

Anhand der Ergebnisse aus der Diffusionsmessungen können in Kombination mit Parametern aus der Luftleitfähigkeit bzw. Luftpermeabilität Indizes berechnet werden, die Aussagen über Konnektivität und Tortuosität von Porensystemen zulassen. Der C_1 Index (Formel 5) lässt Aussagen über den Anteil an luftgefüllten Poren zu, welche für den diffusen Gastransport zuständig sind.

$$C_1 = \frac{D_s}{D_o * \theta a^2} \quad (5)$$

Der Tortuositätsindex (T) nach Moldrup et al. (2001) beschreibt das Verhältnis von der direkten Fließstrecke bei einer geraden Pore im Vergleich zu einem verlängertem Fließweg bei einer gewundenen Pore (Formel 6).

$$T = \sqrt{\frac{\theta a * D_o}{D_s}} \quad (6)$$

Der optische Kontaktwinkel wird über eine optische Methode bestimmt, wobei ein Tropfen kontrolliert auf die Bodenoberfläche gebracht wird und ein Kamera / Software-System die Bestimmung des Kontaktwinkels ermöglicht. Die Kamera (OCA20, DataPhysics, Filderstedt, Deutschland) verfügt über eine Bildrate von 250 s^{-1} . Die Tropfen haben ein ungefähres Volumen von $8 \text{ } \mu\text{l}$ und die Kontaktfläche beträgt dementsprechend etwa 4 mm^2 . Es wurden 4 Stechzylinderproben pro Variante bei unterschiedlichen

Entwässerungsstufen (-60, -300 hPa, lufttrocken) gemessen, pro Zylinder werden 4 Messungen durchgeführt.

Die Bestimmung der Kontaktwinkel als Maß für die Benetzbarkeit wurde für gestörtes, lufttrockenes Material mithilfe der Wilhelmy-Platten-Methode durchgeführt (Bachmann et al., 2003). Hierbei wird eine Ein-Korn-Schicht auf einen Objekträger aufgetragen, welcher anschließend senkrecht in destilliertes Wasser eingetaucht wird. Dabei wirkt eine Kraft auf den Träger, welche mit der Grenzflächenspannung und dem Kontaktwinkel korreliert. Durch das Hineintauchen und das Herausziehen des Objekträgers entsteht ein Fortschritt- und ein Rückzugswinkel, woraus der Wilhelmy-Kontaktwinkel gemittelt wird (Bachmann, et al., 2003).

Sorptivitätsmessungen wurden an Stechzylindern durchgeführt, die vorher zunächst aufgesättigt wurden und dann auf -60 hPa entwässert wurden. Wie in (Hallett, et al., 2004) beschrieben, wurde ein Gradient von + 0,02 m verwendet. Als Kapillare wurden sogenannte Minicaps (Einmal-Kapillarpipetten) verwendet, die eine kleinere Kapillargröße aufweisen und damit höhere Auflösungen bei der Infiltration ermöglichen (Haas, et al., 2018). Die Aufnahme von Ethanol und Wasser in die Bodenprobe wurde 120 Sekunden mit einer 0,1 mg genauen Waage aufgenommen. Die Sorptivität (S in $\text{m} \cdot \text{s}^{-0,5}$) wurde anschließend mit Formel 7 berechnet (Hallett, et al., 2004), wobei Q die Flussrate der jeweiligen Flüssigkeit ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ist. Das luftgefüllte Porenvolumen (f), der Durchmesser der verwendeten Kapillare (r) und der Faktor (b), welcher für die Benetzungsfront verwendet wird und fest mit 0,55 angenommen wird.

$$S = \sqrt{\frac{Q * f}{4 * b * r}} \quad (7)$$

Zusätzlich kann anhand von Steigungsfunktionen der Infiltration von Wasser und Ethanol gegen die Zeit der Repellency-Index berechnet werden. Repellency-Indices (RI) sind dimensionslose Werte, welche Aussagen über die Benetzbarkeit der Bodenproben zulassen, je niedriger der Wert, desto besser die Benetzungsfähigkeit im Boden. So sind RI's über 1,95 charakteristisch für benetzungsgehemmte Bodenproben. Der RI wird anhand Formel 8 berechnet.

$$RI = 1,95 * \frac{S_{Ethanol}}{S_{Wasser}} \quad (8)$$

Es wurden 4 Zylinderproben je Variante verwendet und pro Zylinder 3 Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Für die Respirationmessungen wurden 22 cm³ große Zylinder aus den 263 cm³ Zylindern vorsichtig ausgestochen, aufgesättigt und anschließend auf -60 hPa entwässert. Es folgt die Vorinkubation der Proben bei Dunkelheit und 22 °C für 10-14 Tage um einen Gleichgewichtszustand zu erreichen (Pell, et al., 2005). Für die Messung wurden die Proben in 800 cm³ große Gas-dichte Kammern gestellt und ein Wasservorrat wurde verwendet um Verdunstung zu minimieren. Mit einer Alkali-Fallen Methode wurde das aus der Bodenprobe austretende CO₂ bestimmt, in dem 20 ml 0,05 M NaOH in einem Gefäß in die Kammer gestellt wurde. Anschließend wurden die Kammern für 24 h verschlossen und das verbleibende NaOH wurde, nach Zugabe von 2mL 0,5 M BaCl₂, mit 0,1 M HCl auf pH von 8,2 titriert.

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm R-Studio (R Core Team, 2016). Die Daten aus den Messungen der gesättigten Wasserleitfähigkeiten wurden logarithmiert, damit sie wie die anderen Daten die Kriterien der Normalverteilung und Heteroskedastizität erfüllen. Unterschiede zwischen den Varianten wurden anschließend mit Varianzanalysen (ANOVA) und multiplen Kontrasttests (Tukey HSD) bewertet.

Die drei Probenahmen erfolgten im April 2017 (7 Monate nach Kalkung), August 2017 (12 Monate nach Kalkung) und in Barlt im August 2018 (24 Monate nach Kalkung). In Struckum wurde die letzte Beprobung im Oktober 2018 (26 Monate nach Kalkung) durchgeführt. Zwischen der ersten und zweiten Probenahme erfolgte keine Form der Bodenbearbeitung. Zwischen der zweiten und dritten Probenahme erfolgten sowohl flache Stoppelbearbeitungen sowie auch vor der Aussaat der Wintergetreide im Herbst 2017 wendende Pflugarbeit auf ~30 cm Tiefe.

Am Standort Cunnersdorf wurden im April und im August 2016 Proben genommen, was ungefähr 18 bzw. 23 Monate nach der letzten Kalkung entspricht.

Ergebnisse

pH-Werte, Kohlenstoff und Kationenaustauschkapazitäten:

Die pH-Werte wurden vor der Anlage der Versuche in Barlt und Struckum von jeder Parzelle entnommen und dann bei jeder der 3 Probenahmen erneut gemessen. Die erhobenen Werte sind in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt. Am Standort Barlt steigen die Werte in 10 cm Tiefe bei der ersten Probenahme insgesamt bei die Kalkvarianten an, die Brantkalkvarianten weisen höhere Werte auf als die Kohlensäuren Kalkvarianten. Die 1,5-fachen Varianten erhöhen erwartungsgemäß ebenfalls die pH-Werte deutlich. Bei den nächsten beiden Probenahmen sinken die pH-Werte in 10 cm Tiefe bei allen 4 Kalkvarianten, zum Teil deutlich ab. In 30 cm Tiefe ist die Entwicklung über die Probenahmen anders, entweder bleiben die Werte sehr ähnlich wie bei den Kohlensäuren Kalkvarianten, oder steigen bei den Brantkalkvarianten im Verlauf an. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der Kohlensäure Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung nicht ausreicht, um den erwünschten pH-Bereich von 6,4-7,2 zu erreichen.

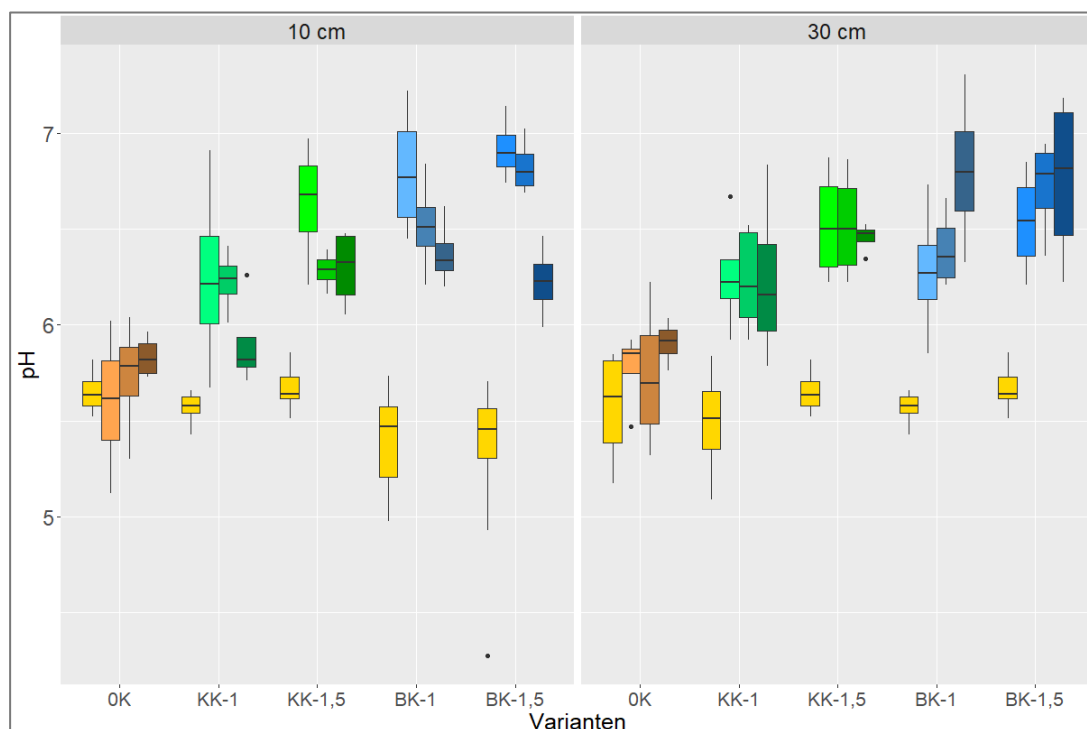


Abbildung 6 pH-Werte (in CaCl_2) für den Standort Barlt, für 4 verschiedene Zeitpunkte (vor Versuchsanlage, 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung); die goldenen Boxplots stellen den Zeitpunkt vor Ausbringen des Kalkes dar. Die drei dunkler werdenden Boxplots pro Variante stellen die drei Probenahmen dar. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensäurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensäurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 =

Brantkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Brantkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4

Am Standort Struckum weisen grundsätzlich ähnlich wie in Barlt die Brantkalkvarianten höhere Werte auf als die KK Varianten und auch die 1,5-fachen Mengen erhöhen jeweils die Werte. In 10 cm Tiefe sind die Werte über die 3 Probenahmen entweder gleichmäßig verteilt oder tendenziell leicht ansteigend. In 30 cm Tiefe sind die pH-Werte leicht höher als in 10 cm Tiefe, die KK-1,5 sowie die Brantkalkvarianten weisen Werte von um die 7 auf. Die KK-1 Variante erreicht erst bei der letzten Probennahme den Ziel pH-Bereich von 6-4-7,2, die anderen Kalkvarianten erreichen diesen Bereich bereits früher.

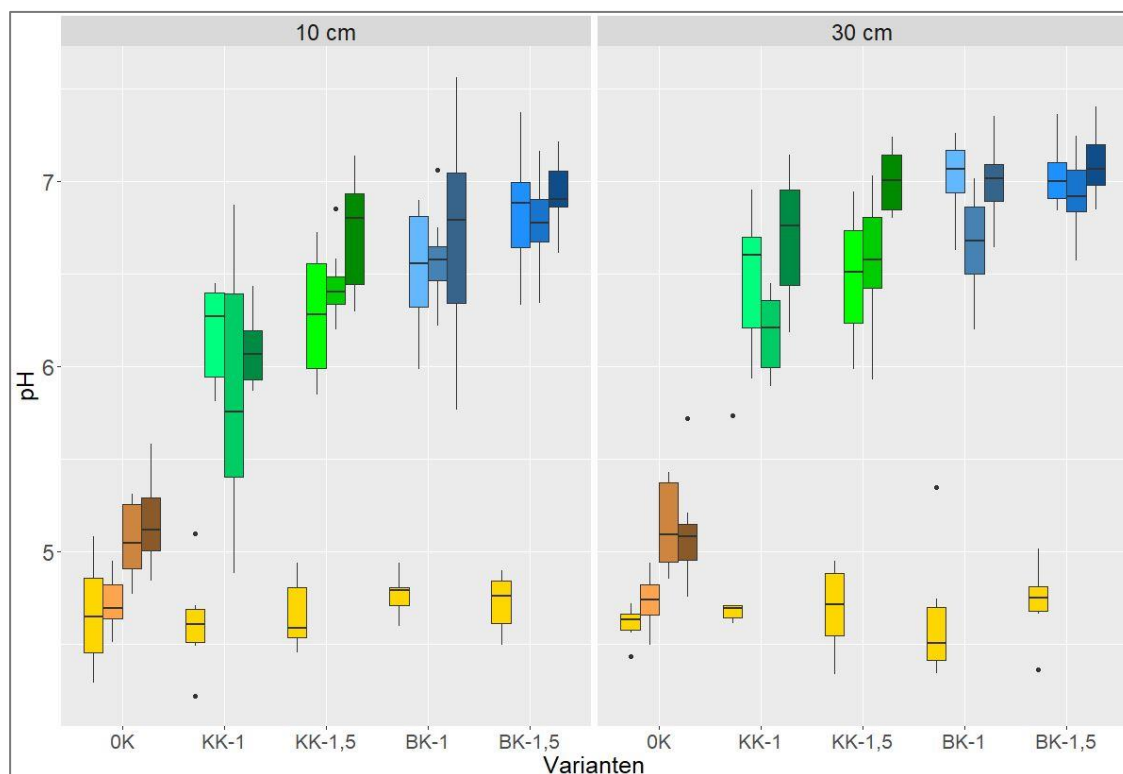


Abbildung 7 pH Werte (in CaCl₂) für den Standort Struckum, für 4 verschiedene Zeitpunkte (vor Versuchsanlage, 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung); die goldenen Boxplots stellen den Zeitpunkt vor Ausbringen des Kalkes dar. Die drei dunkler werdenden Boxplots pro Variante stellen die drei Probenahmen dar. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Brantkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Brantkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort n = 4

Am Standort Cunnersdorf weisen beide Kalkformen signifikant höhere pH-Werte im Vergleich zur „Nullkalk“ Kontrolle (Abbildung 8). Der Brantkalk hatte im Vergleich zum Kohlensauren Kalk nur leicht erhöhte Werte, welche statistisch nicht signifikant sind. Zwischen den beiden Tiefen findet man kaum Unterschiede, zwischen den beiden

Probenahmeterminen fällt auf, dass sich der pH-Wert der Kontrolle jeweils im zweiten Termin, im August 2016 erhöht hat.

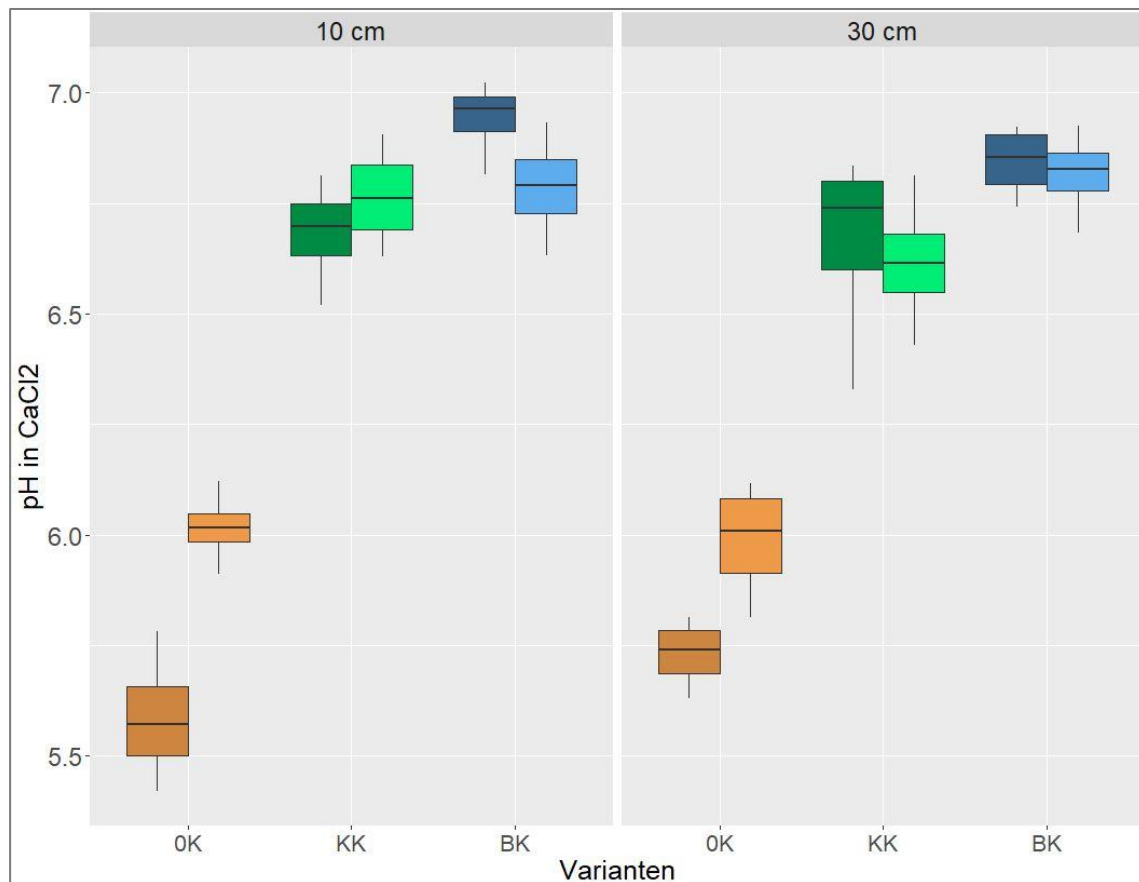


Abbildung 8 pH-Werte (in CaCl₂) für den Standort Cunnersdorf, für 2 verschiedene Zeitpunkte (April 2016 linker Teil der Boxplot-Paare, August 2016 rechter Teil der Boxplot-Paare). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensäurer Kalk, BK = Branntkalk. n = 4

Die organischen Kohlenstoffgehalte änderten sich über den Untersuchungszeitraum an keinem der drei Standorte und sind daher mit den Ausgangswerten aus den Tabellen 1, 2 und 4 statistisch identisch. Anorganischer Kohlenstoff wurde bei den Proben nicht festgestellt.

Die Kationenaustauschkapazitäten unterscheiden sich für die Standorte im Gesamtmaß meistens nicht unterhalb der einzelnen Varianten, ebenso wie in der Zeitreihe entlang der Probenahmen keine signifikanten Änderungen festzustellen sind. Daher werden hier im Ergebnisteil exemplarisch die Werte einer Probenahme gezeigt, die übrigen befinden sich im Anhang. Am Standort Struckum weisen die beiden 1,5-fachen Mengen der untersuchten Kalkformen leicht erhöhte KAK Werte auf. Dort lässt sich am ehesten eine

Verschiebung in den Anteilen der einzelnen Kationen erkennen, im Hinblick auf höhere Calcium Anteile und geringere Magnesium und Kalium Anteile.

Tabelle 7 Potentielle Kationenaustauschkapazitäten (in cmol_c/kg) der einzelnen Varianten am Standort Barlt, 12 Monate nach Kalkung (August 2017), sowie die Anteile der einzelnen Kationen. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort.

Variante	KAK_{pot} in cmol_c/kg	Anteil Natrium in %	Anteil Kalium in %	Anteil Magnesium in %	Anteil Calcium in %
OK	23	2	14	8	76
KK-1	23	2	14	8	76
KK-1,5	24	2	14	8	76
BK-1	24	2	12	8	78
BK-1,5	24	2	12	7	79

Tabelle 8 Potentielle Kationenaustauschkapazitäten (in cmol_c/kg) der einzelnen Varianten am Standort Struckum, 12 Monate nach Kalkung (August 2017), sowie die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort.

Variante	KAK_{pot} in cmol_c/kg	Anteil Natrium in %	Anteil Kalium in %	Anteil Magnesium in %	Anteil Calcium in %
OK	29	4	9	21	66
KK-1	30	4	9	18	69
KK-1,5	36	5	8	17	70
BK-1	29	4	9	19	68
BK-1,5	38	3	6	16	75

Tabelle 9 Potentielle Kationenaustauschkapazitäten (in cmol_c/kg) der einzelnen Varianten am Standort Cunnersdorf, 23 Monate nach letzter Kalkung (August 2016), sowie die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensäurer Kalk, BK = Branntkalk.

Variante	KAK _{pot} cmol _c /kg	in Anteil Natrium %	in Anteil Kalium in %	Anteil Magnesium in %	Anteil Calcium %
OK	16	2	4	14	80
KK	17	1	5	14	80
BK	16	1	5	13	81

Porengrößenverteilung

Die Porengrößenverteilungen liefern Aussagen über Parameter des Luft- und Wasserhaushaltes des Bodens. Der Anteil an weiten Grobporen entspricht der Luftkapazität welche eine Bedeutung für die Belüftung des Bodens hat. Die engen Grobporen und Mittelporen bilden zusammen die nutzbare Feldkapazität, das pflanzenverfügbare Wasser. Die Feinporen entsprechen dem sogenannten Totwasser, dem so fest in der Bodenmatrix gebundenen Wasser, so dass es nicht pflanzenverfügbar ist. Die Anteile der jeweiligen Porengrößenklassen ergeben aufaddiert das Gesamtporenvolumen, dem Anteil im Boden der nicht aus mineralischen oder organischen Komponenten besteht und dementsprechend entweder mit Wasser oder mit Luft gefüllt ist. Für die Standorte Barlt und Struckum sind die Ergebnisse der Porengrößenverteilung jeweils aus einer Tiefe für die 3 Probenahmetiefen in einer Abbildung dargestellt.

Porengrößenverteilung am Standort Barlt:

Die Porengrößenverteilungen zeigen am Standort Barlt unmittelbar nach Versuchsbeginn bei der ersten Probenahme im Frühjahr 2017, 7 Monate nach der Kalkung einige positive Effekte der Kalkung (Abb. 8). In 10 cm Tiefe sind sowohl die Luftkapazität als auch die nutzbare Feldkapazität der 1,5-fachen Varianten im Vergleich zur OK erhöht. Das Gesamtporenvolumen ist bei allen 4 Kalkvarianten leicht erhöht im Vergleich zur ungekalkten Variante. Gleichzeitig sinkt der Anteil am Totwasser, dem nicht pflanzenverfügbaren Wasser, findet auch eine Änderung im Porenraum statt. Durch die

Flockung und Aggregation der Tonpartikel, welche durch eine Kalkzufuhr gefördert wird, entstehen größere Strukturen, zwischen denen Feinporen umgewandelt werden in Mittelporen und (vor allem enge) Grobporen.

Bei der zweiten Probenahme im August 2017 gleichen sich die Werte der einzelnen Varianten an und im Sommer 2018, eventuell auf die extreme Trockenheit zurückzuführen, die Werte der Luftkapazität auffallend höher. Hinzuzufügen ist außerdem, dass zwischen der zweiten und dritten Probenahme der Boden regulär bearbeitet wurde, so dass neu geschaffene Porenräume und Strukturen eventuell wieder zerstört worden sind.

Barlt	10 cm Tiefe	GPV (Vol.-%)	LK (Vol.-%)	nFK (Vol.-%)	TW (Vol.-%)	
	OK	52	3	5	44	7 Monate nach Kalkung
	KK-1	55	4	7	43	
	KK-1,5	56	6	13	37	
	BK-1	55	5	10	40	
	BK-1,5	56	9	13	34	
	OK	54	4	10	40	12 Monate nach Kalkung
	KK-1	56	5	13	38	
	KK-1,5	56	4	12	40	
	BK-1	55	5	13	37	
	BK-1,5	56	7	14	35	
	OK	55	12	5	38	24 Monate nach Kalkung
	KK-1	57	14	5	38	
	KK-1,5	56	13	5	38	
	BK-1	56	15	6	35	
	BK-1,5	56	12	8	36	

Abbildung 9 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Barlt in 10 cm Tiefe. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort n = 12

In 30 cm Tiefe sind ähnliche Trends zu erkennen wie im Oberboden, da auch hier bei der ersten Probenahme positive Effekte der Kalkung zu sehen sind. Besonders in den beiden 1,5-fachen Varianten steigen die nutzbare Feldkapazität und damit das pflanzenverfügbare Wasser (Abbildung 9). Die Luftkapazitäten der Varianten liegen insgesamt auf einem niedrigeren Niveau als in 10 cm und damit sind signifikante Unterschiede zwischen den Varianten schwer auszumachen.

Auch in 30 cm Tiefe ist der Effekt zu sehen, dass der letzte Probenahmetermin, nach erneuter Bodenbearbeitung nur noch geringe Unterschiede aufweist.

Barlt	30 cm Tiefe	GPV (Vol.-%)	LK (Vol.-%)	nFK (Vol.-%)	TW (Vol.-%)	
	OK	54	2	8	44	7 Monate nach Kalkung
	KK-1	53	4	10	39	
	KK-1,5	52	3	14	35	
	BK-1	54	2	12	40	
	BK-1,5	53	4	16	33	
	OK	53	3	10	40	12 Monate nach Kalkung
	KK-1	55	4	9	42	
	KK-1,5	56	5	14	37	
	BK-1	54	4	11	39	
	BK-1,5	56	6	13	37	
	OK	52	6	5	41	24 Monate nach Kalkung
	KK-1	52	5	7	40	
	KK-1,5	50	6	8	36	
	BK-1	51	7	6	38	
	BK-1,5	52	5	7	40	

Abbildung 10 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Barlt in 30 cm Tiefe. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 12

Porengrößenverteilung am Standort Struckum:

Am Standort Struckum sieht die Entwicklung im Oberboden entlang der Probenahmeterminale etwas anders aus als in Barlt (Abb. 10). Bei der ersten Probenahme sind die Unterschiede nur tendenziell zu sehen. 12 Monate nach der Kalkung, ohne weitere Bodenbearbeitung, weisen die beiden 1,5-fachen Varianten erhöhte Luftkapazitäten, als auch nutzbare Feldkapazitäten auf im Vergleich zur Nullkalkvariante. Diese Unterschiede sind dann, 2 Jahre nach der Kalkung nur noch bei der 1,5-fachen Branttkalkvariante nennenswert.

Struckum	10 cm Tiefe	GPV (Vol.-%)	LK (Vol.-%)	nFK (Vol.-%)	TW (Vol.-%)	
	OK	47	7	5	35	7 Monate nach Kalkung
	KK-1	47	9	5	33	
	KK-1,5	48	9	6	33	
	BK-1	48	9	5	34	
	BK-1,5	47	10	7	30	
	OK	47	7	7	33	12 Monate nach Kalkung
	KK-1	48	9	8	31	
	KK-1,5	50	11	9	30	
	BK-1	47	8	9	30	
	BK-1,5	48	10	10	28	
	OK	49	13	5	31	26 Monate nach Kalkung
	KK-1	49	13	7	29	
	KK-1,5	50	14	7	29	
	BK-1	50	13	9	28	
	BK-1,5	50	15	10	25	

Abbildung 11 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Struckum in 10 cm Tiefe. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branttkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branttkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 12

In 30 cm Tiefe am Standort Struckum sind bei der ersten Probenahme lediglich bei den beiden 1,5-fachen Varianten nennenswerte Unterschiede zu erkennen. Dort sind die Luftkapazitäten leicht erhöht, die nutzbaren Feldkapazitäten jedoch im Vergleich zur Nullkalkvariante verdoppelt (Abb. 11). Bei der zweiten Probenahme nähern sich die

einzelnen Werte der Varianten an und es sind maximal leichte Trends zu sehen. Bei der letzten Probenahme, im Oktober 2018, nach dem extrem trockenen Sommer sind die Werte der Luftkapazität auf einem generell höheren Level, bei der nutzbaren Feldkapazität erreichen vor allem die Branntkalkvarianten signifikant höhere Werte im Vergleich zur Nullkalkvariante.

Struckum	30 cm Tiefe	GPV (Vol.-%)	LK (Vol.-%)	nFK (Vol.-%)	TW (Vol.-%)	
	OK	45	4	4	37	7 Monate nach Kalkung
	KK-1	46	5	4	37	
	KK-1,5	45	7	8	30	
	BK-1	44	6	5	33	
	BK-1,5	46	6	9	31	
	OK	46	5	6	35	12 Monate nach Kalkung
	KK-1	48	5	6	37	
	KK-1,5	47	6	7	34	
	BK-1	48	5	6	37	
	BK-1,5	47	8	8	31	
	OK	47	7	7	33	26 Monate nach Kalkung
	KK-1	49	7	9	33	
	KK-1,5	50	10	8	32	
	BK-1	48	8	10	30	
	BK-1,5	50	12	11	27	

Abbildung 12 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Struckum in 30 cm Tiefe. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 12

Porengrößenverteilung am Standort Cunnersdorf:

Am Standort Cunnersdorf sind die Unterschiede der Porengrößenverteilungen über die 3 untersuchten Varianten und die beiden Probenahmen in der Abbildung 13 dargestellt.

Bei der ersten Probenahme sind die Unterschiede in 10 cm Tiefe zwischen den Varianten gering, lediglich der Kohlensäure Kalk weist geringere Luftkapazitäten auf. Dieser Trend ist ebenfalls in 30 cm zu finden, dort hat der KK neben deutlich geringeren Luftkapazitäten (4 Vol.-%) auch ein geringeres GPV im Vergleich zu den anderen beiden Varianten. Bei

der zweiten Probenahme zeigt sich teilweise ein etwas umgekehrtes Bild, in 10 cm weist der KK die höchste Luftkapazität auf, bei der nFK hat der BK leicht erhöhte Werte. In 30 cm Tiefe ist der einzig signifikante Unterschied in der geringen Luftkapazität der BK Variante. Insgesamt sind die Werte entweder recht ähnlich, oder die abweichenden Werte folgen keinen klaren Trends.

	GPV (Vol.-%)	LK (Vol.-%)	nFK (Vol.-%)	TW (Vol.-%)	
OK	38	11	18	9	Probenahme 1, 10 cm
KK	36	8	19	9	
BK	40	11	20	9	
OK	38	10	18	10	Probenahme 1, 30 cm
KK	33	4	19	10	
BK	40	12	20	8	
OK	37	7	13	17	Probenahme 2, 10 cm
KK	40	10	14	16	
BK	37	7	17	13	
OK	41	10	13	18	Probenahme 2, 30 cm
KK	40	9	15	16	
BK	34	4	14	16	

Abbildung 13 Eigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes am Standort Cunnersdorf für beide Probenahmen und beide Tiefen. GPV ist das Gesamtporenvolumen, LK die Luftkapazität, nFK die nutzbare Feldkapazität und TW das Totwasser (nicht pflanzenverfügbares Wasser). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Brantkalk. n = 12

Wasserleitfähigkeit

Für die Standorte Barlt und Struckum sind die Ergebnisse der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) in den Abbildungen 14 und 15 für alle drei Probenahmeterminen dargestellt. Da die Messwerte bei der kf-Messung starken Schwankungen unterliegen sind die Werte in logarithmierter Form dargestellt. Zusätzlich sind die Werte in Tabellenform dargestellt, um eine weitere Übersichtlichkeit zu erreichen und die statistisch signifikanten Unterschiede deutlicher darstellen zu können.

Gesättigte Wasserleitfähigkeit am Standort Barlt:

Für den Standort Barlt (Abbildung 14 und Tabelle 7) ist in 10 cm zu erkennen, dass bei der ersten Probenahme die Werte insgesamt auf einem niedrigeren Niveau liegen als bei

den nächsten beiden Probenahmen. Die Kalkstufen erhöhen, im Vergleich zur OK Variante die Werte deutlich, wobei die BK-1,5 Variante die höchsten Werte, der Stufen hoch und sehr hoch, erreicht. Die Werte von der letzten Probenahme, im August 2018, zeigen durchweg Werte, die sich im sehr hohen (OK) oder sogar extrem hohem Bereich (alle Kalkvarianten) befinden. Hier weisen die Branntkalkvarianten höhere Werte auf als der Kohlensäure Kalk wobei die 1,5-fachen Mengen die höchsten Messwerte ergaben. In 30 cm Tiefe sind die Werte der ersten Probenahme mit Ausnahme der BK-1,5 Varianten im sehr geringen Bereich angesiedelt. Bei der zweiten Probenahme weisen nur die beiden 1,5-fachen Varianten höhere Werte auf als die Referenz, während bei der letzten Probenahme die KK-1 und BK-1,5 Varianten die höchsten Werte erreichen.

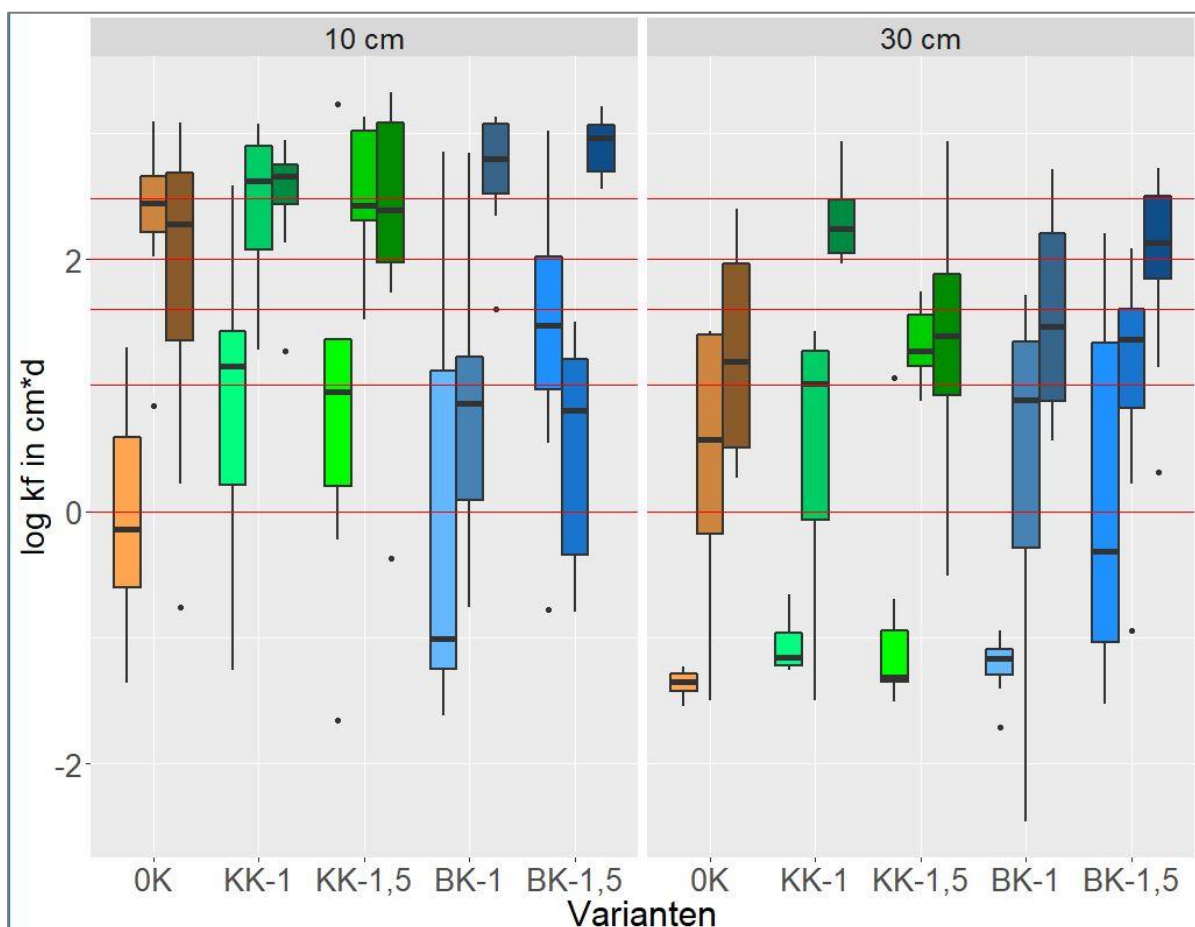


Abbildung 14 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten am Standort Barlt in den Tiefen 10 und 30 cm und für drei verschiedene Probenahmeterminen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung), repräsentiert durch die dunkler werdenden Boxplots einer Farbe/Variante. Die roten Linien entsprechen den Grenzwerten der Einstufung nach KA5 (von unten aufsteigend: 1, 10, 40, 100, 300 cm/d). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensäurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensäurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 8

Tabelle 10 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten (geometrischer Mittelwert in cm/d) für den Standort Barlt für die beiden Tiefen 10 und 30 cm und die 3 Probenahmeterminen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Unterschiedliche kleine Buchstaben bei den Messwerten stehen für signifikante Unterschiede mit einem $p < 0,05$ (die statistische Bewertung umfasst jeweils eine Tiefe und einen Probenahmetermin. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 8$

Variante	Tiefe (cm)	7 M.n.K.	12 M.n.K.	24 M.n.K.
OK	10	3	a 399	a 326
KK-1	10	58	b 489	a 427
KK-1,5	10	220	c 555	a 648
BK-1	10	169	b 94	a 705
BK-1,5	10	239	c 10	a 887
OK	30	0,1	a 11	a 64
KK-1	30	0,1	a 11	a 271
KK-1,5	30	1	a 26	b 144
BK-1	30	0,1	a 15	a 117
BK-1,5	30	31	b 33	b 244

Gesättigte Wasserleitfähigkeit am Standort Struckum:

Am Standort Struckum (Abbildung 15 und Tabelle 8) sind vor allem in 10 cm Tiefe extreme Schwankungen der Messwerte zu beobachten. 7 Monate nach der Kalkung weisen bereits alle Kalkstufen, mit Ausnahme der KK-1,5 Variante, erhöhte zum Teil erhöhte Messwerte auf, die in den Klassen sehr hoch, hoch und mittel liegen, welche von der Referenz nicht erreicht werden. Bei der 2. und 3. Probenahme liegen sämtliche Werte, auch die der OK Variante auf einem gesamthöheren Niveau. Es sind aber zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Varianten zu beobachten, die beiden BK Varianten weisen immer die höchsten Messwerte auf. In 30 cm Tiefe bei der ersten Probenahme liegen die Werte der Referenz und der beiden KK Varianten im hauptsächlich sehr geringen und geringen Bereich, während die BK Varianten im geringen und mittleren Bereich liegen. Ähnlich wie in 10 cm Tiefe liegen die Werte aller Varianten der Sommerbeprobungen in 30 cm Tiefe insgesamt höher. Ebenfalls

vergleichbar zum Oberboden sind hier die Trends, dass vor allem die Branntkalkvarianten die Wasserleitfähigkeit am deutlichsten erhöhen.

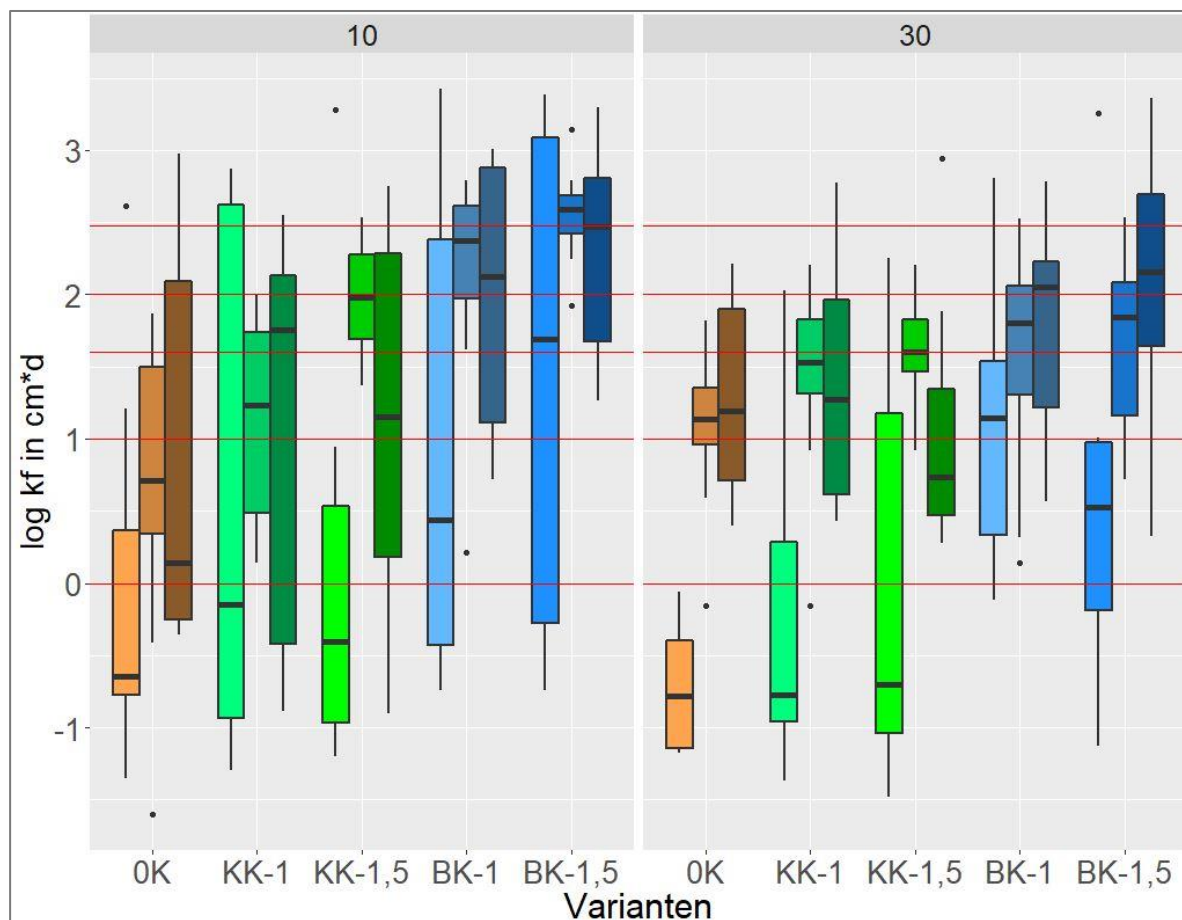


Abbildung 15 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten am Standort Struckum in den Tiefen 10 und 30 cm und für drei verschiedene Probenahmeterminen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung), repräsentiert durch die dunkler werdenden Boxplots einer Farbe/Variante. Die roten Linien entsprechen den Grenzwerten der Einstufung nach KA5 (von unten aufsteigend: 1, 10, 40, 100, 300 cm/d). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 8$

Tabelle 11 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten (geometrischer Mittelwert in cm/d) für den Standort Struckum für die beiden Tiefen 10 und 30 cm und die 3 Probenahmeterminen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Unterschiedliche kleine Buchstaben bei den Messwerten stehen für signifikante Unterschiede mit einem $p < 0,05$ (die statistische Bewertung umfasst jeweils eine Tiefe und einen Probenahmetermin). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 8$

Variante	Tiefe (cm)	7 M.n.K.	12 M.n.K.	26 M.n.K.
OK	10	53 a	21 a	141 a

KK-1	10	225	b	35	a	88	a
KK-1,5	10	240	b	139	b	120	a
BK-1	10	671	c	263	b	364	b
BK-1,5	10	815	c	476	c	544	b
OK	30	0,3	a	20	a	47	a
KK-1	30	14	a	50	a	105	a
KK-1,5	30	40	a	55	a	123	a
BK-1	30	97	b	98	b	168	b
BK-1,5	30	228	b	117	b	525	c

Gesättigte Wasserleitfähigkeit am Standort Cunnersdorf:

Am Standort Cunnersdorf wurden an 2 verschiedenen Zeitpunkten Proben entnommen, die Ergebnisse sind in Abbildung 16 und Tabelle 9 dargestellt. Die Ergebnisse der Messungen sind recht uneinheitlich, in 10 cm Tiefe sind die Varianten nah beieinander, während in 30 cm Tiefe die Werte uneinheitlich zwischen den Varianten streuen.

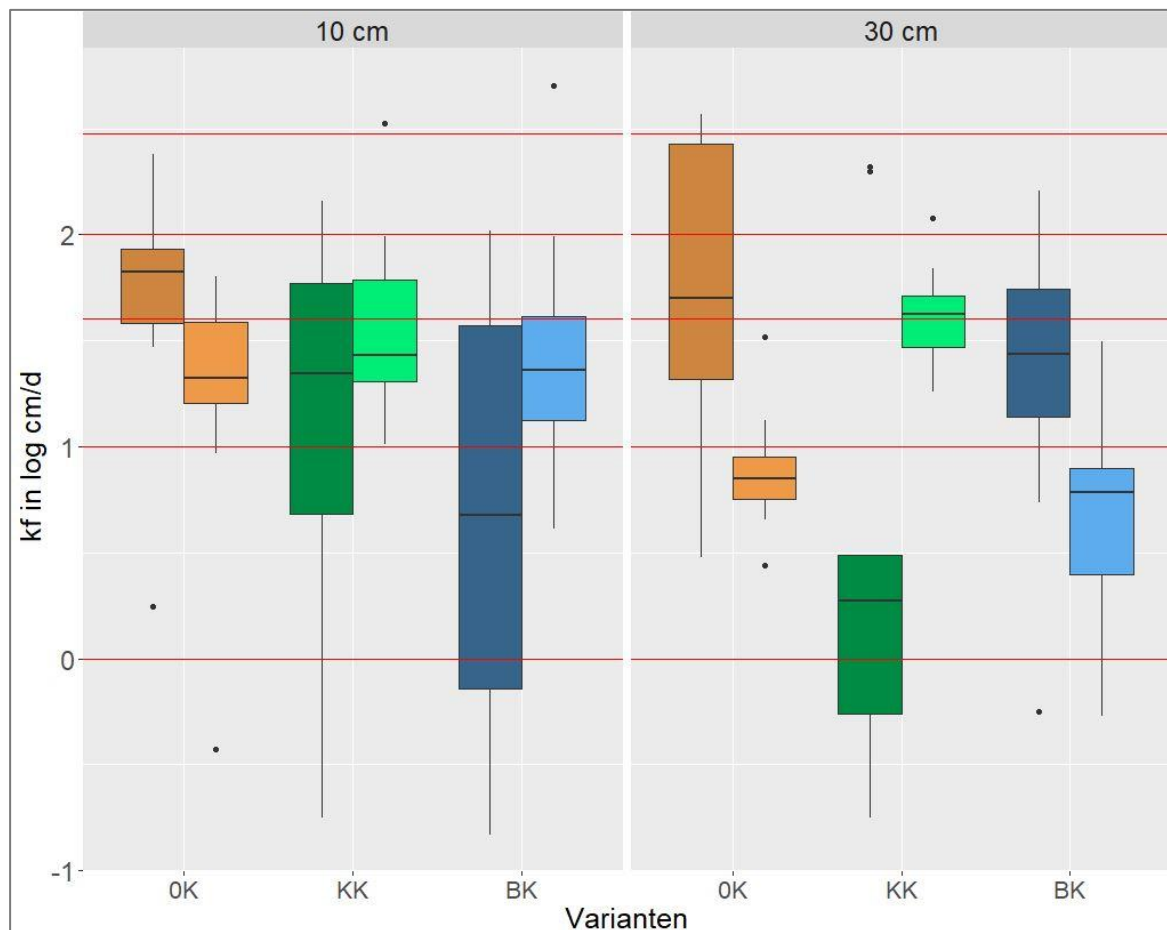


Abbildung 16 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten am Standort Cunnersdorf in den Tiefen 10 und 30 cm und für 2 verschiedene Probenahmeterminen 18 Monate (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung). Die roten Linien entsprechen den Grenzwerten der Einstufung nach KA5 (von unten aufsteigend: 1, 10, 40, 100, 300 cm/d). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensäurer Kalk, BK = Branntkalk. $n = 8$

Tabelle 12 Gesättigte Wasserleitfähigkeiten (geometrischer Mittelwert in cm/d) für den Standort Cunnersdorf für die beiden Tiefen 10 und 30 cm und die 2 Probenahmeterminen (18 und 23 Monate nach letzter Kalkung). Unterschiedliche kleine Buchstaben bei den Messwerten stehen für signifikante Unterschiede mit einem $p < 0,05$ (die statistische Bewertung umfasst jeweils eine Tiefe und einen Probenahmetermin. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensäurer Kalk, BK = Branntkalk. $n = 8$

Variante	Tiefe (cm)	18 M.n.K.	23 M.n.K.
OK	10	82	a 27
KK	10	43	a 66
BK	10	25	a 76
OK	30	134	b 9
KK	30	41	a 47
BK	30	46	a 9

Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u)

Die Werte aus den Messungen der ungesättigten Wasserleitfähigkeit werden mit dem Modellierungsprogramm RETC über den gesamten Entwässerungsverlauf und damit über den eigenen Messbereich hinausgehend modelliert (nahgesättigter Bereich bis etwa -10 hPa und Bereich ab etwa -700 hPa) dargestellt werden können. Die Kurven sind jeweils pro Tiefe und Beprobungszeitraum für einen Standort in einer Graphik dargestellt. Für die Standorte Barlt und Struckum sind zusätzlich noch für die einzelnen Varianten die Entwicklung über die Zeit in einer separaten Graphik abgebildet. Die restlichen Abbildungen sind im Anhang zusammengefasst (Abbildungen 35-64), genauso wie Tabellen (Tabellen 15-20) mit den jeweiligen Parametern zur Bestimmung der Kurven (α , n , m und k_f).

Für den Standort Barlt ist in Abbildung 17 das Ergebnis aus 10 cm Tiefe, 7 Monate nach der Kalkung dargestellt. Die ungekalkte Variante weist im kompletten Verlauf der Messung die geringsten Wasserleitfähigkeiten auf. Hier zeigen die beiden Branntkalk Varianten höhere Werte auf als der kohlensaure Kalk und die 1,5-fache Menge jeweils höhere Werte als die 1-fachen Varianten.

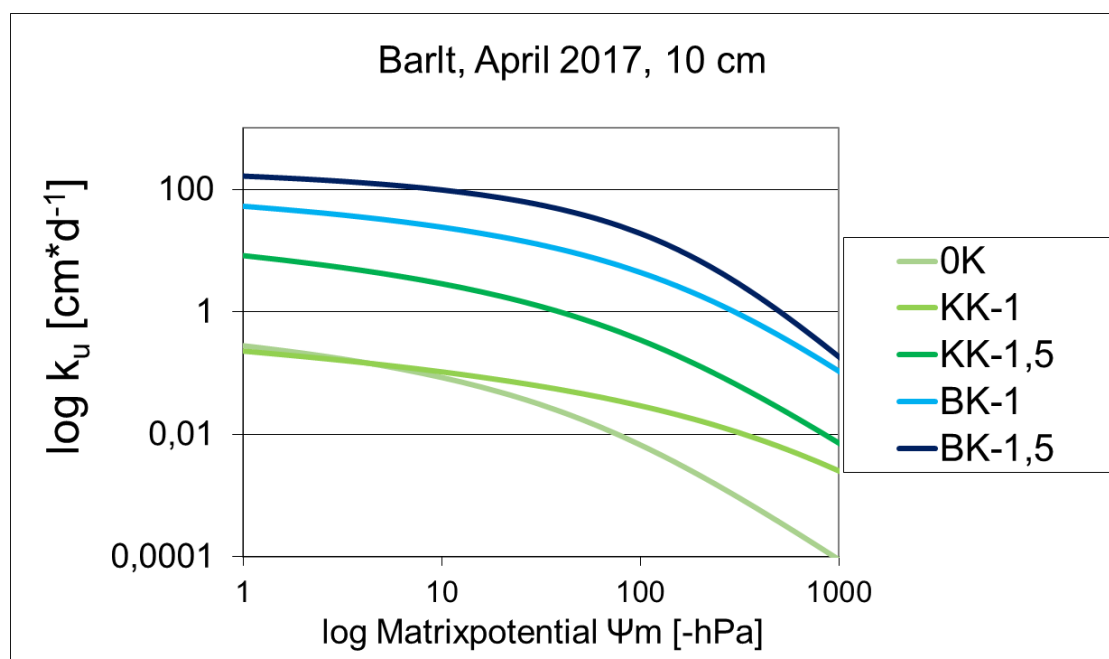


Abbildung 17 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u in $\text{cm} \cdot \text{d}$) für den Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung. Die Varianten sind: 0K = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den

jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4

Bei der zweiten Probenahme sind die Werte der jeweiligen Varianten sehr ähnlich, bei der dritten Probenahme weisen erneut die beiden Branntkalk Varianten die höchsten Wasserleitfähigkeiten auf. In 30 cm Tiefe sind bei der ersten Probenahme keine Unterschiede auszumachen, bei der zweiten Probenahme zeigen die beiden 1,5-fachen Varianten erhöhte Wasserleitfähigkeiten. 2 Jahre nach der Kalkung bei der dritten Probenahme sind die beiden Branntkalk Varianten sowie die KK-1 Variante auf einem höheren Niveau als OK und KK-1,5.

Für den Standort Struckum sind in Abbildung 18 die Ergebnisse aus 10 cm Tiefe, von der dritten Probenahme, 26 Monate nach der Kalkung gezeigt. Man erkennt, dass die Kurven Branntkalk Varianten über den restlichen 3 Varianten verlaufen, und über den gesamten Entwässerungsverlauf höhere Wasserleitfähigkeiten aufweisen. Die Ergebnisse der ersten Probenahme zeigen in 10 cm Tiefe noch keine Unterschiede zwischen den Varianten, bei der zweiten Probenahme erkennt man, dass OK und KK-1 auf einem ähnlichen Niveau liegen, während die BK Varianten über den gesamten Verlauf höhere Wasserleitfähigkeiten liefern und KK-1,5 im feuchteren Bereich der Entwässerung höhere Werte aufweist. In 30 cm Tiefe sind bei der ersten Probenahme bereits Unterschiede zu sehen, beide BK Varianten und KK-1,5 liegen über OK und KK-1. Der Trend mit den höheren Werten bei den Branntkalkvarianten zieht sich in 30 cm Tiefe bei allen Probenahmen durch.

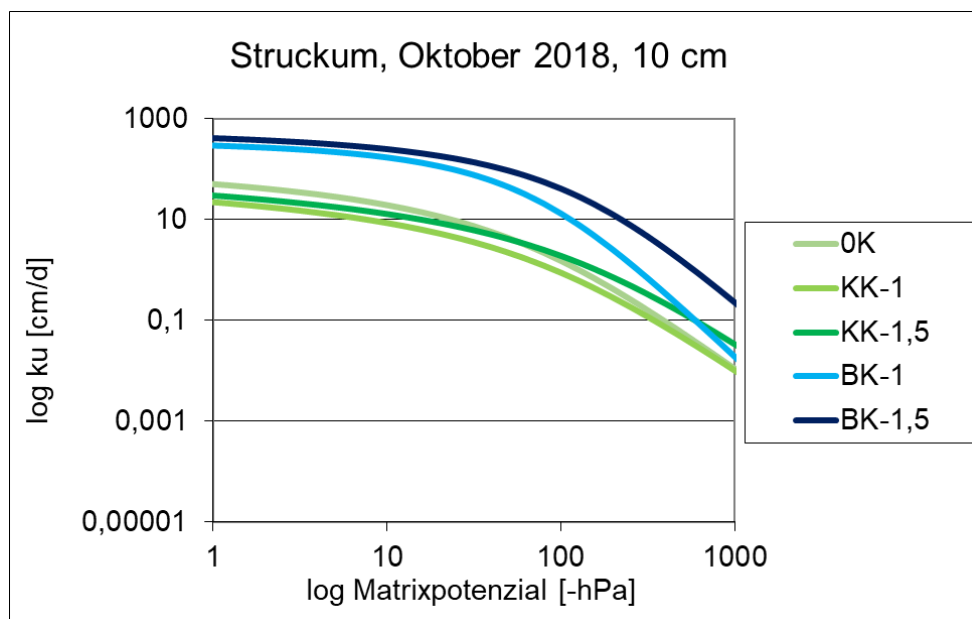


Abbildung 18 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u in $\text{cm} \cdot \text{d}$) für den Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 26 Monate nach Kalkung. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Brannkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Brannkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 4$

Am Standort Cunnersdorf zeigt sich nur einmal in 30 cm Tiefe, bei der Probenahme im April 2016 (18 Monate nach letzter Kalkung), dass die Kalkvarianten erhöhte Wasserleitfähigkeiten aufweisen im Vergleich zur ungekalkten Referenz (Abbildung 19).

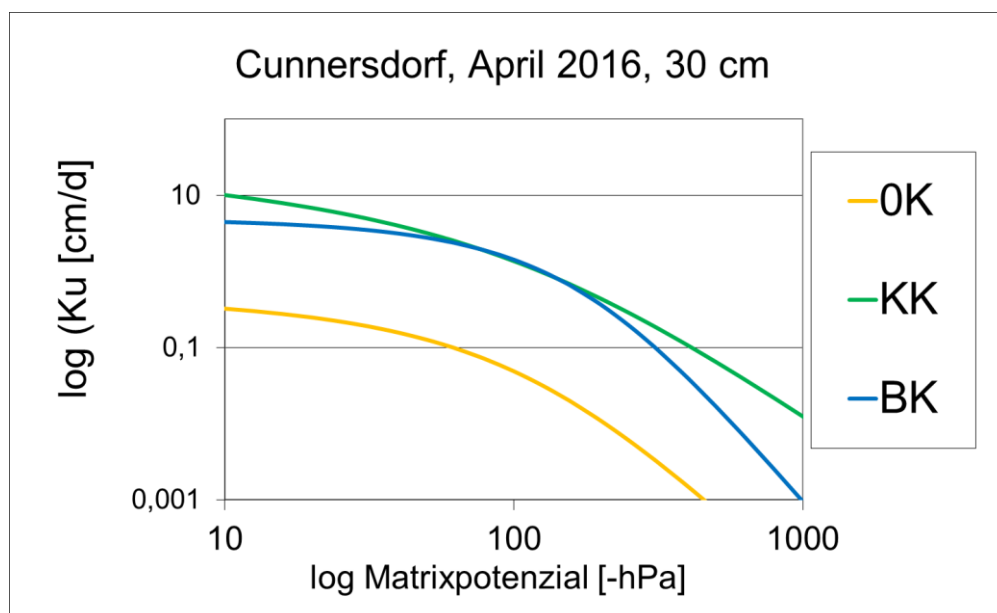


Abbildung 19 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u in $\text{cm} \cdot \text{d}$) für den Standort Cunnersdorf in 30 cm Tiefe, 18 Monate nach letzter Kalkung. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensaurer Kalk, BK = Brannkalk.

Diffusion und Porenindizes:

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen der relativen Sauerstoffdiffusionskoeffizienten (D_s/D_0) dargestellt. Zusätzlich werden die an denselben Proben bestimmten Porenindizes gezeigt.

Diffusion und Porenindizes am Standort Barlt:

Bei den Ergebnissen der Diffusionsmessungen ergibt sich häufig das Bild, dass beide Branntkalkvarianten sowie die KK-1,5 Variante höhere Werte als die Nullkalk und die KK-1 Variante aufweisen (Abbildung 20). Am Standort Barlt sind bei ersten Probenahme, 7 Monate nach der Kalkung, die Unterschiede sowohl in 10, als auch in 30 cm Tiefe zwischen den Varianten noch sehr gering. Bei den nächsten beiden Probenahmeterminen im August 2017/2018 waren die Werte grundsätzlich höher und es traten deutlichere Unterschiede zwischen den Varianten auf. In 30 cm Tiefe steigen die Werte erst bei der letzten Probenahme (August 2018, 24 Monate nach Kalkung) an, erst dann sind auch signifikante Unterschiede zwischen den Varianten auszumachen.

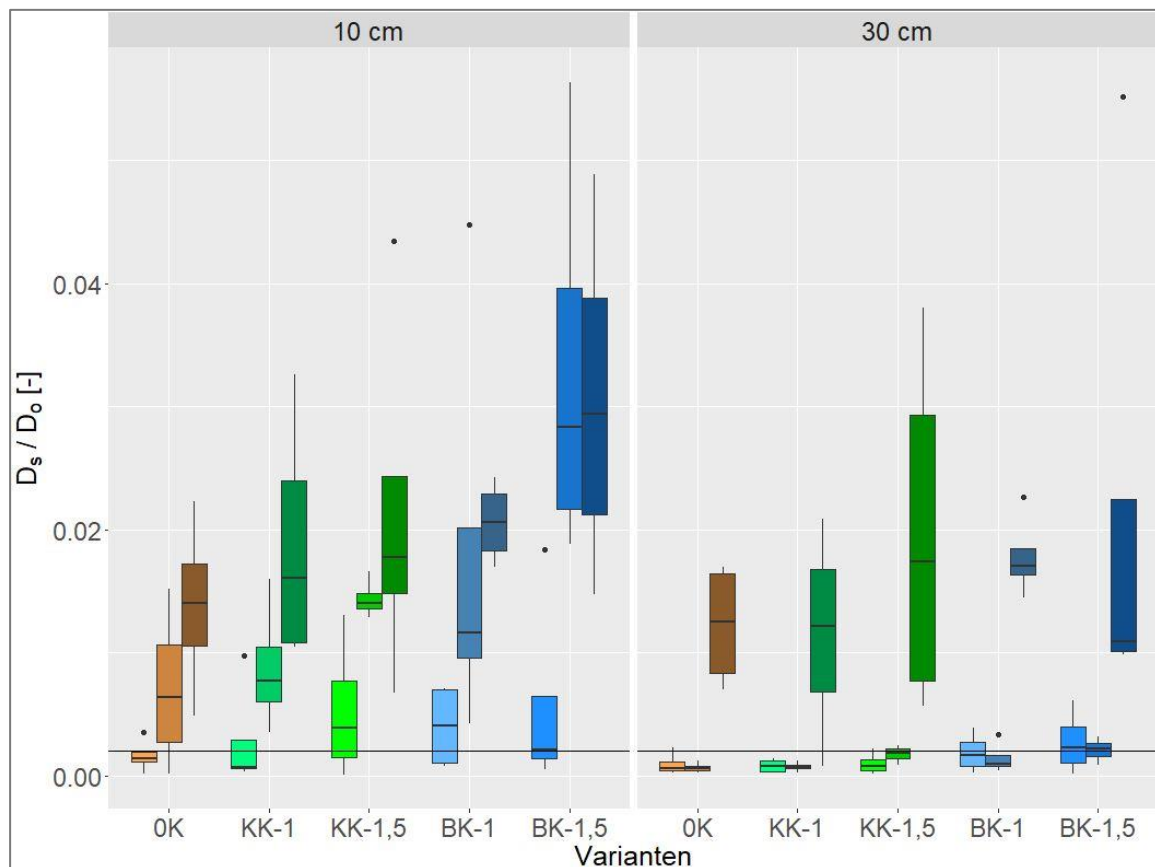


Abbildung 20 Relativer Sauerstoffdiffusionskoeffizient ($D_s/D_o [-]$), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen. Die horizontale schwarze Linie steht für einen Wert von 0,002 welcher aus pflanzenbaulicher Sicht ein kritisches Minimum darstellt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 4$

Die Werte der Tortuositätsindices und C_1 -Indices korrespondieren gut mit den Werten der Diffusivität. Man erkennt tendenziell geringere Tortuositätswerte bei den Branntkalkvarianten, sowie bei der KK-1,5 Variante (Abbildung 18) im Vergleich zu den OK und KK-1 Varianten.

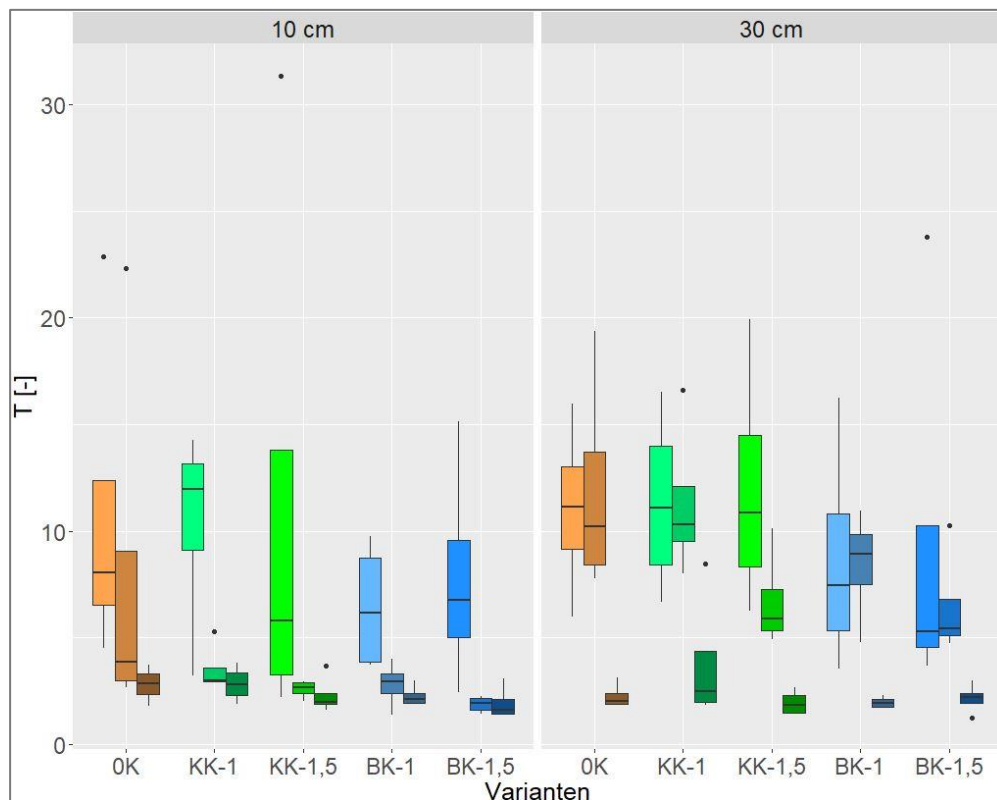


Abbildung 21 Tortuositätsindices ($T [-]$), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine; Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n=4$.

Parallel dazu sind bei den C_1 -Indices in Barlt steigende Werte mit den Kalkbehandlungen zu beobachten, die KK-1 Variante liefert als einzige der Kalkvarianten keine Unterschiede im Vergleich zur Nullkalk-Referenz (Abbildung 19).

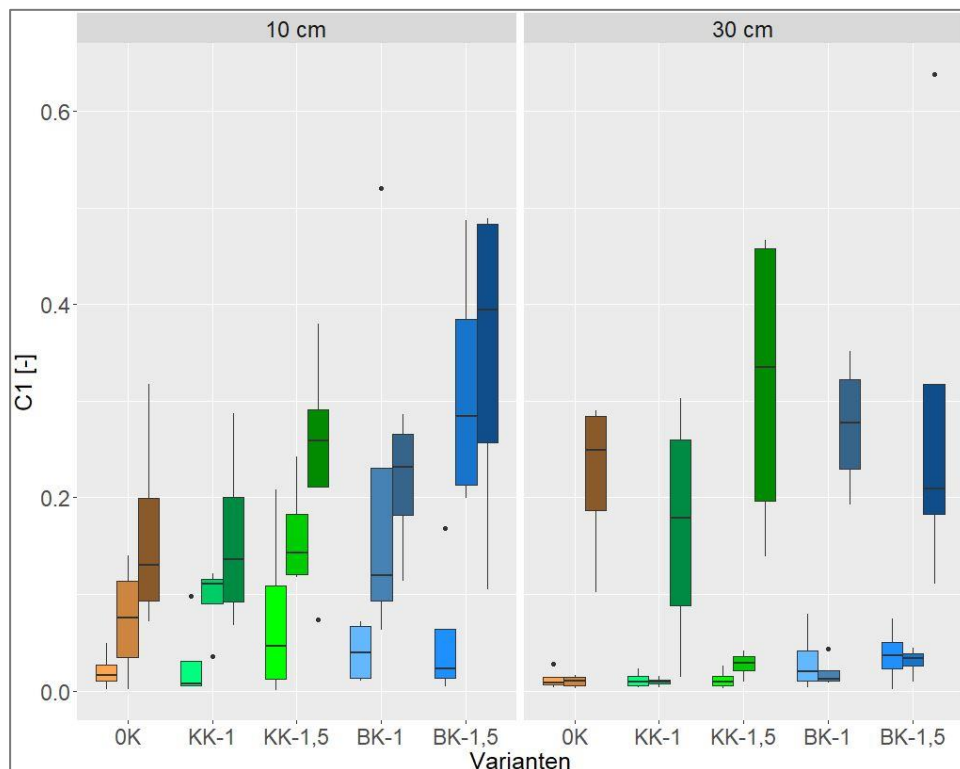


Abbildung 22 C_1 Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Brannnkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Brannnkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n=4$.

Die Indikatoren für unterschiedliche Porenkontinuitäten und Unterschiede in den Porengrößenverteilungen, die C_2 und C_3 Indices, zeigen vor allem in 10 cm Tiefe ebenfalls klare Einflüsse der BK Varianten und der KK-1,5 Variante. Die Graphiken befinden sich im Anhang (Abbildungen 65-67).

Diffusion und Porenindizes am Standort Struckum:

Am Standort Struckum sind bei der ersten Probenahme bereits in 10 cm Tiefe Unterschiede zwischen den Kalkvarianten festzustellen, während es in 30 cm Tiefe ähnlich wie in Barlt bis zur letzten Probenahme dauert, bis Unterschiede auftreten (Abbildung 18). Zwischen den Varianten ist ein ähnlicher Trend zu erkennen wie am Standort Barlt, die Brannnkalk Varianten und der Kohlensaure Kalk-1,5 weisen signifikant höhere Gasaustauschraten auf als die Nullkalkvariante und der Kohlensaure Kalk nach LUFA Menge.

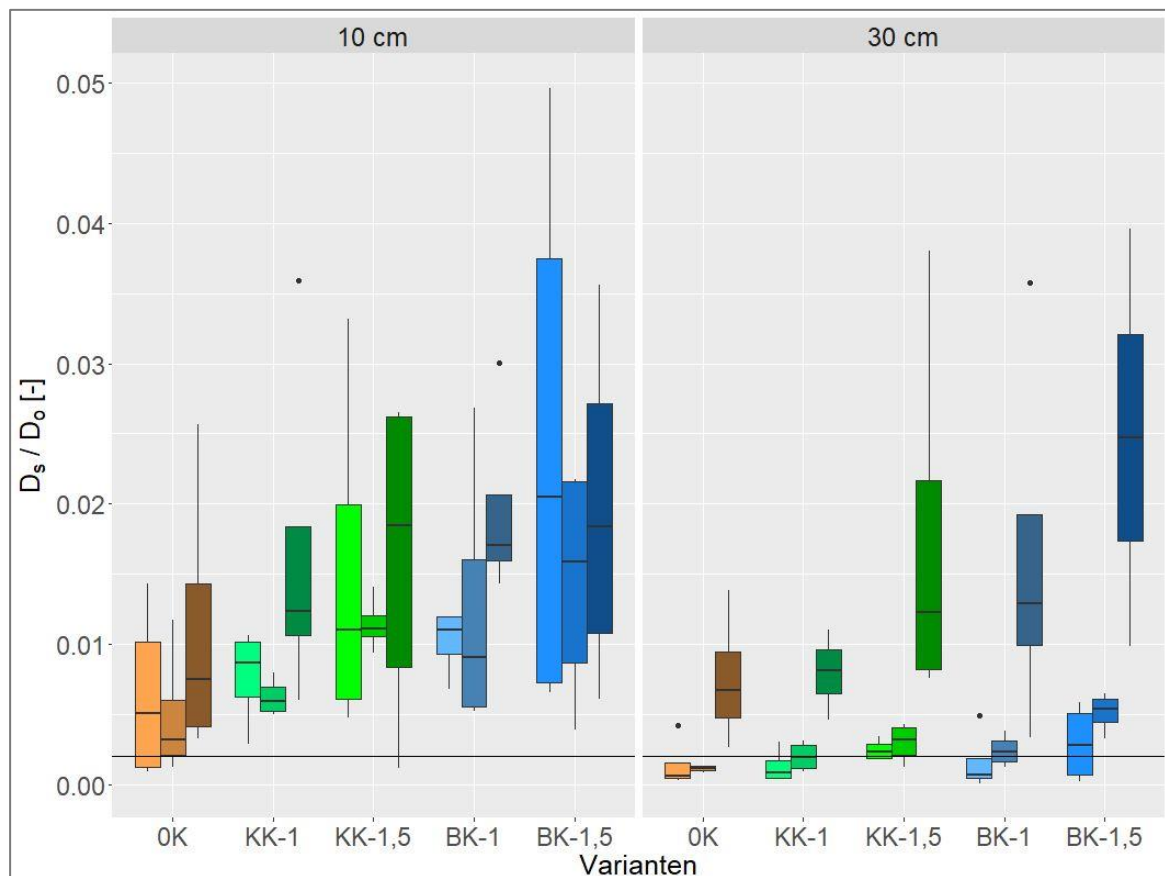


Abbildung 23 Relativer Sauerstoffdiffusionskoeffizient (D_s/D_o [-]), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine. Die horizontale schwarze Linie steht für einen Wert von 0,002, welcher aus pflanzenbaulicher Sicht ein kritisches Minimum darstellt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 4$

Bei Betrachtung der Tortuositätsindizes am Standort Struckum sind in 10 cm Tiefe sehr geringe Werte im Vergleich zu 30 cm zu beobachten und auch die Unterschiede zwischen den Varianten sind gering. Es lässt sich ein leicht abnehmender Trend beobachten, nach dem die BK-Varianten die geringsten Tortuositäten aufweisen. In 30 cm Tiefe sind die Werte der ersten beiden Probenahmen auf einem höheren Niveau, hier sind die beiden 1,5-fachen Mengen der beiden Kalkformen die Varianten mit den niedrigsten Werten (Abbildung 21).

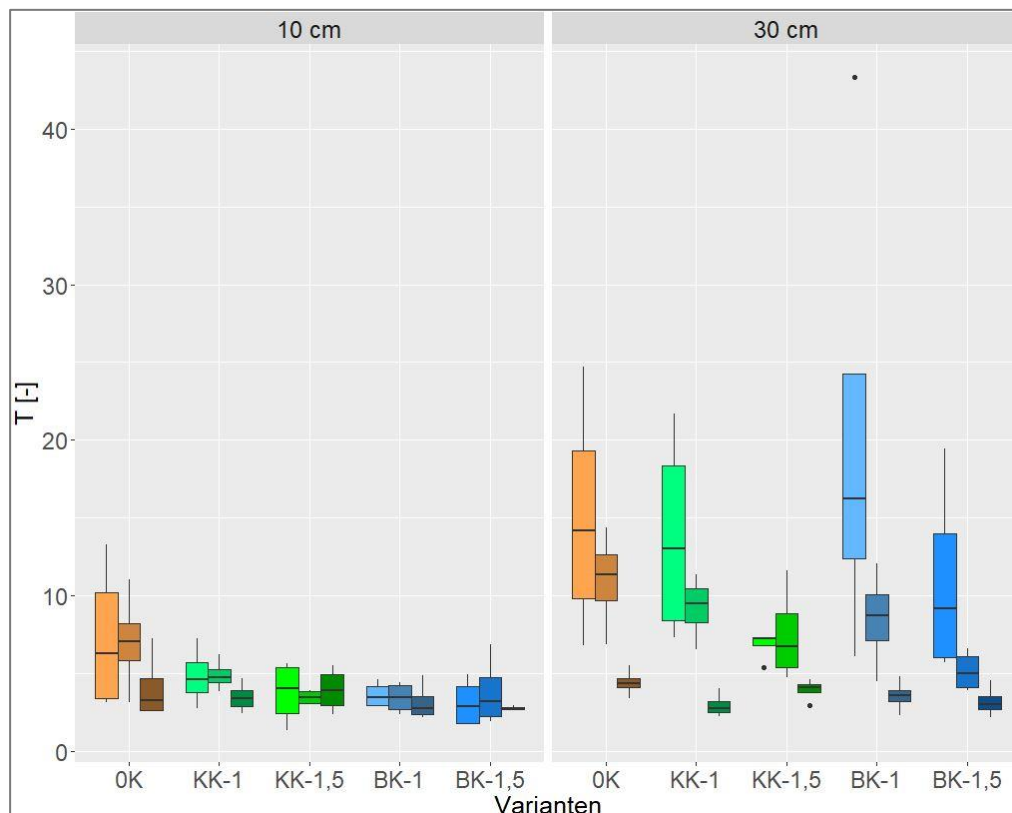


Abbildung 24 Tortuositätsindices ($T [-]$), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine; Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n=4$.

Die C_1 -Indices verlaufen in Struckum in 10 cm Tiefe umgekehrt zu den T-Indices, da hier deutlichere Unterschiede zwischen den Varianten auszumachen sind, während in 30 cm Tiefe die Werte auf niedrigerem Niveau liegen und sich kaum unterscheiden. In 10 cm Tiefe sind hauptsächlich die Branntkalk Varianten und eingeschränkt die KK-1,5 Variante auf höherem Niveau im Vergleich zur Referenz (Abbildung 22).

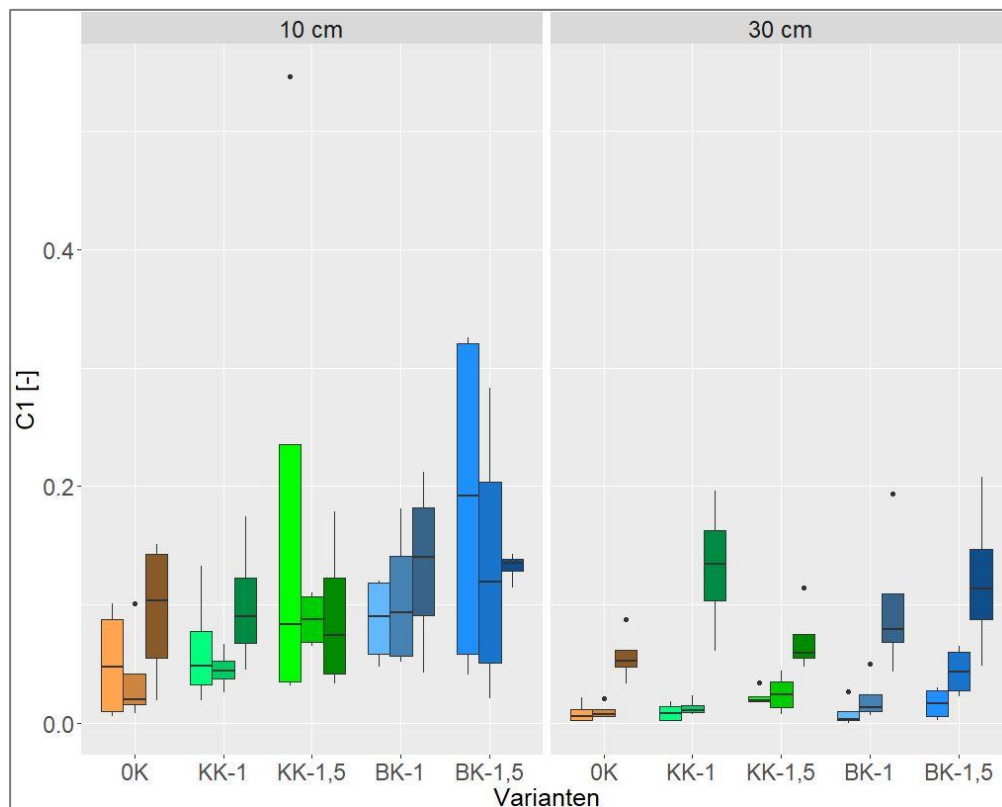


Abbildung 25 C_1 Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine; Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n=4$.

Die Abbildungen der C_2 und C_3 Indices befinden sich im Anhang, für den Standort Struckum konnten hierbei keine Unterschiede zwischen Varianten ausgemacht werden (Abbildungen 68-70).

Diffusion und Porenindizes am Standort Cunnersdorf:

Die Diffusionskoeffizienten am Standort Cunnersdorf zeigen keine einheitlichen Trends zwischen den Varianten (Abbildung 19). Bei der ersten Probenahme weist in 10 cm Tiefe der Kohlensäure Kalk erhöhte Werte auf, der Branntkalk hingegen tendenziell eher geringere Werte als die Nullkalkreferenz. Bei der zweiten Probenahme sind, genau wie in 30 cm Tiefe keine Unterschiede zwischen den Behandlungen auszumachen.

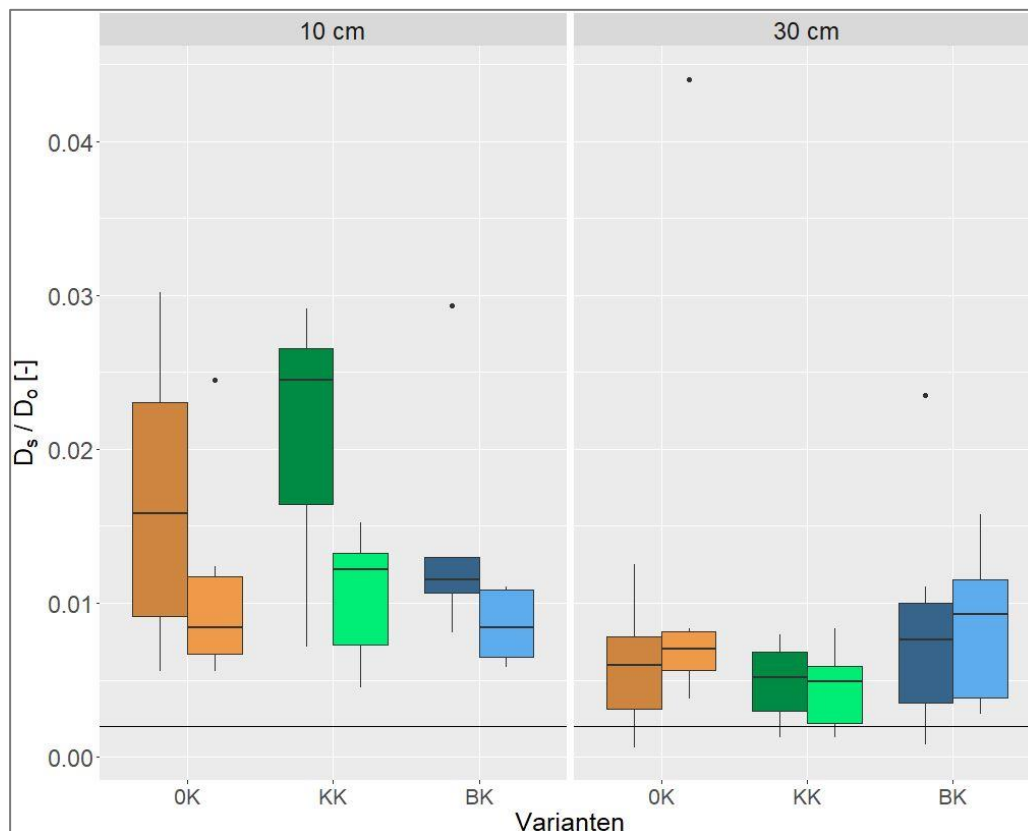


Abbildung 26 Relativer Sauerstoffdiffusionskoeffizient (D_s/D_o [-]), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung. Die horizontale schwarze Linie steht für einen Wert von 0,002 welcher aus pflanzenbaulicher Sicht ein kritisches Minimum darstellt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensäurer Kalk, BK = Branntkalk. $n = 4$

Werte für die Tortuositätsindices, sowie C_1 , C_2 und C_3 Indices ergeben zusätzlich keine Unterschiede zwischen den Varianten. Die Graphiken befinden sich im Anhang (Abbildungen 71-74).

Oberflächeneigenschaften

Im folgenden Kapitel werden Ergebnisse aus 3 verschiedenen Methoden vorgestellt, welche thematisch eng verknüpft sind, da es um Benetzungshemmung und Infiltrationsfähigkeiten geht, Prozesse die einander wechselwirkend beeinflussen. Bei der Sorptivität wird an ungestörten Stechzylinderproben die Infiltrationsfähigkeit und – Schnelligkeit mittels des Repellency-Indices bestimmt, während die beiden Kontaktwinkel Methoden direkte Benetzungswinkel liefern und damit Aussagen über mögliche Benetzungshemmungen.

Sorptivität

Die Werte für die Repellency Indices am Standort Barlt zeigen vor allem in 10 cm Tiefe zum Teil deutliche Unterschiede zwischen Varianten (Abbildung 20). So sind bei der ersten Probenahme die Werte für OK und die beiden KK Varianten sehr ähnlich, während beide BK Varianten bereits niedrigere Werte aufweisen. Bei der zweiten Probenahme nehmen zusätzlich zu den BK Varianten, die Werte der KK-1,5 Variante im Vergleich zu OK und KK-1 ab, ein Trend der sich auch bei der dritten Probenahme bestätigt. Der Branntkalk in der 1,5-fachen Menge ist die einzige Variante welche den kritischen Grenzwert von 1,95 (Hallett, 2003) dauerhaft unterschreitet. In 30 cm Tiefe sind die Effekte insgesamt etwas schwächer, die Verhältnisse zwischen den Varianten sind ähnlich wie in 10 cm. So sind die OK und die KK-1 Varianten auf gleich hohem Niveau, während der KK-1,5 und die beiden BK Varianten leicht geringere Werte aufweisen.

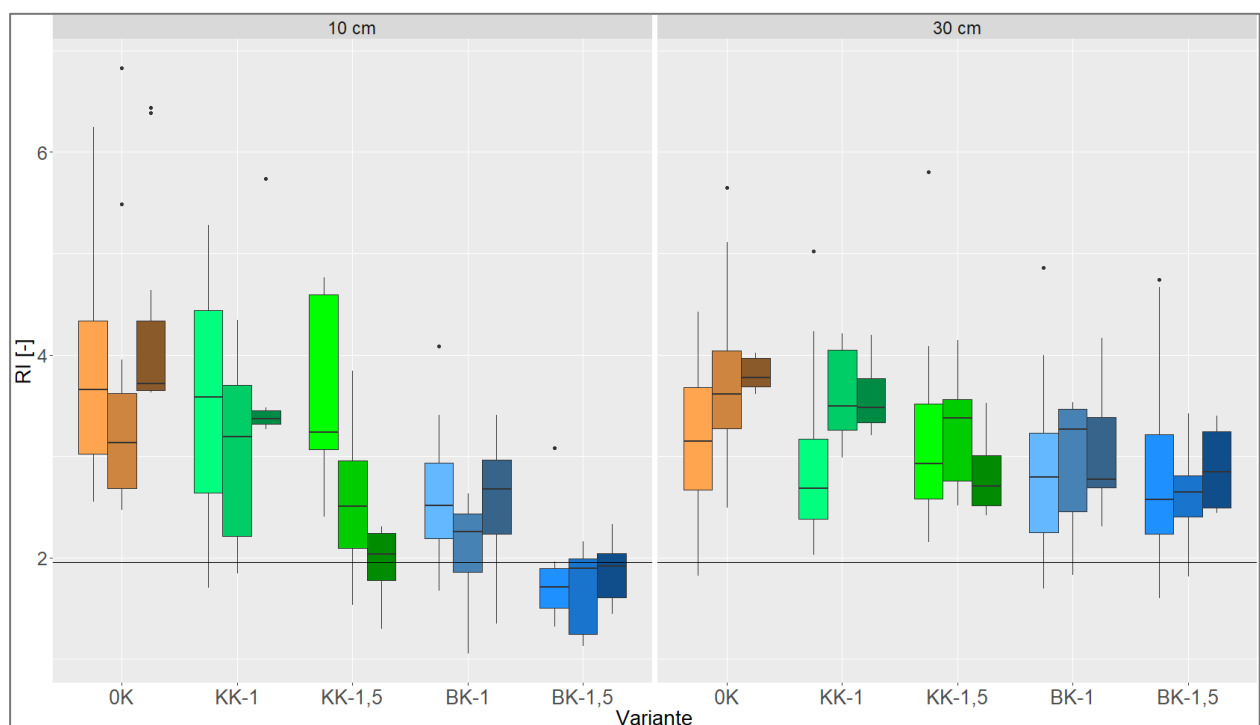


Abbildung 27 Repellency Indices am Standort Barlt (RI, dimensionslos, gemessen bei $\Psi_m = -60$ hPa) für die Tiefen 10 und 30 cm. Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei einem Wert von 1,95 der nach einigen Literaturquellen als kritischer Grenzwert fungiert, oberhalb dessen Benetzungshemmung auftritt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 12$

Für den Standort Struckum ist bei der ersten Probenahme zu erkennen, dass OK und KK-1 auf einem Niveau liegen und die weiteren 3 Varianten niedrigere Werte aufweisen,

wobei BK-1,5 unter den kritischen Grenzwert von 1,95 fällt (Abbildung 28). Bei der zweiten Probenahme liegt auch KK-1 schon leicht unter der Referenz, hier sind die Unterschiede zwischen den Varianten am geringsten. Bei der dritten Probenahme sind die Werte am höchsten, insbesondere für OK und KK-1 werden zum Teil sehr hohe Werte im hohen einstelligen Bereich erreicht. Vor allem KK-1,5 und die beiden BK Variante liegen hier deutlich unter der Referenz. In 30 cm Tiefe ist, ähnlich wie in Barlt, zu sehen, dass die Unterschiede zwischen den Varianten geringer werden, die OK Variante weist durchgehend die höchsten Werte auf. Die KK-1 Variante liegt bei der ersten Probenahme noch auf gleichem Niveau, bei der zweiten und dritten Probenahme liegen die Werte jedoch unter denen der OK. Die beiden 1,5-fachen Mengenvarianten zeigen bei der dritten Probenahme die geringsten Werte, die einzigen unter 1,95 auf.

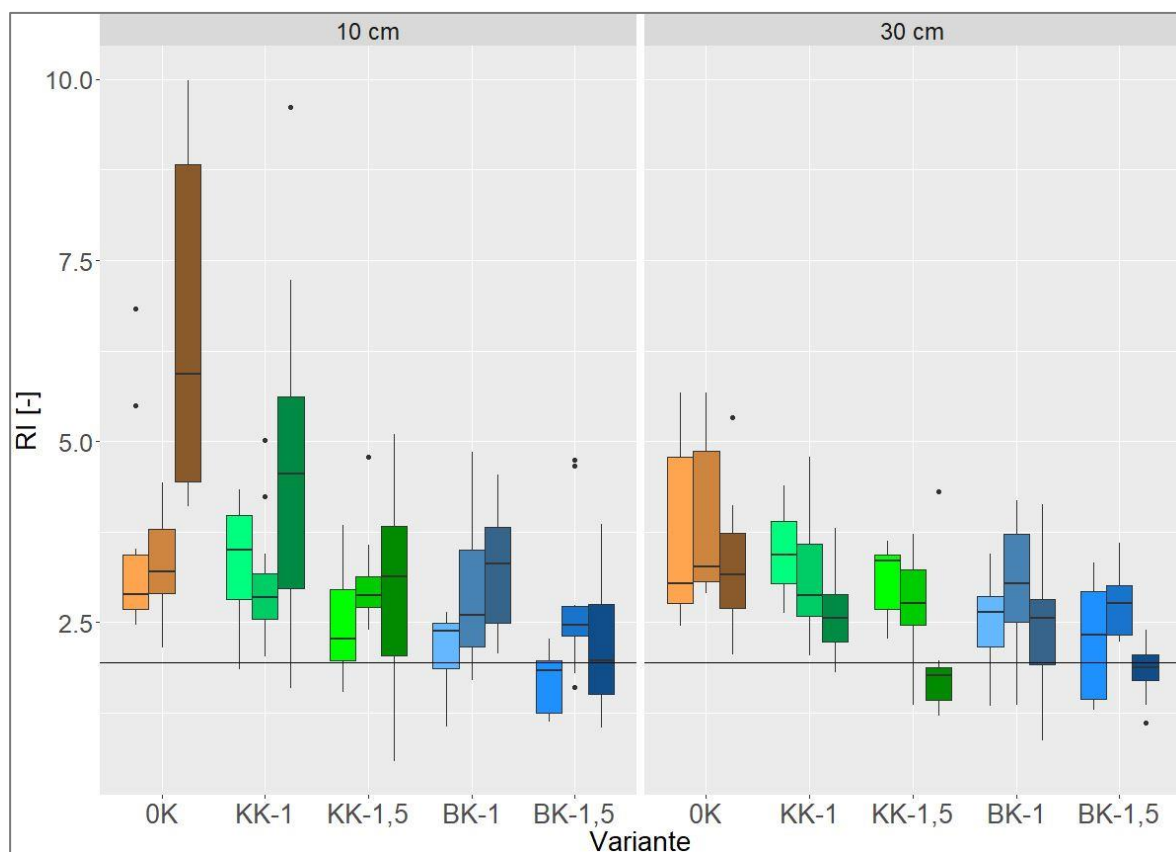


Abbildung 28 Repellency Indices am Standort Struckum (RI, dimensionslos, gemessen bei $\Psi_m = -60$ hPa) für die Tiefen 10 und 30 cm. Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei einem Wert von 1,95 der nach einigen Literaturquellen als kritischer Grenzwert fungiert, oberhalb dessen Benetzungshemmung auftritt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 12$

In Cunnersdorf wurde lediglich an den Proben der Probenahme im August 2016, 23 Monate nach letzter Kalkung) die Sorptivität und damit die Repellency Indices bestimmt (Abbildung 29). In 10 cm sind beide Kalkformen in der Lage, die Werte im Vergleich zur Nullkalkreferenz zu verringern, während in 30 cm Tiefe keine Unterschiede auszumachen sind.

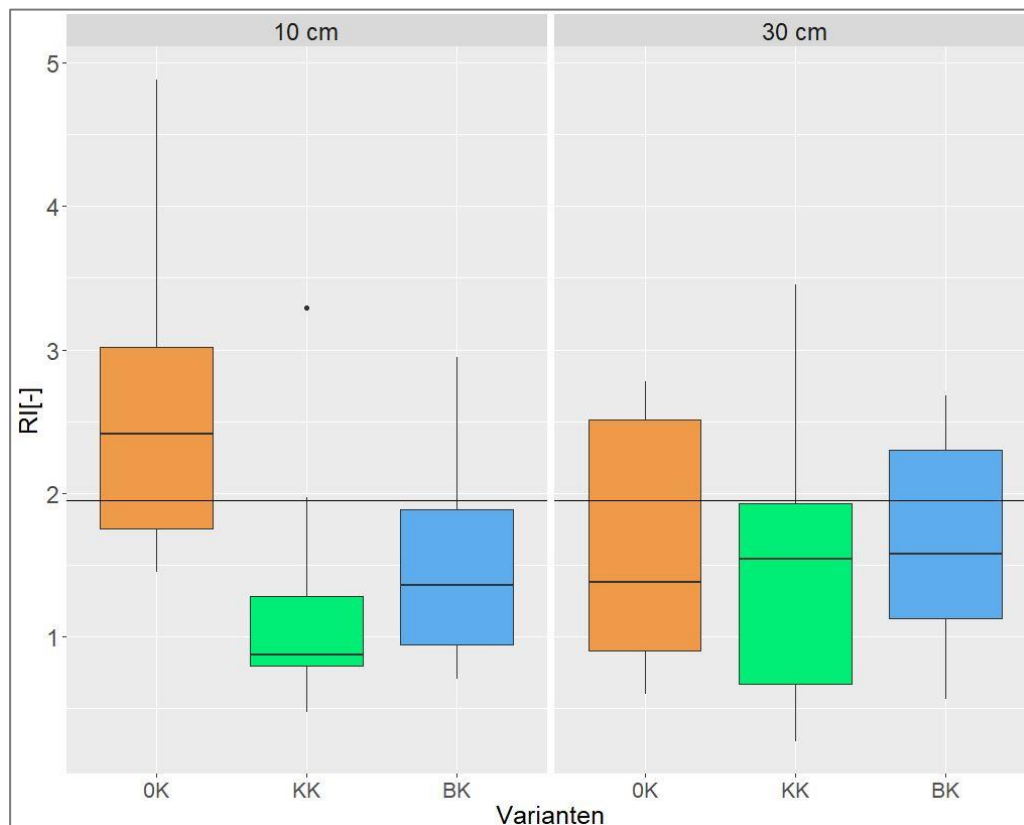


Abbildung 29 Repellency Indices am Standort Cunnersdorf (RI, dimensionslos, gemessen bei $\Psi_m = -60$ hPa) für die Tiefen 10 und 30 cm, 23 Monate nach letzter Kalkung. Die schwarze horizontale Linie verläuft bei einem Wert von 1,95 der nach einigen Literaturquellen als kritischer Grenzwert fungiert, oberhalb dessen Benetzungshemmung auftritt. Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensäurer Kalk, BK = Branntkalk. $n = 12$

Kontaktwinkelmessungen

An den Standorten Barlt und Struckum wurden die Kontaktwinkel mit dem optischen Kontaktwinkel Messgerät (OCA20, DataPhysics) an ungestörten Proben bestimmt, in Cunnersdorf mit der Wilhelmy-Platten-Methode an gestörtem Material.

In Barlt in 10 cm Tiefe sind bei der ersten Probenahme bei den beiden feuchteren Entwässerungsstadien -60 und -300 hPa leicht abnehmende Kontaktwinkel bei den Kalkstufen zu erkennen (Abbildung 30). Bei den lufttrockenen Proben zeigen nur die

Brantkalkvarianten Unterschiede zu der OK auf. Bei der zweiten Probenahme sind bei -60 und -300 hPa die beiden 1,5-fachen Mengen und die KK-1 Variante auf gleichem Niveau, während BK-1 Variante gleiche Werte (-300 hPa) oder nur leicht geringere Werte (-60 hPa) im Vergleich zur Referenz aufweist. Im lufttrockenem Zustand liegen die beiden BK Varianten mit der KK-1,5 Variante wiederum deutlich unterhalb der OK und KK-1 Variante. Bei der dritten Probenahme sind die Unterschiede zwischen den Varianten für -60 und -300 hPa Entwässerung recht gering, bei den lufttrockenen Proben sind hier alle 4 Kalkvarianten unterhalb der Werte der Referenz.

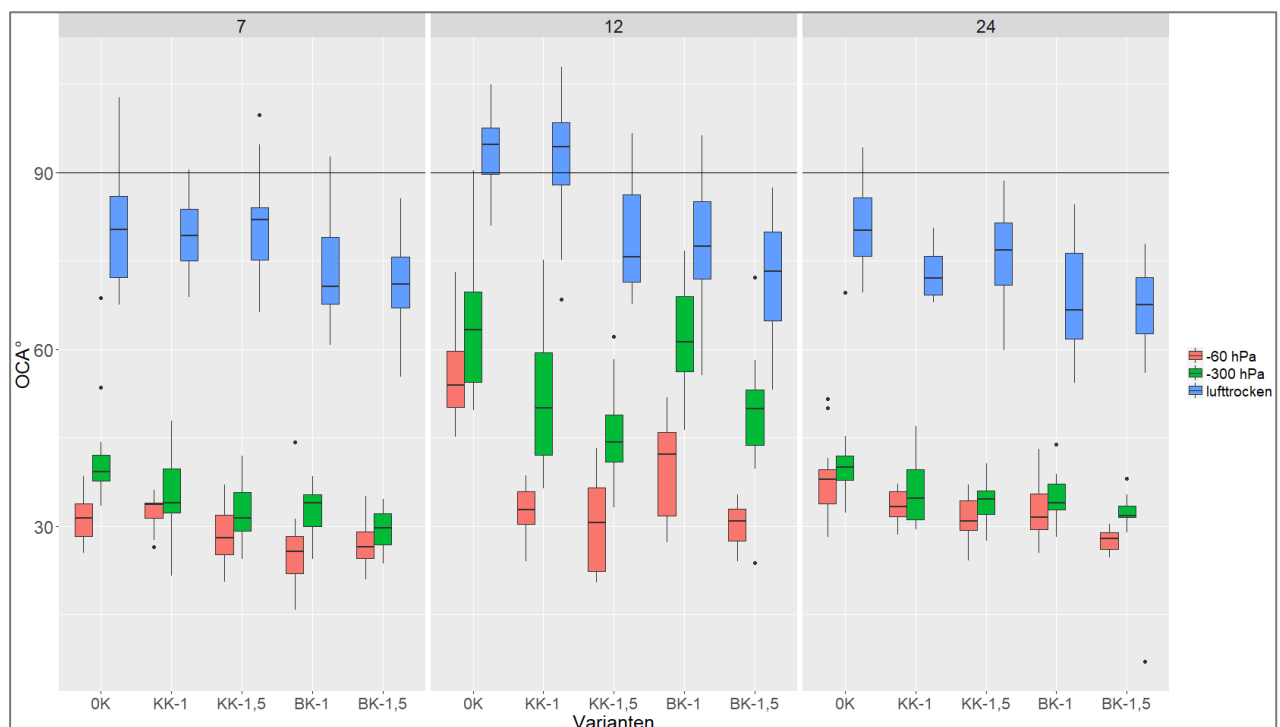


Abbildung 30 Optische Kontaktwinkel am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die drei Probenahmeterminen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, gemessen an 3 unterschiedlichen Entwässerungsstadien (-60 hPa in Rot, -300 hPa in Grün und lufttrocken in Blau).. Die schwarze horizontale Linie verläuft bei 90°, oberhalb dessen die Werte als benetzungshemmend gelten (Bachmann et al., 2013). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Brantkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Brantkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 16$

In 30 cm Tiefe zeigt sich in Barlt 7 Monate nach der Kalkung noch kein Effekt, alle Varianten sind auf einem gleichen Level (Abbildung 31). Bei der zweiten Probenahme ist bei -60 hPa als auch bei den lufttrockenen Proben nur die BK-1,5 Variante signifikant unterschiedlich zu den übrigen Varianten, bei -300 hPa sind Trends erkennbar, welche andeuten, dass die beiden BK Varianten und KK-1,5 geringere Werte aufweisen als die Referenz. Bei der dritten Probenahme sind die Unterschiede zwischen den Varianten

deutlich ausgeprägt, die lufttrockenen Proben zeigen, dass vor allem beide BK-Varianten und auch KK-1,5 geringere Kontaktwinkel zeigen als OK. Für -60 und -300 hPa zeigen alle Kalkvarianten (mit Ausnahme von KK-1 bei -60 hPa) geringere Kontaktwinkel als die Nullkalkreferenz.

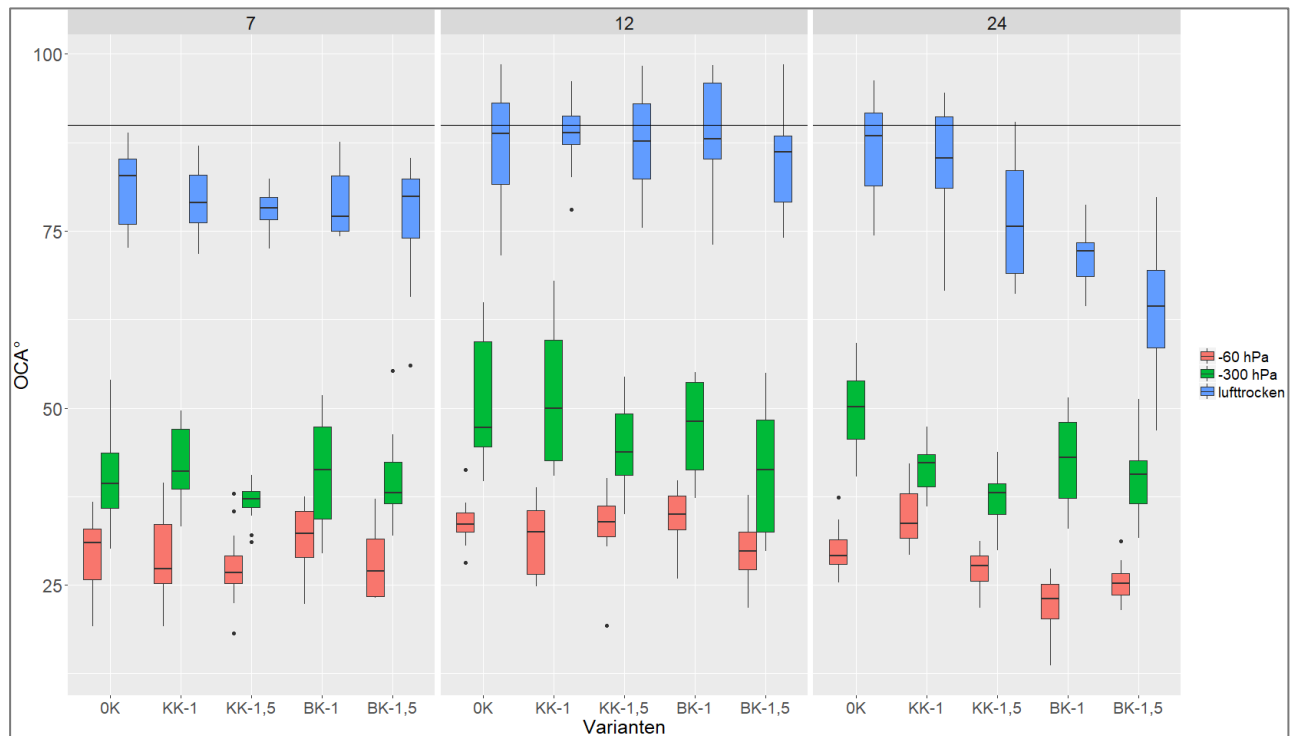


Abbildung 31 Optische Kontaktwinkel am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die drei Probenahmetermine 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, gemessen an 3 unterschiedlichen Entwässerungsstadien (-60 hPa in Rot, -300 hPa in Grün und lufttrocken in Blau). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei 90°, oberhalb dessen die Werte als benetzungshemmend gelten (Bachmann et al., 2013). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 16$

Am Standort Struckum in 10 cm Tiefe sind bereits nach 7 Monaten Effekte der Kalkung erkennbar (Abbildung 32). Die Kontaktwinkel der Branntkalkvarianten liegen bei allen 3 Entwässerungsstadien unter der Nullkalkreferenz. Die KK-1 Variante zeigt kaum oder nur geringe Unterschiede, die 1,5-fache Menge nimmt hier einen Zwischenplatz zwischen OK/KK-1 und BK-1/BK-1,5 ein. Bei der zweiten Probenahme sind im lufttrockenen Zustand die Kontaktwinkel der OK Variante die höchsten gemessenen, die deutlichsten Unterschiede sind im Vergleich zur BK-1,5 Variante. Bei Entwässerung auf -60 und -300 hPa zeigt sich das sehr ähnliche Bild, dass lediglich die beiden 1,5-fachen Mengen einen Unterschied zur OK aufweisen. Wie bei den ersten beiden Terminen sind bei der dritten

Probenahme sind die Unterschiede zwischen den Varianten im lufttrockenen Zustand am deutlichsten. Alle 4 Kalkvarianten weisen geringere Kontaktwinkel auf als die Referenz, am deutlichsten hierbei die Branntkalkvarianten. Bei -300 hPa sind die Unterschiede zwischen den Varianten gering, die Trends sind in einer ähnlichen Richtung wie bisher auch zu erkennen. Bei -60 hPa liegen die beiden BK Varianten, gemeinsam mit KK-1,5 unter den Werten der Nullkalkvariante.

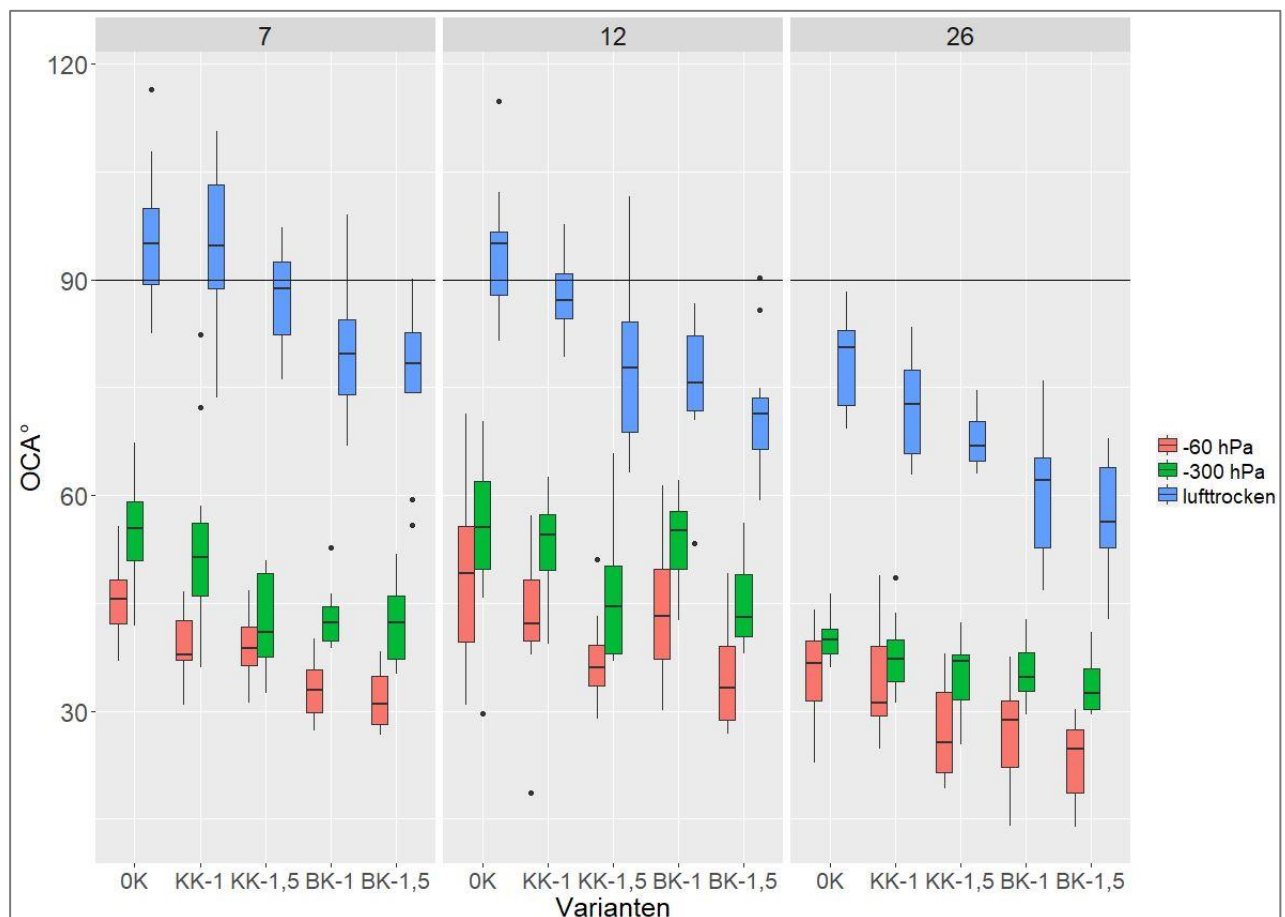


Abbildung 32 Optische Kontaktwinkel am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die drei Probenahmetermine 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, gemessen an 3 unterschiedlichen Entwässerungsstadien (-60 hPa in Rot, -300 hPa in Grün und lufttrocken in Blau). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei 90°, oberhalb dessen die Werte als benetzungshemmend gelten (Bachmann et al., 2013). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. $n = 16$

In 30 cm Tiefe sind, ähnlich wie in 10 cm Tiefe (aber anders als am Standort Barlt), bereits 7 Monate nach der Kalkung Unterschiede zwischen den Varianten zu sehen (Abbildung 33). So liegen alle 4 Kalkvarianten bei allen 3 Entwässerungsstadien unter den Werten der Referenz. Auch hier deutet sich an, dass die Unterschiede klarer werden, je trockener

der Boden und damit je höher die Kontaktwinkel allgemein sind. Beide Branntkalkvarianten weisen die niedrigsten Kontaktwinkel auf. Der Unterschied zwischen KK-1 und KK-1,5 ist hier bei der ersten Probenahme noch nicht vorhanden. Dies ändert sich bei der zweiten Probenahme, bei der die KK-1,5 Variante vor allem im lufttrockenen Bereich auf einem Level mit den Branntkalkvarianten, unterhalb von OK und KK-1 liegt. Bei der dritten Probenahme sind die Unterschiede zwischen den Varianten bei -60 und -300 hPa Entwässerung der Bodenproben recht gering, bei -60 hPa weisen die 1,5-fachen Varianten die geringsten Werte auf, bei -300 hPa ist lediglich die BK-1,5 Variante deutlich unterhalb der anderen Varianten. Bei den lufttrockenen Proben sind die Unterschiede dann deutlicher, alle Kalkvarianten weisen niedrigere Kontaktwinkel auf als die Nullkalkreferenz, wobei die Branntkalkvarianten unterhalb des kohlen-sauren Kalkes liegen.

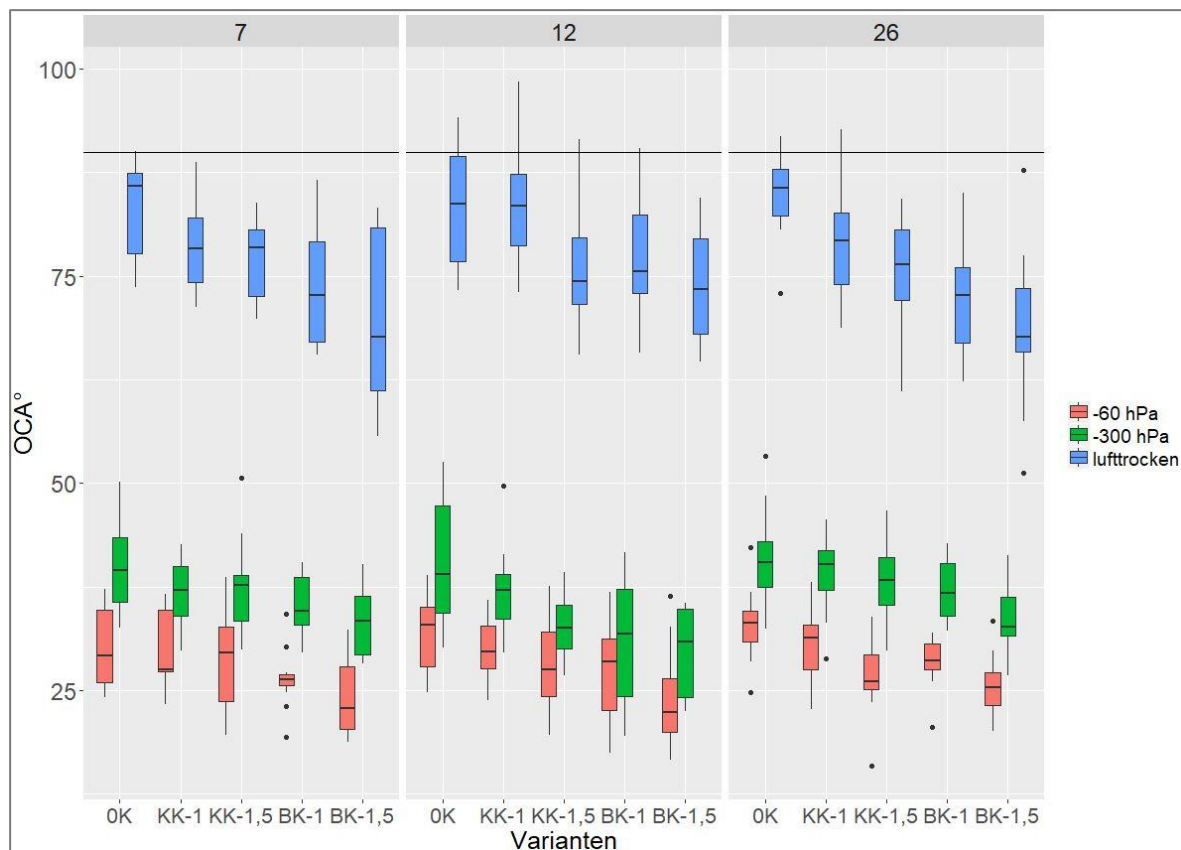


Abbildung 33 Optische Kontaktwinkel am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die drei Probenahmeterminen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, gemessen an 3 unterschiedlichen Entwässerungsstadien (-60 hPa in Rot, -300 hPa in Grün und lufttrocken in Blau). Die schwarze horizontale Linie verläuft bei 90°, oberhalb dessen die Werte als benetzungshemmend gelten (Bachmann et al., 2013). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensäurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensäurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der

einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 16

Am Standort Cunnersdorf sind die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen recht ähnlich zueinander und Unterscheide zwischen den Varianten sind, wenn vorhanden, uneinheitlich. In 10 cm Tiefe bei der ersten Probenahme sind die höchsten Kontaktwinkel bei der Referenz und beide Kalkformen weisen geringere Werte im Vergleich auf. Für die zweite Probenahme sind die Werte auf einem gleichen Niveau. Für 30 cm Tiefe sind die Werte entweder recht ähnlich (1. Probenahme) oder aufgrund von sehr großen Messschwankungen schwierig zu bewerten. Der kohlen saure Kalk weist bei der zweiten Probenahme die niedrigsten Kontaktwinkel auf.

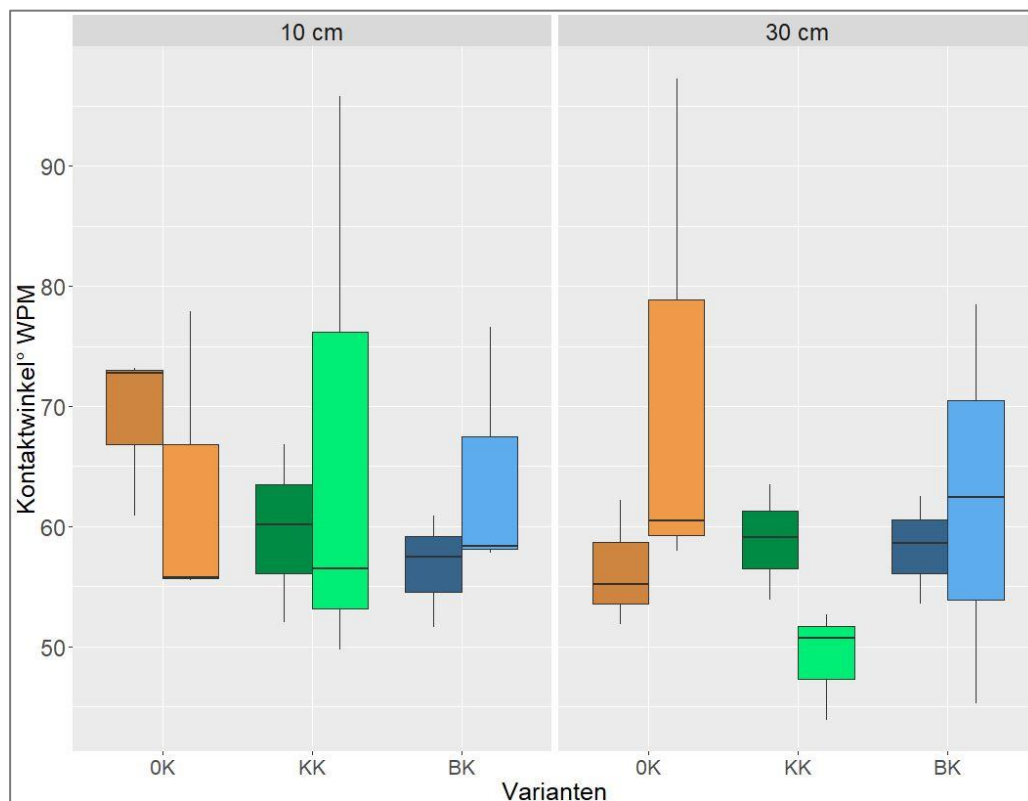


Abbildung 34 Kontaktwinkel nach Wilhelmy-Platten-Methode für den Standort Cunnersdorf. Dargestellt sind die beiden Tiefen 10 und 30 cm, so wie die beiden Probenahmen dargestellt durch den linken Boxplot (18 Monate nach letzter Kalkung) und rechten Boxplot (23 Monate nach letzter Kalkung). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK = Kohlensäurer Kalk, BK = Branntkalk. n = 8

Respirationsversuche

Die Ergebnisse der Respirationsversuche an den Standorten Barlt und Struckum zeigen nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten bei der ersten Probenahme, bei den weiteren beiden zeigen sich nahezu keine nennenswerten Unterschiede in den Respirationsraten. Auch zeigen sich keine Trends, ob eine Kalkung zu einer geänderten mikrobiellen Aktivität führt. Für beide Standorte sind die Ergebnisse für 7 Monate nach der Kalkung, aus 10 cm Tiefe, in den Tabellen 13 und 14 zusammengestellt, die der übrigen Probenahmen befinden sich im Anhang (Tabellen 21-24).

Tabelle 13 Respirationsrate (in $\mu\text{g CO}_2$ pro g getrocknetem Boden pro Stunde) von unterschiedlich lang inkubierten Bodenproben (auf -60 hPa entwässert) aus 10 cm Tiefe am Standort Barlt, 7 Monate nach der Kalkung (April 2017). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4.

Inkubationstage			
	CO ₂ (μg * g getrockneter Boden *h)		
Variante	1 Tag	3 Tage	7 Tage
OK	3,5	3,3	2,6
KK-1	3,4	2,9	2,8
KK-1,5	3,4	3,5	3,2
BK-1	3,7	3,7	3,6
BK-1,5	3,9	3,8	3,4

Tabelle 14 Respirationsrate (in $\mu\text{g CO}_2$ pro g getrocknetem Boden pro Stunde) von unterschiedlich lang inkubierten Bodenproben (auf -60 hPa entwässert) aus 10 cm Tiefe am Standort Struckum, 7 Monate nach der Kalkung (April 2017). Die Varianten sind: OK = Nullkalk Referenz, KK-1 = Kohlensaurer Kalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, KK-1,5 = Kohlensaurer Kalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1 = Branntkalk in der einfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort, BK-1,5 = Branntkalk in der anderthalbfachen Menge nach VDLUFA Empfehlung für den jeweiligen Standort. n = 4.

Inkubationstage			
	CO ₂ (μg * g getrockneter Boden *h)		
Variante	1 Tag	3 Tage	7 Tage
OK	3,6	3,8	3,8
KK-1	3,8	3,5	3,7
KK-1,5	4,0	4,3	4,2

BK-1	3,5	3,4	3,4
BK-1,5	3,6	3,5	3,8

Diskussion der Ergebnisse

Die Entstehung von Aggregaten und die Zugänglichkeit von Partikeloberflächen im Intra- und Interaggregatvolumen hängt unter anderem von Quellungs- und Schrumpfungsprozessen, der Partikelanordnung und von physikochemischen Prozessen ab (Horn & Smucker, 2005). Vor allem in tonreichen Böden bedingen die hohen Anteile an Feinporen ackerbaulich relevante bodenphysikalische Probleme von eingeschränkt funktionsfähigen Porensystemen, damit eine Verschlechterung von Bodenfunktionen und somit schlussendlich auch eine Verringerung des Ertragspotenzials. Die Versuche wurden durchgeführt um nachzuweisen, ob mit höheren Kalkgaben und Kalkformen eine Verbesserung der Bodenfunktionen erreicht werden kann. Hierzu ist es notwendig einerseits den chemischen Zustand zu optimieren, denn damit wird gleichzeitig auch eine Umorientierung der Bodenpartikel, Stabilisierung und damit einhergehende bessere Zugänglichkeit von Oberflächen erreicht. An diesen Punkten sollte mit den beschriebenen Methoden angesetzt werden, um zu bewerten in wie weit eine Kalkung Bodenfunktionen verbessern kann. Ein weiterer Aspekt war zwei unterschiedliche Kalkformen zu untersuchen und ebenfalls einen Mengeneffekt zu berücksichtigen um zu evaluieren, ob die bisherigen durchgeführten Kalkmengenempfehlungen korrigiert werden sollten, um den Struktureffekten einer optimalen Kalkung Rechnung zu tragen.

Porengrößenverteilung

Die Porengrößenverteilung liefert Aussagen über Parameter des Luft- und Wasserhaushaltes im Boden, darunter die aus landwirtschaftlicher Sicht wichtigen Aspekte der Luftkapazität, nutzbarer Feldkapazität und Totwasser. Wir sehen auf den beiden Standorten Barlt und Struckum bereits 7 Monate nach Ausbringung und Einarbeitung des Kalkes erste positive Aspekte in Hinblick auf höhere Luftkapazitäten und nutzbare Feldkapazitäten. Erhöhte Luftkapazitäten durch eine Kalkung korrespondieren mit den Ergebnissen von (Schack-Kirchner & Hildebrand, 1998), (Zimmermann, et al., 2016) und (Mordhorst, et al., 2017). Vor allem die 1,5-fachen Varianten des Branntkalkes und kohlensauren Kalkes sind in der Lage, mehr Wasser

pflanzenverfügbar zu speichern. Da das Gesamtporenvolumen bei beiden Standorten nicht signifikant erhöht wurde, müssen die Änderungen durch eine Umwandlung von Feinporen in Mittelporen und Grobporen erklärt werden. Eine Umwandlung innerhalb der Porengrößenverteilung durch eine Kalkung konnte auch von (Auler, et al., 2017) gezeigt werden. Diese Umwandlung beruht auf der Flockung und Aggregation der Tonpartikel durch die Calcium Ionen aus dem Kalk (Beetham, et al., 2014), (Witt, 2002). Die Ergebnisse deuten Verbesserungen durch die Kalkvarianten im Luft- und Wasserhaushaltes in den oberen 30 cm an, welche aus landwirtschaftlicher Sicht entscheidend sein können, um in Grenzsituationen länger gute Bedingungen für den Pflanzenbestand bereitstellen zu können. So können die Böden im Frühjahr, dank erhöhter Luftkapazitäten sich schneller erwärmen, was auf tonreichen Marschböden ein wichtiger Aspekt ist, um die Mineralisation im Oberboden zu beschleunigen. In trockenen Sommern lässt sich im Oberboden mehr Wasser speichern, so dass der Bestand weniger von einer tiefen Durchwurzelung abhängig ist, was den zeitlichen Druck bei der Aussaat verringert.

Beispielsweise in Barlt zeigt sich das Phänomen in 30 cm Tiefe, dass die positiv zu bewertenden Funde zwischen der 2. und 3. Probenahme nahezu komplett wegfallen. Dies könnte mit einer erneuten Bodenbearbeitung zusammenhängen, welche zwischen erster und zweiter Probenahme nicht stattfand. In Struckum sieht man diesen Effekt nicht, so dass der Standort aufgrund seines geringeren Tongehaltes weniger sensitiv auf die Befahrung zu reagieren scheint. Ansonsten zeigen die Ergebnisse über die Zeit stabile, leicht verbesserte Bedingungen in den gekalkten Varianten, so dass man von einer relativ nachhaltigen Verbesserung des Porensystems aus landwirtschaftlicher Sicht sprechen kann.

Am Standort Cunnersdorf sind keine Trends zwischen den Varianten in den Ergebnissen erkennbar, was auch bei den meisten der weiteren Messungen auftritt. Mögliche Gründe für eine geringe Wirkung des Kalkes sind vor allem in dem geringen Tongehalt von um die 10 % im Oberboden zu sehen, da der Kalk dadurch weniger Austauschplätze zur Verfügung hat um zu wirken. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass die Lagerungsdichte mit um die $1,6 \text{ g/cm}^3$ recht hoch ist, was für eine Verdichtung der Fläche sprechen könnte, welche mögliche Kalkeffekte überwirkt. Zusätzlich sieht man im

Oberboden des Profils in Cunnersdorf einen pH-Wert von 4,8 der recht deutlich unter den Werten aus den Nullparzellen mit um die 6,0 liegt, was für eine mögliche Verschleppung des Kalkes aus Nachbarparzellen über die Jahre sprechen könnte.

Die Porengrößenverteilung ist eine Kapazitätsgröße, welche lediglich aussagt wie viele Poren von welcher Größe vorliegen. Dieses muss mit Parametern verglichen/erweitert werden, die Intensitätskennwerte liefern, um die Gültigkeit und Anwendbarkeit der Aussagen zu gewährleisten, da hier auch die Leitfähigkeiten und Konnektivitäten geprüft werden (Holthusen, et al., 2012).

Wasserleitfähigkeiten

Neben der Calciumbrückenbindung zwischen mineralischen und organischen Komponenten im Boden spielt bei der Kalkung die exotherme Reaktion, vor allem bei Verwendung von Branntkalk, eine entscheidende Rolle bei der Beeinflussung von Porensystemen. Dabei handelt es sich um eine Sofortreaktion, dem sogenannten Ablöschen, wobei Hitze entsteht, Wasserdampf verloren geht und eine Schrumpfung einsetzt. Diese Schrumpfung kann anschließend, durch puzzolanische Reaktionen, für eine erhöhte Porenkontinuität sorgen, welche sich in veränderten Werten der Wasserleitfähigkeit nachweisen lässt. Diese puzzolanische Reaktion tritt vor allem bei hohen pH-Werten von um die 12 auf, welche kurzzeitig bei der Löschreaktion beim Kontakt mit Branntkalk auftreten können (Witt, 2002). Durch die Ergebnisse von 3 verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen Texturen und einem Tongehaltsgradienten von 10-45 % im Oberboden lassen sich texturabhängige Wirkungsweisen einer Kalkung ausmachen. Die entstehenden Ton-Kalk Komplexe, welche zusätzlich noch mit Humuspartikeln in Aggregation gehen können, sind dabei essentiell für funktionsfähige Porenkontinuitäten und daher umso relevanter, je mehr reaktiver Ton vorhanden ist. Die Ergebnisse der Standorte Barlt und Struckum zeigen, dass der Branntkalk häufig höhere Werte aufweist als der kohlen saure Kalk. Dies würde die These unterstützen, dass bei Verwendung von Branntkalk, durch den doppelten Effekt von Calciumbrückenbindungen sowie Löschreaktion höhere Porenkontinuitäten entstehen können. Auch der kohlen saure Kalk liefert überwiegend höhere gesättigte Wasserleitfähigkeiten als die Referenz, was auch durch die Ergebnissen von (Marsi & Evangelou, 1991), (Bolan, et al., 1996) und (Li, et al., 2010) bestätigt wird. Diese erhöhten

Wasserleitfähigkeiten werden mit einem verbesserten Netzwerk von Poren begründet (Bennett, et al., 2014), welche durch die Flockung in tonreichen Böden durch eine Kalkung erreicht werden können (Yilmaz, et al., 2005). Diese durch eine Kalkung erreichte Aggregation durch Calcium Ionen und organische Substanz und die damit verbundene Steigerung der Wasserleitfähigkeiten wird ebenfalls in (Wuddivira & Camps-Roach, 2007) und (Kirkham, et al., 2007) beschrieben.

Die Ergebnisse der ungesättigten Wasserleitfähigkeiten liefern im Vergleich zur gesättigten Wasserleitfähigkeit Aussagen entlang eines Austrocknungsgradienten. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Kalkbehandlung, vor allem mit Branntkalk oder mit der 1,5-fachen Menge des kohlensauen Kalkes über den gesamten Verlauf einer Entwässerung höhere Leitfähigkeiten aufweisen, als die Referenz. Dies bedeutet, dass Wasser nahe Sättigung besser abgeleitet werden kann, aber auch im trockeneren Bereich besser den Pflanzen nachgeliefert werden kann, was auf verbundeneren, stabilere Porensysteme hinweist (Gallage, et al., 2013). Diese höheren Porenkontinuitäten der gekalkten Varianten werden durch die einsetzende Schrumpfung im Laufe der Entwässerung nicht in dem Maße beeinflusst, dass sich die Werte wieder der ungekalkten Referenz angleichen, sondern bleiben auf einem durchgehend höheren Niveau. Es ist auch zu erkennen, dass bei allen 3 Probenahmeterminen Kalkeffekte im Vergleich zur „Nullkalk“ auftreten und diese nicht durch die stattfindende Bodenbearbeitung zwischen 2. und 3. Probenahme verringert wurden, was teilweise bei den Porengrößenverteilungen zu erkennen war. Dies deutet darauf hin, dass die Verbundenheit der Poren als funktionsbeschreibende Intensitätsgröße verbessert wurde, während diese Entwicklung anhand der Kapazitätsgröße Porengrößenverteilung nicht zu erkennen ist. Ähnliche Ergebnisse konnten bei einer Behandlung mit Biokohle gefunden werden (Villagra-Mendoza & Horn, 2018). Damit einher geht auch die Durchlässigkeit für Gase im Boden, die über die beiden Prozesse: Massenfluss und Diffusion gesteuert wird. Da der Massenfluss nur in den obersten 10-20 cm von großer Bedeutung ist und mit der Tiefe abnimmt, wurde der Stabilisierungseffekt in den vorliegenden Untersuchungen anhand der Gasdiffusionsmessungen nachgewiesen.

Gasaustausch/Diffusion

Für einen optimalen Gasaustausch im Oberboden, der aus landwirtschaftlicher Sicht u.a. Bedeutung für eine ausreichende Belüftung der Pflanzenwurzeln hat, ist aus bodenphysikalischer Sicht nicht nur die Luftkapazität, sondern auch die Kontinuität von luftgefüllten Poren entscheidend (Glinski & Stepniewski, 1985). Die Ergebnisse deuten an, dass es einen Effekt der Kalkform gibt, da die Branntkalkvarianten häufig höhere Diffusionskoeffizienten aufweisen als der kohlen saure Kalk. Der Effekt der Kalkmenge lässt sich daran verdeutlichen, dass beim kohlen sauren Kalk die einfache Menge häufig kaum oder nur geringe Steigerungen im Vergleich zur OK zeigen, die 1,5-fache Menge hingegen häufig auf ähnlich, höherem, Niveau liegt wie der Branntkalk in beiden Mengen. In 30 cm Tiefe sind die Werte vor allem bei den ersten beiden Probenahmen deutlich niedriger als in 10 cm und zeigen typisch geringe Werte einer Pflugsohle, im Bereich des kritischen Grenzwertes von 0,002 welcher aus pflanzenphysiologischer Sicht definiert wurde, unterhalb dessen die Belüftung unzureichend sei (Stepniewski, et al., 1994). Dass die Werte bei der letzten Probenahme über alle Varianten gesehen höher sind als bei den anderen Probenahmen kann mit dem trockenen Sommer 2018 und den damit verbundenen Schrumpfungsprozessen zu tun haben (Widomski, et al., 2015).

Gesteigerte Diffusionsraten durch Kalkung zeigen ebenfalls (Hartge & Ellies, 1977) und (Mordhorst, et al., 2018). Höhere Diffusionskoeffizienten weisen auf ein stabileres und verbundeneres Porensystem hin, welches positive Bedingungen für das Wurzelwachstum bedeutet und damit erhöhte Zugänglichkeit von Nährstoffen und Wasser. Diese stabilen Porensysteme werden durch kontrahierende Wassermenisken zwischen den Kontaktpunkten der Partikel bedingt, welche hauptsächlich bei der Sofortreaktion mit dem Branntkalk die Kohäsion erhöhen können (Bohne, et al., 1985) (Horn & Smucker, 2005). Die Funktionalität dieser verbesserten Porensysteme lassen sich auch anhand der geringeren Tortuositätsindices und der (teilweise) gesteigerten C-Indices belegen. Geringere Tortuositätsindices bedeuten eine geringere Gewundenheit des Porensystems und damit bessere Transporteigenschaften. Höhere C_1 Indices stehen für einen erhöhten Anteil der luftgefüllten Poren, welche am Gasaustausch teilnehmen (Fish & Koppi, 1994). Die Ergebnisse deuten an, dass durch die Kalkung die luftgefüllten Poren kontinuierlich miteinander verbunden werden, auch wenn es in 30 cm Tiefe erst teilweise mit Verzögerung zu diesen Beobachtungen kommt. Unterschiede zwischen den

Varianten in Bezug auf Porenkontinuität (C_3 Indices) und zusätzlich Porengrößenverteilung (C_2 Indices) lassen sich vor allem am Standort Barlt festmachen. Das sich die verschiedenen Indices, wie die Diffusivität, auch in der Nullkalk Variante zwischen den Probenahmen ändert und vor allem bei der letzten Probenahme nach dem trockenen Sommer 2018 auch erhöhte Werte aufweist, stützt die Interpretation, dass Quellung- und Schrumpfungsprozesse bei den OK Varianten die entscheidende Rolle spielen und ebenfalls leitfähige Poren schaffen, welche aber im Vergleich zu den gekalkten Varianten weniger stabil und belastbar sind. Dies wird auch von anderen Autoren belegt (Groenevelt, et al., 1984), (Fish & Koppi, 1994), (Dörner, et al., 2012), (Uteau, et al., 2013).

Oberflächeneigenschaften

Mit jeder Kalkung geht auch eine Änderung der Oberflächeneigenschaften von Bodenpartikeln und Porenwandungen einher. Es ist allgemein bekannt, dass mit zunehmendem pH-Wert die Benetzungshemmung in Böden geringer wird und damit nicht nur Wasser, sondern gleichzeitig auch darin gelösten Nährstoffe an die Austauscher Oberflächen auch pflanzenverfügbar gebunden werden können. Aus der Vielzahl der Messungen der Oberflächeneigenschaften lässt sich der positive Effekt einer Kalkung eindeutig nachweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit steigendem pH-Wert als Folge der vermehrten mikrobiellen Aktivität einen Ab-/Umbau der organischen Substanz unterstützt und dabei zunehmend hydrophile Enden der organischen Säuren generiert werden.

Die Werte der Repellency Indices deuten an, dass für diesen Parameter die Kalkform den größeren Einfluss nimmt als die Kalkmenge, wobei diese innerhalb der Kalkformen auch einen Effekt zeigt. Grundsätzlich weist der Standort Barlt leicht höhere Werte auf als in Struckum, was an dem höheren Kohlenstoffgehalt (3,4 % zu 1,5 %) liegen könnte, welcher nach einigen Autoren einen Einfluss auf Benetzungsfähigkeit hat (Hallett, et al., 2001), (Bachmann, et al., 2003), (Haas, et al., 2018). Der Grenzwert von 1,95, welchen man in genannten Quellen finden kann scheint bei den beiden tonig-schluffigen Standorten in Barlt und Struckum nicht so zu passen, da bis auf wenige Ausnahmen (dreimal BK-1,5 in Barlt, einmal BK-1,5 und einmal KK-1,5 in Struckum) der Wert immer überschritten wird. Tonige und schluffige Standorte gelten grundsätzlich als weniger

empfindlich gegenüber Benetzungshemmung als sandige Böden, von daher scheint es eher unwahrscheinlich, dass fast alle untersuchten Bodenproben als benetzungsgehemmt einzustufen sind. Eventuell ist für feinkörnigere Böden eine Anpassung des kritischen Grenzwertes notwendig.

Der Einfluss der Kalkung auf die Benetzungshemmung liegt zum einen an der physikalischen Wirkung auf die Porosität der Oberflächen und damit einer besseren Infiltration. Zusätzlich können auf physikochemischer Ebene mögliche hydrophobe, amphiphile organische Substanzen nahe der Partikeloberflächen so umgebaut werden, dass sie weniger benetzungshemmend wirken. Beispielsweise können die Aktivität und Diversität der Gemeinschaften von Mikroorganismen beeinflusst werden, so dass mögliche hydrophobe Komponenten stärker abgebaut werden (Müller & Deurer, 2011). Weitere Autoren die eine Abnahme von Benetzungshemmung mit einer pH-Erhöhung zeigen konnten sind (Orfanus, et al., 2014) und (de Jonge, et al., 2007).

Bei der Sorptivitätsmessung ist in 10 cm Tiefe für den Standort Cunnersdorf ein signifikantes Ergebnis zu sehen, dort weist die Nullkalkvariante im Vergleich zu beiden Kalkformen höhere Repellency Indices auf, ist dementsprechend benetzungsgehemmt. Der Grenzwert von 1,95 scheint an diesem sandig-schluffigem Standort gut anwendbar zu sein, da lediglich die ungekalkte Referenz oberhalb des Wertes liegt und damit als benetzungsgehemmt eingeschätzt werden kann. Dass bei dieser Messung im Gegensatz zu den meisten weiteren Messungen in Cunnersdorf ein Unterschied auftritt, könnte ein Indiz dafür sein, dass hierbei kein reiner physikalischer Effekt von Bedeutung ist, welcher an höhere Tongehalte geknüpft wäre, sondern chemische beziehungsweise mikrobiologische Prozesse dominieren.

Die Ergebnisse der Messungen der optischen Kontaktwinkel für die Standorte Barlt und Struckum passen recht gut überein mit den Ergebnissen der Repellency Indices. Die Standorte mit höherem Tongehalt reagieren merklicher auf die Kalkung und zeigen dementsprechend deutliche Unterschiede zwischen den Varianten. Böden mit gröberer Textur gelten als empfindlicher für Benetzungshemmungen, reagieren aus bodenphysikalischer Sicht, anhand unserer Ergebnisse aber weniger deutlich auf Kalkungsmaßnahmen. Eine Behandlung mit Branntkalk auf tonreichen Böden liefert auf mehreren Ebenen die vielversprechendsten Ansätze, da durch die Sofortreaktion ein

erster Struktureffekt auftritt, der die Tonpartikel krümeliger und damit tendenziell hydrophiler macht. Erneut ist bei den Ergebnissen die Kalkform der entscheidende Faktor, da die Branntkalkvarianten oftmals die niedrigsten Kontaktwinkel und somit die besten Infiltrationseigenschaften aufweisen. Auffallend ist, dass die Unterschiede zwischen den Varianten im lufttrockenen Zustand am größten sind, die Kalkbehandlungen also beispielsweise in trockenen Sommern die Infiltration bei eventuellen Niederschlägen verbessern und damit mögliche Erosionsprozesse vermindern können. Aber auch in den Entwässerungsstadien -60 hPa (typische Frühlingsfeuchte) und -300 hPa („normaler“ Sommer) können Verbesserungen durch die Kalkbehandlungen beobachtet werden, was zum Beispiel zur Verminderung von Verschlammungsprozessen auf tonreichen Böden im Frühjahr beitragen könnte. Die Ergebnisse korrespondieren zu den Arbeiten von (Roper, 2005), (Diehl, et al., 2010), (Hassan, et al., 2014) und (Amer, et al., 2017). Die Autoren interpretieren die Effekte der Kalkung im Hinblick auf Benetzungsfähigkeit im Zuge einer chemischen Modifizierung von organischen Verbindungen. Eine Änderung des pH-Wertes kann die Tendenz von Bodenpartikeln ändern dazu, hydrolytische Reaktionen zu betreiben und damit die hydrophoben Parts von organischer Substanz anzugreifen. Zusätzlich kann eine gesteigerte Aktivität von wachs-abbauenden Bakterien erreicht werden, welche ebenfalls mögliche hydrophobe Komponenten von organischer Substanz abbauen.

Respirationsversuche

Die Ergebnisse der Respirationsversuche zeigen keine dauerhaft signifikanten Einflüsse der verschiedenen Kalkvarianten auf die Respirationsraten und damit auf die mikrobielle Aktivität im Boden. Das passt zu Ergebnissen von (Mordhorst, et al., 2017), die auch keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Kalkung und Respirationsraten fanden. Leichte Steigerungen der Werte können entweder mit der Erhöhung der Aktivität der Mikroorganismen begründet werden, was beispielsweise (Haynes & Naidu, 1998) argumentieren. Eine bodenphysikalische Erklärung wäre durch die gesteigerten Diffusionsraten, und damit besseren Sauerstoffversorgung, verbundenen erhöhten Mineralisationsraten gegeben, wie von (Stepniewski & Stepniewska, 2009) und (Ball, 2013) angeführt. Potenzielle pH-Bereiche im alkalischen Bereich, welche dann die mikrobielle Aktivität limitieren, konnten hier nicht festgestellt werden.

Empfehlungen

Aus den erzielten Ergebnissen und den damit erklärbaren Bodenstruktur - Bildungsprozessen lassen sich erste allgemeine Empfehlungen für die Landwirtschaft und die Beratung ableiten. Es muss betont werden, dass die Ergebnisse bisher lediglich auf einem dreijährigen Versuch aufbauen und damit gleichzeitig noch neben Witterungsabhängigkeiten auch dem Effekt der Bodenbearbeitung zwischen den Versuchsjahren unterliegen. Es ist allgemein bekannt, dass der jährliche Verlust an Kalzium durch Nährstoffaufnahme, Versickerung, Pufferungsprozesse, Mineralisierung ebenso wie durch Säureeintrag aus der Atmosphäre durchaus Größenordnungen von 200-700 kg/Hektar und Jahr ausmachen, die auf jeden Fall zur Aufrechterhaltung der Bodenfunktionen stets entweder in Form einer jährlichen oder aber zwei- bis dreijährigen Erhaltungskalkung zugeführt werden müssen. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass eine deutliche Strukturverbesserung nur dann erreicht werden kann, wenn gleichzeitig der pH-Wert in den untersuchten Lehmen und Tonen zumindest im neutralen pH-Bereich liegt, denn nur so können durch Calcium Brückenbindungen und damit einhergehenden Tonhumuskomplexen stabile Bodenfunktionen in Form von Leitfähigkeiten, Diffusion und damit Erreichbarkeit von Oberflächen auch über einen größeren Entwässerungs- und mechanischen Belastbarkeits- Belastungsraum erreicht werden.

Die Ergebnisse zeigen zum Teil deutlich, dass die Erhöhung der Kalkmengen auf die 1,5-fache Menge der aktuellen Empfehlungen bei beiden Kalkformen entweder die einzigen oder aber die deutlichsten Verbesserungen im Vergleich zur ungekalkten Referenz aufweisen. Der zweite wichtige Aspekt betrifft die Form des ausgebrachten Kalkes, denn die Branntkalkvarianten weisen häufig verbesserte Eigenschaften auf als der kohlensaure Kalk. Daraus lassen sich erste Empfehlungen ableiten:

- Eine Erhöhung der pH-Werte in neutrale Bereiche (um pH 7) verbessert grundsätzlich mehrere bodenphysikalische Strukturparameter auf den untersuchten, tonreichen Böden und sollte daher auf vergleichbaren Böden angestrebt werden. Je höher der Tongehalt, je weniger strukturiert die landwirtschaftlich genutzten Böden sind, umso mehr muss auf eine Erhöhung des pH-Wertes geachtet werden.

- Auf tonreichen Standorten mit geringen pH-Werten macht eine Gesundungskalkung mit Branntkalk Sinn, um schnelle Verbesserungen zu erreichen.
- Eine regelmäßige Erhaltungskalkung kann den störenden Eingriffen im Porenraum durch die Bodenbearbeitung entgegenwirken.
- Im Hinblick auf die zu erwartenden Effekte des Klimawandels ist es dringend erforderlich, durch Stabilisierung der Bodenstruktur, Verbesserung der Zugänglichkeit von Poren und Partikeloberflächen, sowie der Porenkontinuität eine gleichmäßige Durchwurzelung des Bodens bis in größere Tiefe (1 m) zu gewährleisten.
- Durch Branntkalk (Austrocknung, puzzolanische Reaktion) kann als zusätzlicher Effekt auch eine Wiederauflockerung von verdichteten Pflugsohle in Bereichen erreicht werden, wodurch die Tiefendurchwurzelung und Erschließung neuer Bodenvolumina mit einem größeren Wasser – und Nährstoffvorrat erreicht werden kann.
- Die Einarbeitung der Kalkgabe sollte möglichst gleichmäßig erfolgen; im Hinblick auf eine schnellere Wirkung des Kalkes im Unterboden wäre eine Einarbeitung über Schlitzverfahren oder aber zumindest auf der Pflugsohle effektiv. Das abgeschlossene Vorhaben konnte zu diesem Themenbereich allerdings keine belastbaren Daten liefern, da diese nicht Gegenstand der Untersuchung war.

Zusammenfassung und Fazit

In aktuellen Diskussionen im Umfeld von Landwirten, Wissenschaftlern und Politik über eine optimale Bodenstruktur und Zugänglichkeit von Oberflächen müssen physikochemische Interaktionen in Wechselwirkung mit physikalischen Stabilisierungs- und Partikelumorientierungen in Betracht gezogen werden. In dem Zuge werden Empfehlungen wie beispielsweise Kalkmengenempfehlungen auf ihre Gültigkeit hinterfragt, da diese hauptsächlich auf den Ausgleich der jährlichen Entzüge abzielen und den Struktureffekt wenig berücksichtigen. Unsere Ergebnisse deuten grundsätzlich an, dass die Kalkmengensteigerung durch die 1,5-fachen Varianten positive Einflüsse auf bodenphysikalische Parameter aufweisen. So wurden die verschiedenen Aspekte der eigens definierten Boden-Wasser-Nutzungseffizienz, Wasserretention, Leitfähigkeiten

und die Oberflächeneigenschaften durch die gesteigerte Kalkung deutlicher verbessert als durch die einfachen Mengen. Dies spricht dafür, dass nicht nur die Kapazitätsgrößen (Wasserretention) verbessert wurden, die neu geschaffenen Porensysteme auch verbundener miteinander sind als ohne Kalk. Aus landwirtschaftlicher Sicht sind vor allem mehr pflanzenverfügbares Wasser sowie eine bessere Wasserführung im Oberboden entscheidend. Die verbesserten Werte bei den Parametern der Oberflächeneigenschaften deuten eine weitere Gültigkeit dieser Ergebnisse an, da die Zugänglichkeit der Partikeloberflächen verbessert wurden. Dadurch können potenziell negative Prozesse wie Erosion und Verschlammung vermindert werden, da Wasser besser in den Boden infiltrieren kann. In Schleswig-Holstein, wie in anderen Bundesländern auch, konnten in den Jahren 2017 und 2018 bereits prognostizierte Auswirkungen sich eines ändernden Klimas festgestellt werden. So war das Halbjahr Herbst 2017-Frühjahr 2018 von hohen Niederschlagsmengen geprägt, was nicht nur die Aussaat der Flächen, sondern auch deren Befahrbarkeit erschwerte. Direkt anschließend folgte vom Frühjahr bis in den Herbst 2018 eine selten dagewesene Trockenheit, welche zu beträchtlichen Ernteaussfällen führte. Dass wir auch, oder vor allem, in diesen Extremsituationen positive Effekte der Kalkbehandlungen im Vergleich zur Nullkalk-Referenz aufzeigen konnten zeigt die aktuelle Relevanz der Kalkthematik im Hinblick auf den Klimawandel in der Landwirtschaft. Die durch die Kalkung verbesserten Struktureigenschaften in Ackerböden sind eine Absicherung für Grenzsituationen (z.B. Trockenheit), da kritische Wasser- und Nährstoffdefizite für die Pflanzenbestände erst später auftreten. Dies spielt vor allem mit Hinblick auf eine effiziente Nährstoffausnutzung und Rücklieferung im Rahmen der neuen Düngeverordnung eine entscheidende Rolle für die Pflanzenproduktion.

Der Einsatz von Branntkalk in der Landwirtschaft ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zurückgegangen, was unter anderem mit der komplizierteren Lagerung und Ausbringung zu tun hat. Hier gezeigte Ergebnisse zeigen, dass die Behandlung mit Branntkalk bei vielen Parametern die deutlichsten Verbesserungen zeigen. Vor allem auf tonreichen Böden mit geringen pH-Werten könnte Branntkalk künftig wieder größere Bedeutung erhalten.

Durch die hier gezeigten Ergebnisse lassen sich Aussagen unterstützen, die zu einer Erhöhung der Kalkmengenempfehlungen raten. Viele der gezeigten bodenphysikalischen Parameter können vor allem durch die 1,5-fachen Mengen des kohlensauren Kalkes und des Branntkalkes am deutlichsten verbessert werden. Eine regelmäßige Aufkalkung mit möglichst nichtwendender Bodenbearbeitung und Einarbeitung könnte hierbei das am besten geeignete Mittel sein, da einige Ergebnisse suggerieren, dass eine Pflugarbeit die neu geschaffenen Porensysteme zerstören und damit die positiven Kalkeffekte abschwächen kann. Zukünftige Forschungsprojekte könnten sich auf verschiedene Bodenbearbeitungssysteme konzentrieren, um diese Aussagen noch zu präzisieren.

Literaturverzeichnis

Ad-hoc, 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe..

Amer, A., Schaumann, E. & Diehl, D., 2017. The effect of pH modification on wetting kinetics of a naturally water-repellent coniferous forest soil. *European Journal of Soil Science*.

Anon., kein Datum

Arnold, B., Schlütter, F. & Wendler, E., 2008. *Konervierung von Raseneisenstein*. Berlin: Lukas Verlag.

Auler, A. et al., 2017. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a Dystrudept soil. *Soil Use Manage*, Issue 33, pp. 129-140.

Bachmann, J., Woche, S. & Goebel, M.-O., 2003. Extended methodology for determining wetting properties of porous media. *Water Resources Research*, Issue 39.

Ball, B., 2013. Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation. *European Journal of Soil Science*, Issue 64.3, pp. 357-373.

Ball, B., O'sullivan, M. & Hunter, R., 1988. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *Journal of Soil Science*, Issue 39.3, pp. 327-339.

Barta, G., 2014. *Paleoenvironmental reconstruction based on the morphology and distribution of secondary carbonates of the loess-paleosol sequence at Sütto*. s.l.:Quaternary International, Issue 319.

Bäzner, K., 2014. *Entstehung, Eigenschaften und Verbreitung kalkreicher Böden als Beitrag zum Aufbau eines Archivbodenkatasters für das Land Schleswig-Holstein*.. s.l.:s.n.

BBodSchG, 1998. *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten*.. s.l.:Bundesbodenschutzgesetz.

Becze-Deak, J., Langohr, R. & Verrechia, E., 1997. *Small scale secondary CaCO₃ accumulations in selected sections of the European loess belt. Morphological forms and potential for paleoenvironmental reconstruction*. s.l.:Geoderma, Issue 76.

Beetham, P. et al., 2014. Lime stabilisations for earthworks: a UK perspective. *Ground Improvement*, Issue 168, pp. 81-95.

Bennett, J. et al., 2014. Influence of lime and gypsum on long-term rehabilitation of a Red sodosol, in a semi-arid environment of New South Wales. *Soil Res.*, pp. 120-128.

Bérubé, M.-A., Choquette, M. & Locat, J., 1990. Effects of lime on common soil and rock forming minerals. *Applied Clay Science*, pp. 145-163.

Blume, H.-P. et al., 2010. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Blume, H.-P. & Leinweber, P., 2004. *Plaggen Soils: landscape history, properties, and classification*. s.l.:Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Issue 167.

Blume, H.-P., Stahr, K. & Leinweber, P., 2011. *Bodenkundliches Praktikum*. Heidelberg, Germany: Spektrum Akademischer Verlag.

BMEL, 2015. *Welternährung verstehen*. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).

Bohne, H., Hartge, K. & Graf von Reichenbach, H., 1985. Einfluß und Wirkungsweise von CaO bei der Belastung von Aggregaten. *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker-und Festgesteinen*, pp. 672-680.

Bolan, N., Syers, J., Adey, M. & Summer, M., 1996. Origin of the effect of pH on the saturated hydraulic conductivity of non-sodic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Issue 27.

Bracho-Mujica, G., Hayman, P. & Ostendorf, B., 2019. Modelling long-term risk profiles of wheat grain yield with limited climate data. *Agricultural Systems*, Issue 173, pp. 393-402.

Bronick, C. & Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, Issue 124, pp. 3-22.

Burbaum, B. & Filipinski, M., 2006. *Die Böden Schleswig-Holsteins*. Flintbeck: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein.

Chemnitz, C. & Weigelt, J., 2015. *Bodenatlas*. s.l.:s.n.

Chmielewski, J., 2006. *Zwischen Niedermoor und Boden: Pedogenetische Untersuchungen und Klassifikation von mitteleuropäischen Mudden*. s.l.: Humboldt-Universität zu Berlin.

Czeratzki, W., 1957. Untersuchungen über Krümelstabilität in einem Kalkversuch. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, Issue 78.2-3, pp. 121-135.

Czeratzki, W., 1972. Die Beeinflussung von Aggregatstabilität, Plastizität und Wasserbindung bei der Bodenstabilisierung durch mittlere und hohe Gaben von Kalkhydrat. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Issue 133.1-2, pp. 45-53.

de Jonge, L., Moldrup, P. & Jacobsen, O., 2007. Soil-water content dependency of water repellency in soils: Effect of crop type, soil management, and physical-chemical parameters. *Soil Science*, Issue 172, pp. 577-588.

Dexter, A., 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, Issue 11, pp. 199-238.

Diehl, D. et al., 2010. Reaction of soil water repellency to artificially induced changes in soil pH. *Geoderma*, Issue 158, pp. 375-384.

DIN ISO 11277, 2002. Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentatio (DIN ISO 11277). *Handbuch der Bodenuntersuchungen*.

Dörner, J. et al., 2012. Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage. *Soil and Tillage Research*, Issue 125, pp. 52-60.

Elert, K., Nieto, F. & Azanon, J., 2017. Effects of lime treatments on marls. *Applied Clay Science*, Issue 135, pp. 611-619.

Ellies, A., Hartge, K. & Nissen, J., 1978. Die Wirkung von Branntkalk auf den Wasserhaushalt eines vulkanischen Aschebodens aus Südmale (Trumao) im Gefäßversuch. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Issue 141, pp. 597-606.

Ferreira, T. et al., 2018. X-ray microtomography analysis of lime application effects on soil porous system. *Geoderma*, Issue 324, pp. 119-130.

Fiedler, H., 2001. *Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten*. s.l.:Expert Verlag.

Fish, A. & Koppi, A., 1994. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. *Geoderma*, Issue 63.3-4, pp. 155-264.

Flühler, H., 1972. *Sauerstofftransport im Boden*. s.l.:Diss. ETH Zürich.

Fuentes, J. et al., 2006. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. *Soil & Tillage Research*, Issue 88, pp. 123-131.

Gallage, C., Kodikara, J. & Uchimura, T., 2013. Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes. *Soils and Foundations*, Issue 53, pp. 417-430.

Gehring, A., 1929. Über die Veränderung einiger physikalischer Eigenschaften des Bodens unter dem Einfluß von Kalk. *Mitteilung aus der Landwirtschaftlichen Versuchsstation Braunschweig*, pp. 239-254.

Giani, L., Kücks, U. & Straatmann, M., 1996. *Genese und Klassifikation von Organomarschen der Wesermarsch*. s.l.:Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Issue 160.

Gliniski, J. & Stepniewski, W., 1985. *Soil Aeration and its Role for Plants*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Goy, S., 1930. Über die Wirkung und Wirkungsgeschwindigkeit von kohlensaurem Kalk im Felde und die Einzelkennziffern des Säurezustandes des Bodens. *Mitteilung der landwirtschaftlichen Versuchsstation Königsberg*, pp. 165-176.

Goy, S., 1947. Welche Kalkgaben sind die zweckmäßigsten ?. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*.

Greiten, U., 2013. *Plaggenesch, ein Boden Norddeutschlands mit hoher Archivfunktion am Beispiel der Stadt Osnabrück*. s.l.:Bodenschutz. Nutzung, Erhaltung und Wiederherstellung von Böden.

Groenevelt, P., Kay, B. & Grant, C., 1984. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma*, Issue 34.2, pp. 101-114.

Haas, C. et al., 2018. Relating soil organic matter composition to soil water repellency for soil biopore surfaces different in history from two Bt horizons of a Haplic Luvisol. *Ecohydrology*, September.

Hallett, P., Baumgartl, T. & Young, I., 2001. Subcritical Water Repellency of Aggregates from a Range of Soil Management Practices. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 65, pp. 184-190.

Hallett, P., Nunan, N., Douglas, J. & Young, I., 2004. Millimeter-Scale Spatial Variability in Soil Water Sorptivity: Scale, Surface Elevation, and Subcritical Repellency Effects. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 68, pp. 352-358.

Hartge, K., 1966. Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung*, pp. 155-163.

Hartge, K., 1977. Mechanismen der Aggregatstabilisierung in einem Tonboden mittels Branntkalk. *Geoderma*, pp. 47-55.

Hartge, K. & Ellies, A., 1977. Mechanismen der Aggregatstabilisierung in einem Tonboden mittels Kalkung. *Geoderma*, Issue 17, pp. 47-55.

Hartge, K. & Horn, R., 2009. *Die physikalische Untersuchung von Böden*. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

Hartge, K. & Horn, R., 2014. *Einführung in die Bodenphysik*. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers.

Hassan, M., Woche, S. & Bachmann, J., 2014. How the root zone modifies soil wettability: Model experiments with alfalfa and wheat. *Journal and Plant Nutrition and Soil Science*, Issue 177, pp. 448-458.

Haynes, R. & Naidu, R., 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Issue 51, pp. 123-137.

Hellner, Q., Koestel, J., Ulen, B. & Larsbo, M., 2018. Effects of tillage and liming on macropore networks derived from X-ray tomography images of a silty clay soil. *Soil Use and Management*, Issue 34, pp. 197-205.

Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press.

Holland, J. et al., 2018. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review. *The Science of the total environment*, Issue 610-611, pp. 316-332.

Holthusen, D. & Fleige, H., 2012. *Ausweisung von potenziellen Flächen mit besonderer Archivfunktion des Bodens – hier Archivböden der Marsch*. Kiel: s.n.

Holthusen, D., Jänicke, M., Peth, S. & Horn, R., 2012. Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: I. Mesoscale capacity and intensity parameters. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Issue 175, pp. 4-13.

Horn, R., Fleige, H. & Zimmermann, I., 2018. Soil texture and structure: role in soil health.. In: D. Reicosky, Hrsg. *Managing soil health for sustainable agriculture Volume 1: Fundamentals*. s.l.:Burleigh Dodds Science Publishing Limited.

Horn, R. & Smucker, A., 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil & Tillage Research*, Issue 82, pp. 5-14.

Horn, R. & Stépniowski, W., 2004. Modification of mineral liner to improve its long-term stability. *International agrophysics*, pp. 317-324.

Hoyt, P., 1981. Improvements in soil tilth and rapeseed emergence by lime applications on acid soils in the peace river region. *Canadian Journal of Soil Science*, Issue 61, pp. 91-98.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of WorkingGroups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genf: IPCC.

Jacobs, A. et al., 2018. *Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.

Janetzko, P. & Fleige, H., 2010. *Watten und Marschen Nordwestdeutschlands, Teil SchleswigHolstein*. s.l.: H. P. Blume, P. Felix-Henningsen, H.-G. Fredeet al (ed.): Handbuch der Bodenkunde. Ecomed, Landsberg.

Jaskulska, I., Jaskulski, D. & Kobierski, M., 2014. Effect of liming on the change of some agrochemical soil properties in a long-term fertilization experiment. *Plant, Soil and Environment*, Issue 60, pp. 146-150.

Jirku, V. et al., 2013. Temporal variability of structure and hydraulic properties of topsoil of three soil types. *Geoderma*, Issue 204-205, pp. 43-58.

Kaczorek, D. & Zagorski, Z., 2007. *MICROMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE Bsm HORIZON IN SOILS WITH BOG IRON ORE*. s.l.:Polish Journal of Soil Science.

Kage, H. & Rose, T., 2019. Ertragsfortschritte bei Winterweizen. *Getreidemagazin*, Issue 4, pp. 48-51.

Keiblinger, K. et al., 2016. Quicklime application instantly increases soil aggregate stability. *International Agrophysics*, Issue 30.1, pp. 123-128.

Keller, T. et al., 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Research*.

Kerschberger, M. et al., 2000. Standpunkt Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten*.

Kirkham, J., Rowe, B. & Doyle, R., 2007. Persistent improvements in the structure and hydraulic conductivity of a ferrosol due to liming. *Australian Journal of Soil Research*, pp. 218-223.

Krüger, K. et al., 2011. *Neues zu den Böden der Marsch - Profilprägende Prozesse, Merkmale und Kennzeichnung*. s.l.: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen, 3. - 9. September 2011, Berlin. Jahrestagung der DBG, Kommission V.

Kuhwald, M., 2013. *Archivböden in Schleswig-Holstein: Analyse zur potenziellen Verbreitung des Bodentyps Plaggenesch*. Kiel: Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Kuncoro, P., Koga, K., Satta, N. & Muto, Y., 2014. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. *Soil & Tillage Research*, Issue 143, pp. 172-179.

Kuntze, H., 2014. *Marschkultur. Handbuch der Bodenkunde*.

Kuznetsova, A. & Khokhlova, O., 2012. *Submicromorphology of pedogenic carbonate accumulations as a proxy of modern and paleoenvironmental conditions*. s.l.: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Issue 64.

LABO, 2011. *Auf Spurensuche - Archivböden..* s.l.: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz..

Lausen, P., 2012. Kalkung wird oft vernachlässigt. *Bauernblatt*, pp. 34-39.

Lausen, P. & Gosch, K., 2012. Kalkung wird oft vernachlässigt. *Bauernblatt*.

Lazar, S. & Schippers, B., 2011. *Archivböden. Empfehlungen zur Bewertung und zum Schutz von Böden mit besonderer Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte*. Aachen: LABO - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz.

Li, F., Yang, S. & Peng, C., 2010. Effects of Domestic Sewage Water and Ameliorant Effectiveness on Soil Hydraulic Conductivity. *Soil Science of America Journal*, Issue 74, pp. 461-468.

Mahanta, K., Mishra, G. & Kansal, M., 2014. Estimation of the electric double layer thickness in the presence of two types of ions in soil water. *Applied Clay Science*, pp. 212-218.

Makowsky, L., Mueller, K. & Giani, L., 2013. *Steckbrief Boden: Plaggenesch..* s.l.: Bodenschutz, Nutzung, Erhaltung und Wiederherstellung von Böden.

Marks, R., 1941. Vergleichende Untersuchungen über die Bestimmung des Kalkbedarfs im Boden. *Aus dem Agrikulturchemischen Institut der Universität Jena*, pp. 369-384.

Marsi, M. & Evangelou, P., 1991. Chemical and physical behavior of two kentucky soils: III. Saturated hydraulic conductivity - imhoff cone test relationships. *Journal of Environmental Science and Health*.

Maubec, N., Deneele, D. & Ouvrard, G., 2017. Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material. *Applied Clay Science*, Issue 137, pp. 107-114.

Metelková, Z., Bohác, J., Prikryl, R. & Sedlářová, I., 2012. Maturation of loess treated with variable lime admixture: Pore space textural evolution and related phase changes. *Applied clay science*, pp. 47-53.

Monger, C., 2002. *Pedogenic Carbonate: links between biotic and abiotic CaCO₃*. s.l.:17th WCSS, 14.-21. August 2002, Thailand; Symposium no. 20.

Mordhorst, A., Unveröffentlicht. *Validierung von potenziellen Archivböden Schleswig-Holsteins im Gelände*. Kiel: Internes Seminar der Abteilung für Bodenkunde, CAU Kiel. .

Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H. & Horn, R., 2017. Changes in soil aeration and soil respiration of simulated grave soils after quicklime application. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.

Mordhorst, A., Zimmermann, I., Fleige, H. & Horn, R., 2018. Improvement of oxygen transport functions in grave soils due to quicklime application depending on soil texture. *Geoderma*, pp. 18-28.

Mückenhausen, E., Scharpenseel, W. & Pietig, F., 1968. *Zum Alter des Plaggeneschs*. s.l.:Eiszeitalter und Gegenwart.

Müller, K. & Deurer, M., 2011. Review of the remediation strategies for soil water repellency. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Issue 144, pp. 208-221.

Müller, W. & Benzler, J.-H., 1971. *Böden der Marschen Niedersachsens - insbesondere der Elbmarsch*. s.l.:Mitteilung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Issue 13.

Orfanus, T. et al., 2014. How severe and subcritical water repellency determines the seasonal infiltration in natural and cultivated sandy soils. *Soil & Tillage Research*, Issue 135, pp. 49-59.

Pagani, A. & Mallarino, A., 2012. Soil pH and Crop Grain Yield as Affected by the Source and Rate of Lime. *Soil Science Society of America Journal*.

Paradelo, R., Virto, I. & Chenu, C., 2015. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Issue 202, pp. 98-107.

Pell, M., Stenström, J. & Granhall, U., 2005. Soil Respiration. *Microbiological Methods for Assessing Soil Quality*, pp. 117-127.

Peth, S., 2004. *Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten*. Kiel: Diss. Universität Kiel.

Plagge, R., 1991. *Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Boden*. Berlin: TU Berlin.

Pomakhina, E. et al., 2012. Si solid state NMR investigation of pozzolanic reaction occurring in lime-treated Ca-bentonite. *Cement and Concrete Research*, Issue 42, pp. 626-632.

R Core Team, 2016. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Wien, Österreich: R Foundation for Statistical Computing.

Rajasekaran, G. & Narasimha Rao, S., 2002. Permeability characteristics of lime treated marine clay. *Ocean Engineering*, Issue 29, pp. 113-127.

Rolston, D. & Moldrup, P., 2002. Gas Diffusivity. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, pp. 1113-1139.

Roper, M., 2005. Managing soils to enhance the potential for bioremediation of water repellency. *Australian Journal of Soil Research*, Issue 43, pp. 803-810.

Schack-Kirchner, H. & Hildebrand, E., 1998. Changes in soil structure and aeration due to liming and acid irrigation. *Plant and Soil*, Issue 199, pp. 167-176.

Schäfer, W. et al., 2010. *Sulfatsaure Böden in niedersächsischen Küstengebieten*. s.l.:Geofakten, Issue 24.

Schlichting, E., Blume, H.-P. & Stahr, K., 1995. *Bodenkundliches Praktikum*. Berlin, Wien: Blackwell Wissenschafts-verlag.

Schwertmann, U., 1961. *Über das Vorkommen und die Entstehung von Jarosit in Marschböden (Maibolt)*. s.l.:Naturwissenschaften, Issue 45.

Sittschick, H. et al., 2005. *Raseneisenerz – auch in Brandenburg ein mineralischer Rohstoff mit bedeutender wirtschaftlicher Vergangenheit*. s.l.: Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge.

Sommer, C., 1972. „Modellversuche über den Einfluß hoher Kalkgaben auf die Verdichtbarkeit eines Bodens. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Issue 15, pp. 65-72.

Stepniewski, W., Ball, B., Soane, B. & van Ouwerkerk, C., 1994. Effects of compaction on soil aeration properties. *Soil compaction in crop production*, pp. 167-189.

Stepniewski, W. & Stepniewska, Z., 2009. Selected oxygen-dependent process-Response to soil management and tillage. *Soil and Tillage Research*, Issue 102.2, pp. 193-200.

Stoltz, G., Cuisinier, O. & Masrouri, F., 2012. Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil. *Applied clay science*, Issue 61, pp. 44-51.

Szatanik-Kloc, A. et al., 2018. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. *Soil & Tillage Research*, Issue 175, pp. 226-233.

Topp, G., Galganov, Y. & Ball, B., 1993. Soil water desorption curves. *Canadian Journal of Soil Science*.

Umwelt, M. f., 1999. *Landschaftsprogramm Schleswig-Holstein*. s.l.:Ministerium für Umwelt, N. u. F..

Uteau, D., Pagenkemper, S., Peth, S. & Horn, R., 2013. Root and time dependent soil structure formation and its influence on gas transport in the subsoil. *Soil and Tillage Research*, Issue 132, pp. 69-76.

van Genuchten, M., Leij, F. & Yates, S., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. *Environmental Research Laboratory*.

VDLUFA, 2000. *Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden*. s.l.:Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten.

Villagra-Mendoza, K. & Horn, R., 2018. Effect of biochar on the unsaturated hydraulic conductivity of two amended soils. *International Agrophysics*, Issue 32, pp. 373-378.

Wang, Y. et al., 2017. Effects of aggregate size on the compressibility and air permeability of lime-treated fine-grained soil. *Engineering Geology*, Issue 228, pp. 167-172.

Widomski, M. et al., 2015. Shrink-swell potential, hydraulic conductivity and geotechnical properties of clay materials for landfill liner construction. *International Agrophysics*, Issue 29, pp. 365-375.

Witt, K., 2002. Zement–Kalk–Stabilisierung von Böden. *Geotechnik Seminar Weimar*.

Wollny, E., 1898. *Forschung Agrikulturphysik*. s.l.:s.n.

Wuddivira, M. & Camps-Roach, G., 2007. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *European Journal of Soil Science*, Issue 58, pp. 722-727.

Yilmaz, K., Celik, I., Kapur, S. & Ryan, J., 2005. Clay minerals, Ca/Mg ratio and Fe-Al-oxides in Clay minerals, Ca/Mg ratio and Fe-Al-oxides in relation to structural stability, hydraulic conductivity and soil erosion in Southeastern Turkey soil erosion in Southeastern Turkey. *Turk. J. Agric. For.*, Issue 29, pp. 29-37.

Zhao, H. et al., 2015. Reexamination of Lime Stabilization Mechanisms of Expansive Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Issue 27.

Zimdahl, R., 2015. *Six Chemicals That Changed Agriculture*. s.l.:Elsevier Inc..

Zimmermann, I., Fleige, H. & Horn, R., 2016. Soil structure amelioration with quicklime and irrigation experiments in earth graves. *Journal of Soils and Sediments*.

A Anhang:

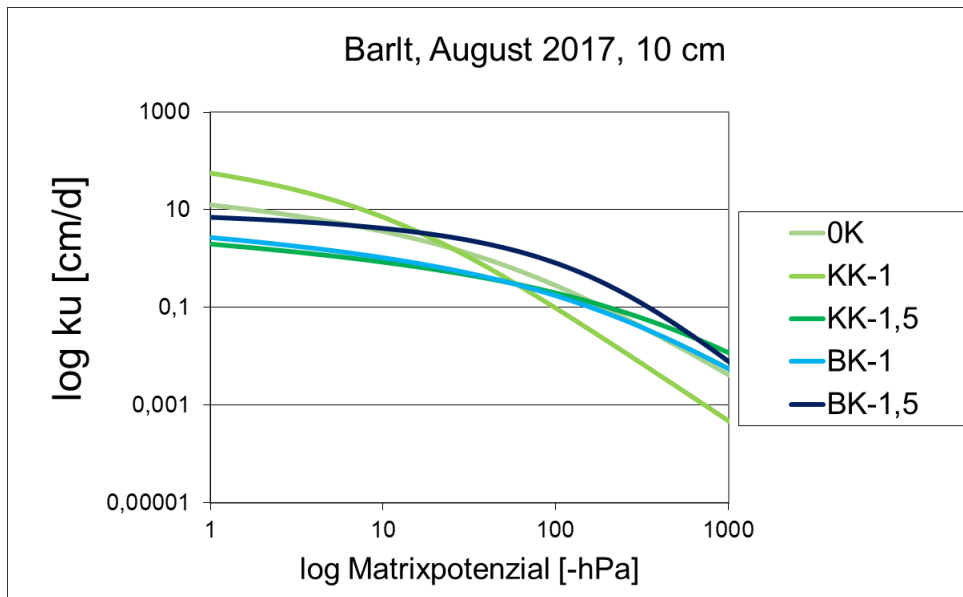


Abbildung 35 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

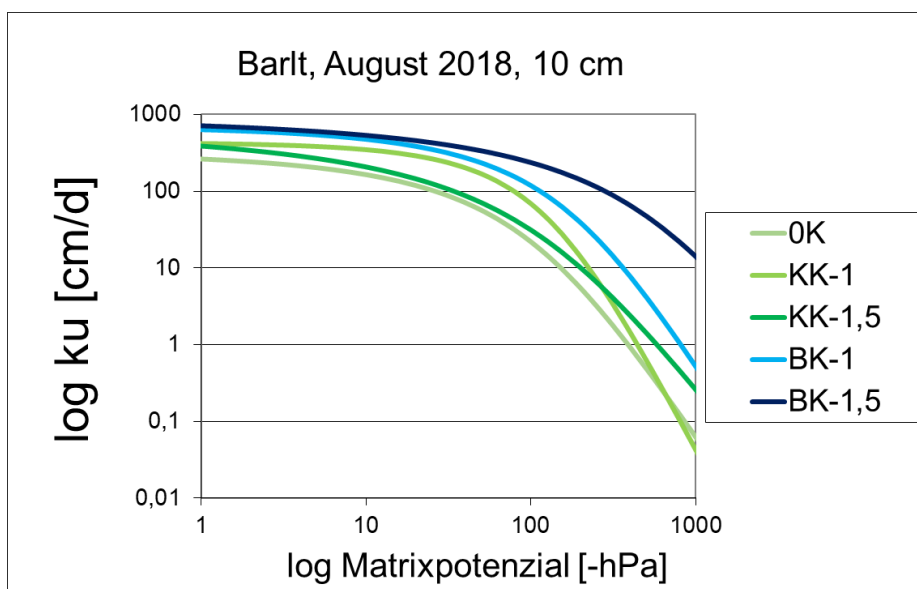


Abbildung 36 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

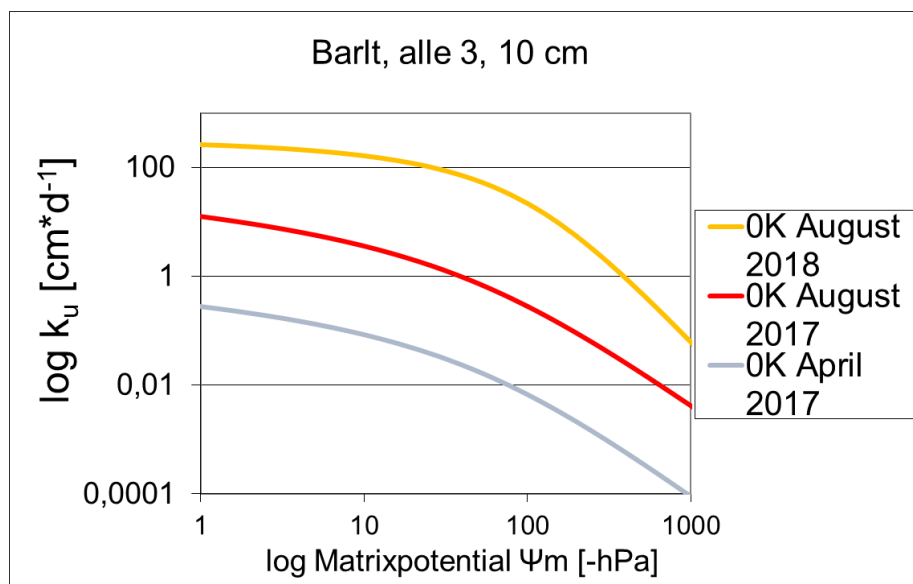


Abbildung 37 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante 0K (Nullkalk Referenz) für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

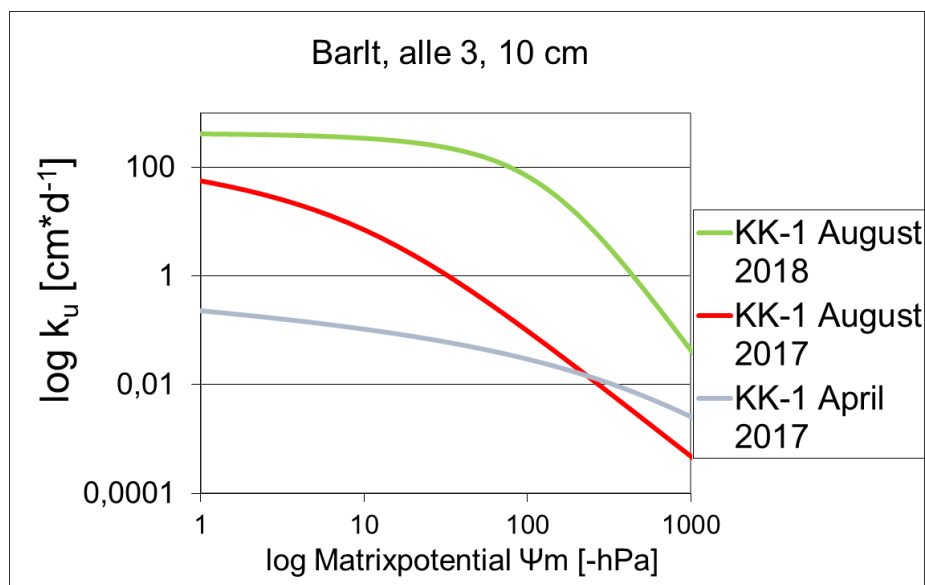


Abbildung 38 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante KK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

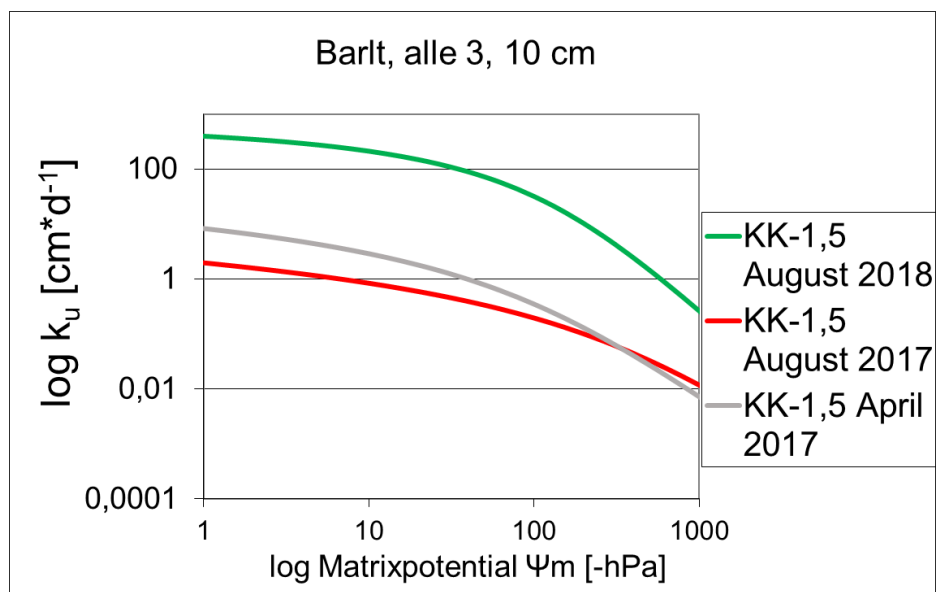


Abbildung 39 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante KK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

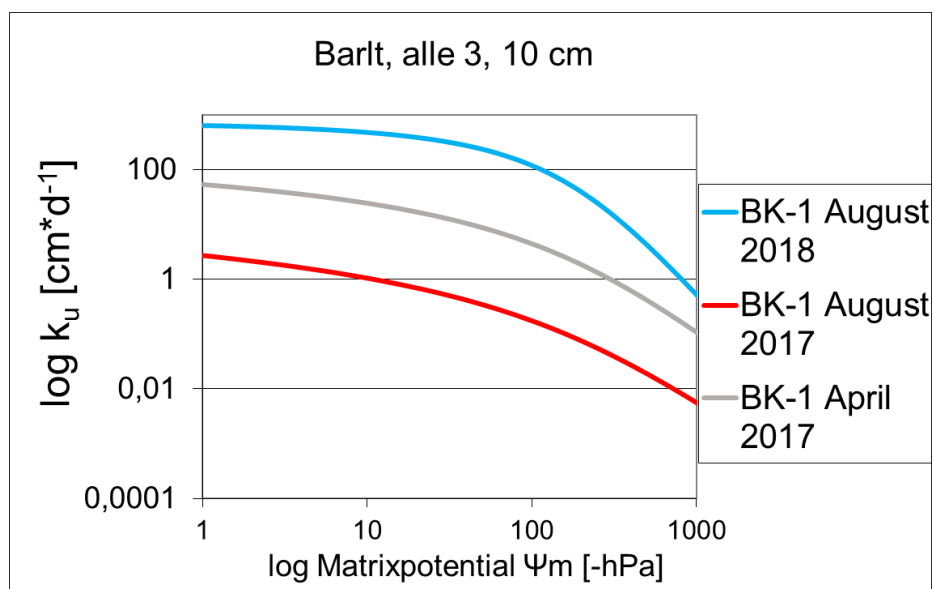


Abbildung 40 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante BK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

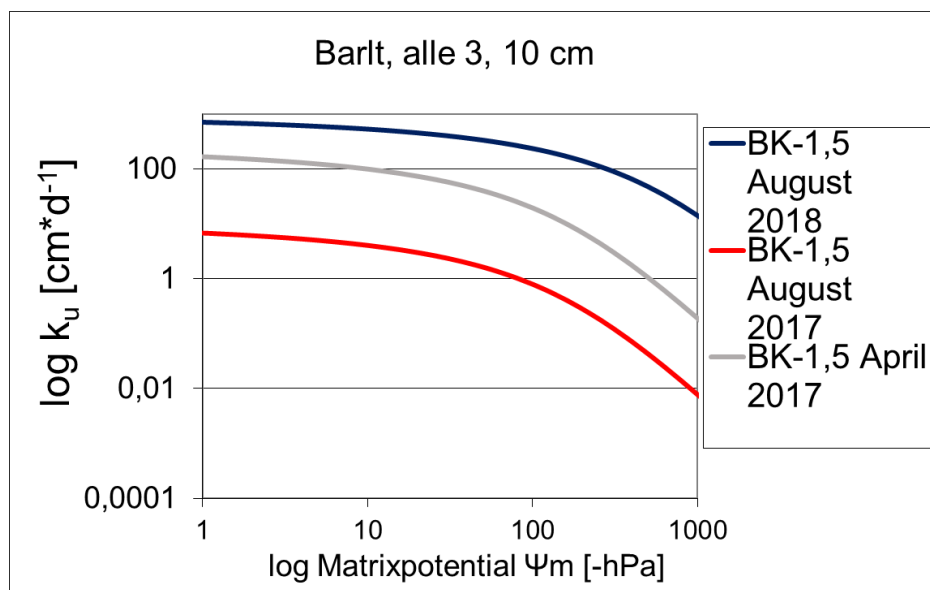


Abbildung 41 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 10 cm Tiefe für die Variante BK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

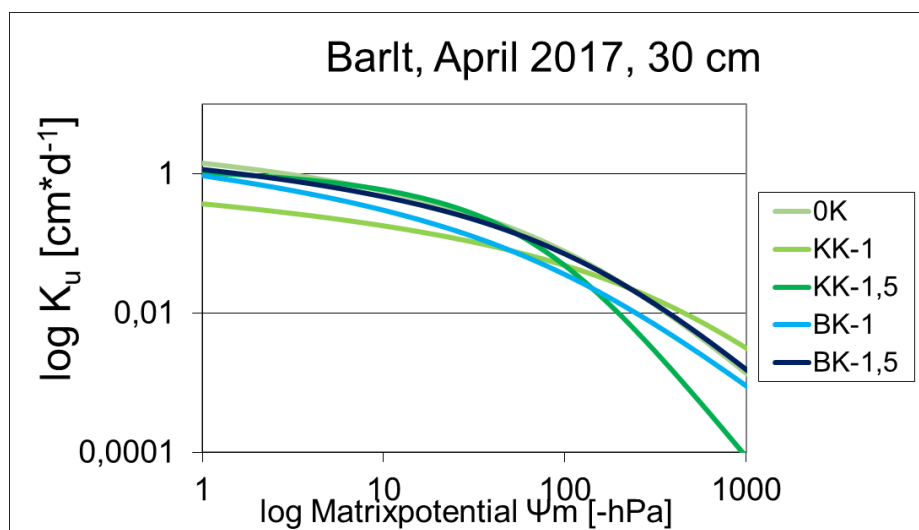


Abbildung 42 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

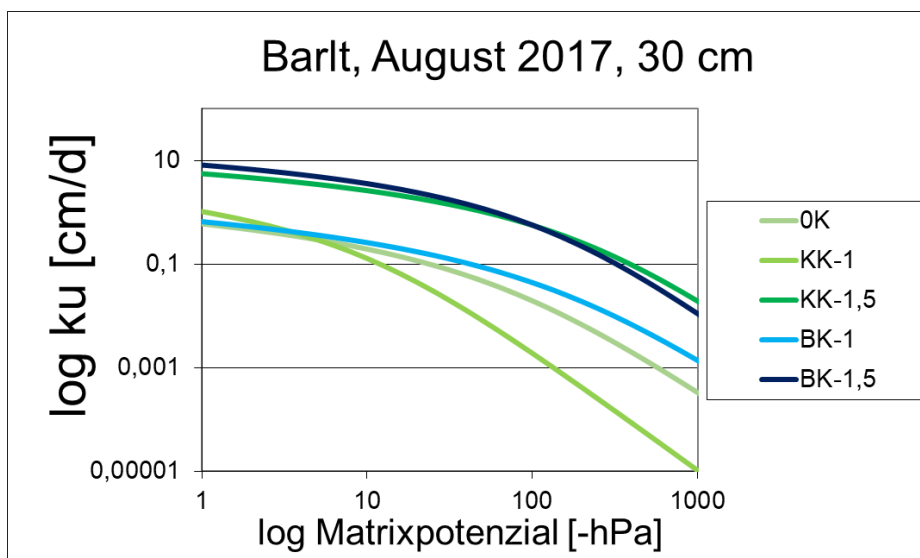


Abbildung 43 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

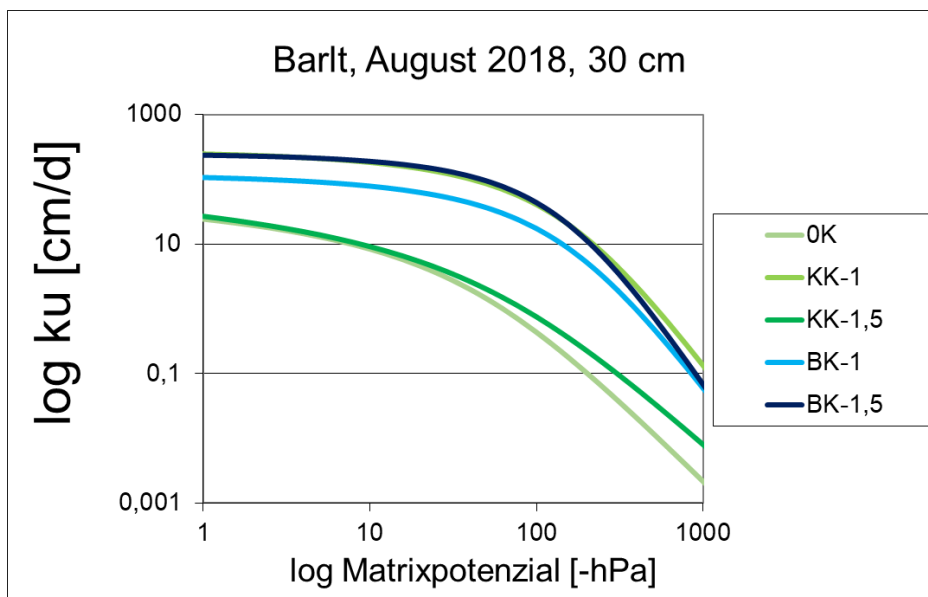


Abbildung 44 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe, 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

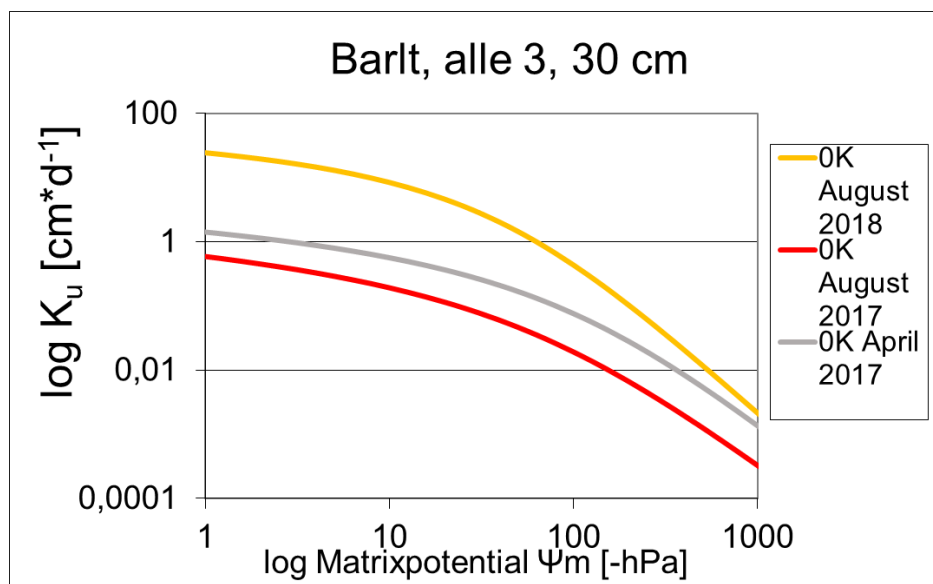


Abbildung 45 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante OK (Nullkalk Referenz) für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

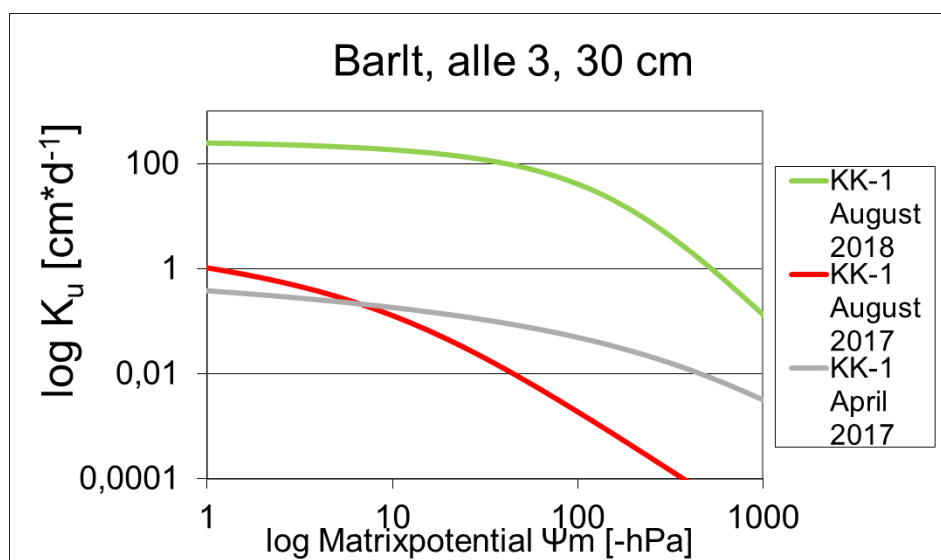


Abbildung 46 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante KK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

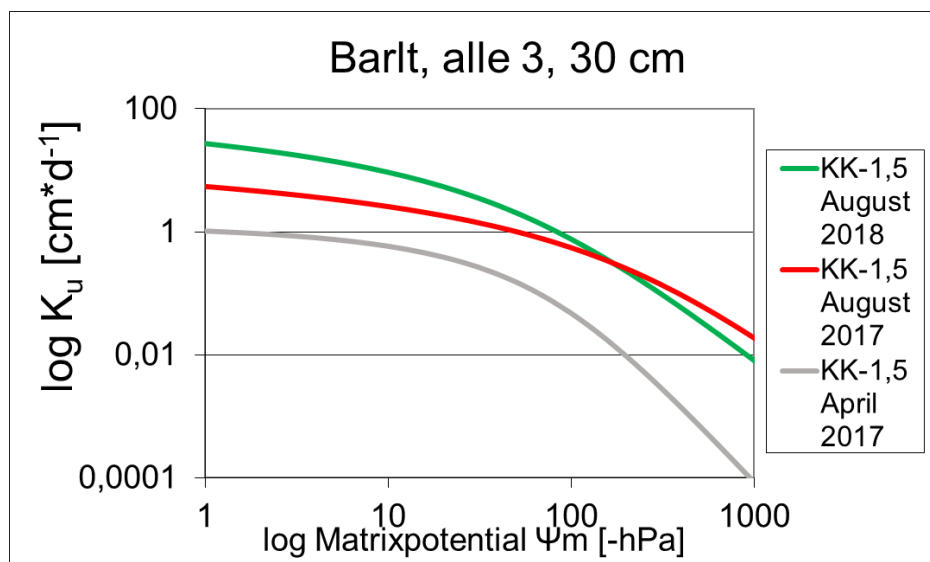


Abbildung 47 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante KK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

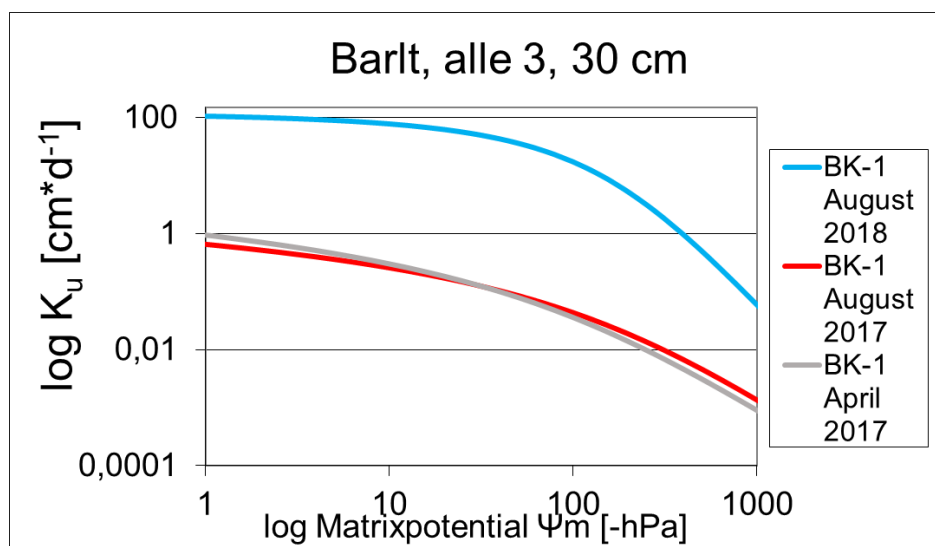


Abbildung 48 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante BK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

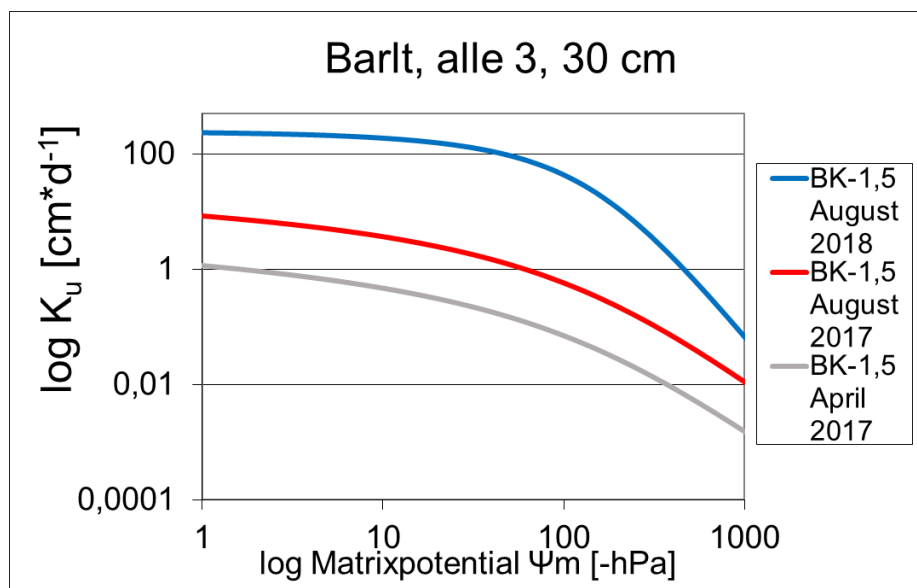


Abbildung 49 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Barlt in 30 cm Tiefe für die Variante BK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 24 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

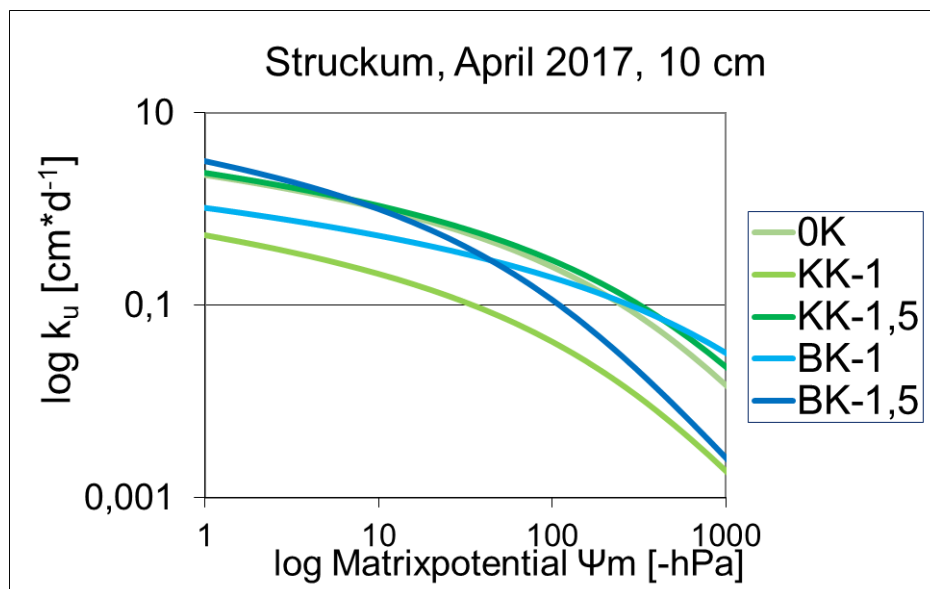


Abbildung 50 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

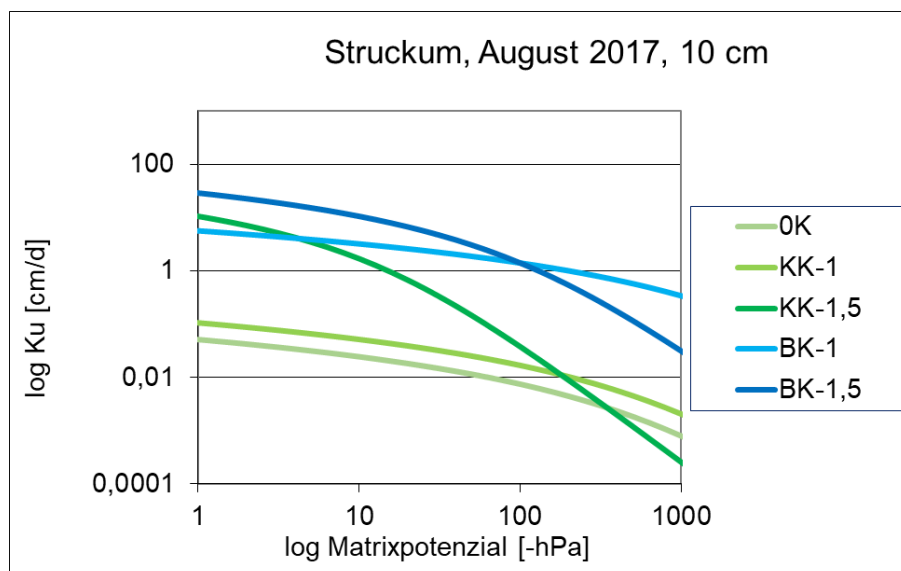


Abbildung 51 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

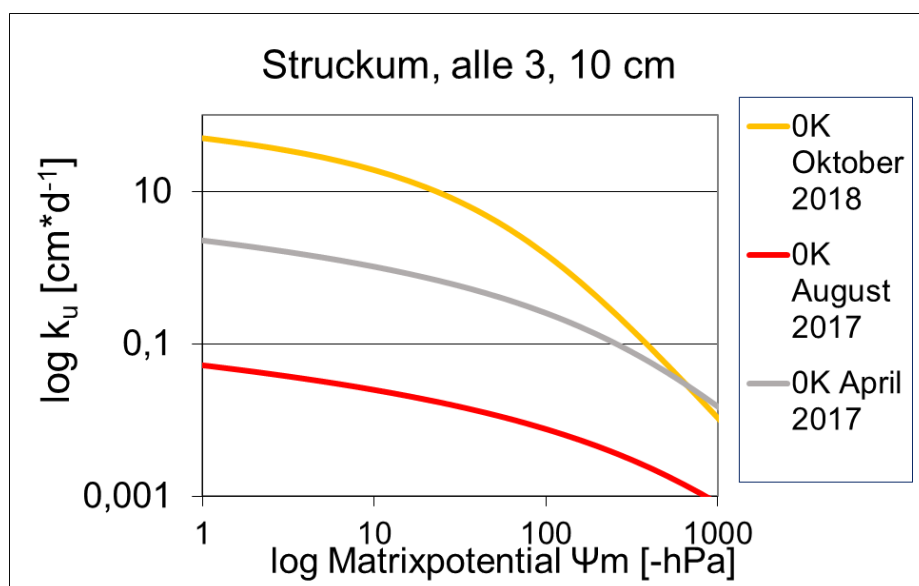


Abbildung 52 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante 0K (Nullkalk Referenz) für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

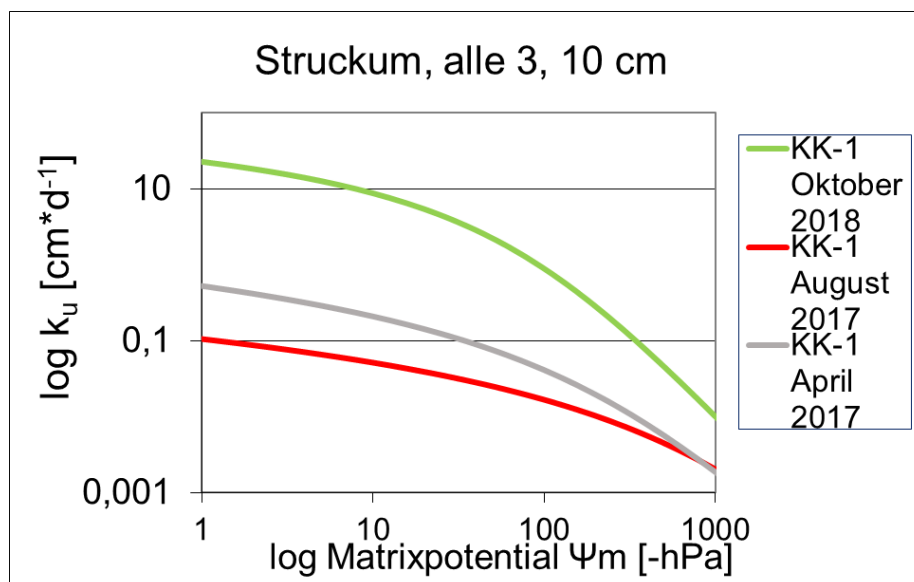


Abbildung 53 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante KK-1, für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

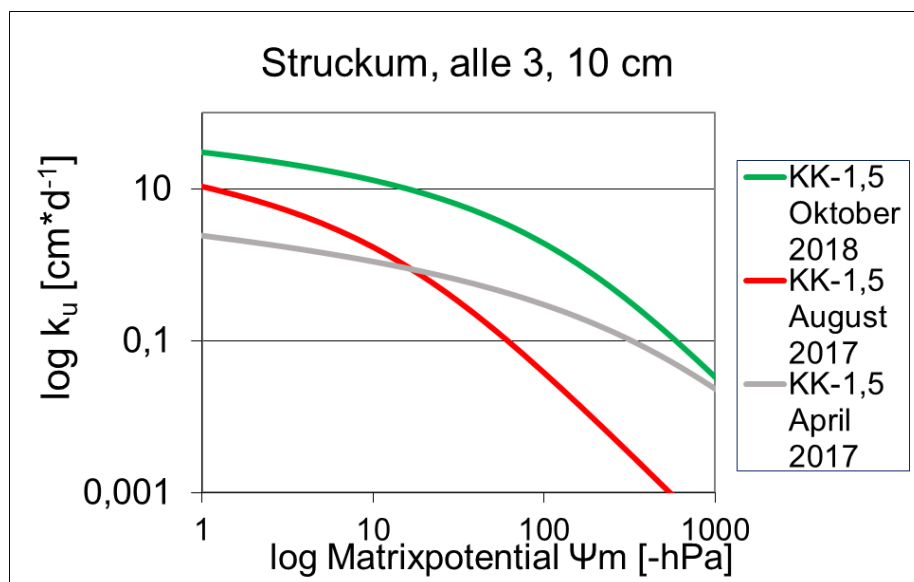


Abbildung 54 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante KK-1,5; für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

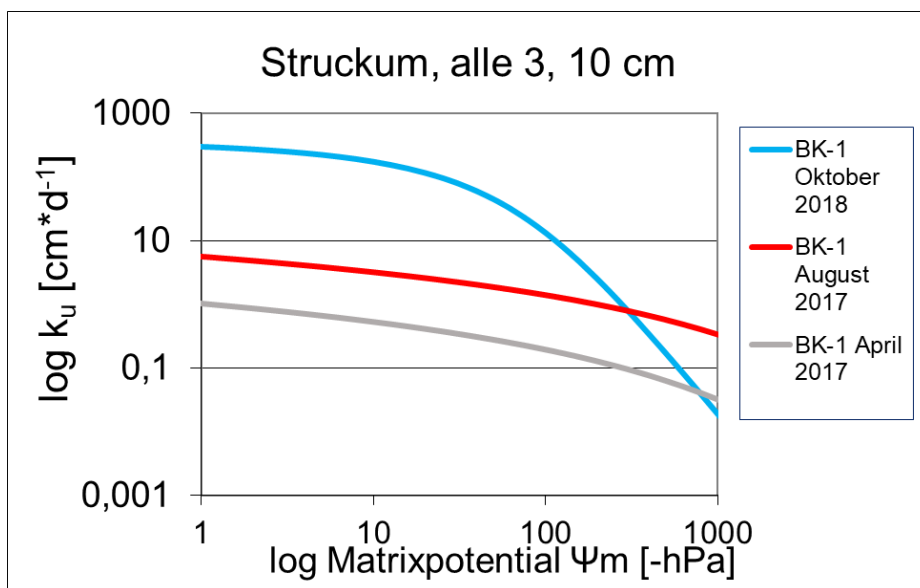


Abbildung 55 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante BK-1, für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

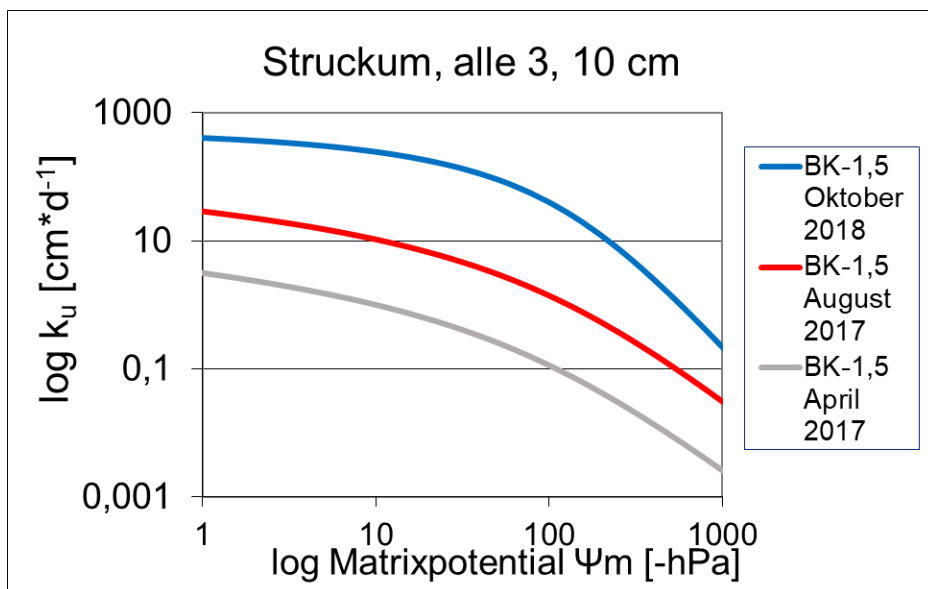


Abbildung 56 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 10 cm Tiefe für die Variante BK-1,5; für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

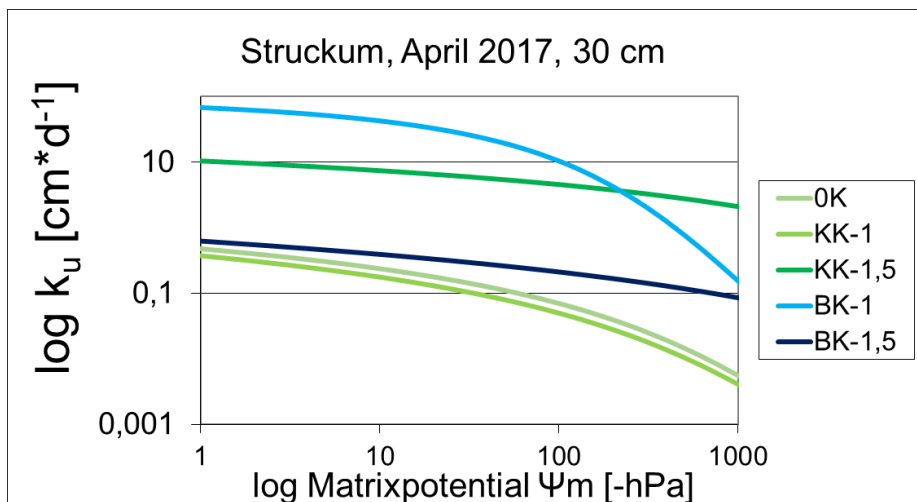


Abbildung 57 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

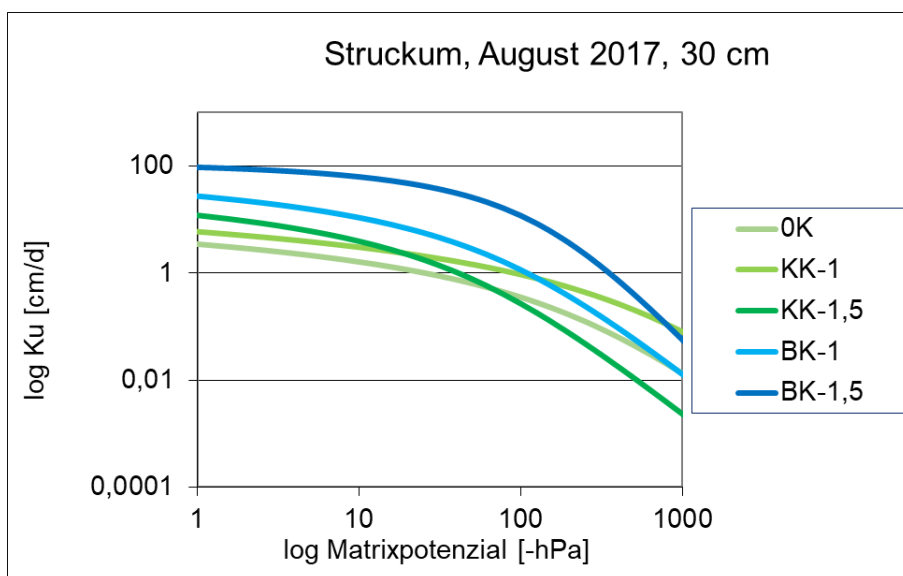


Abbildung 58 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

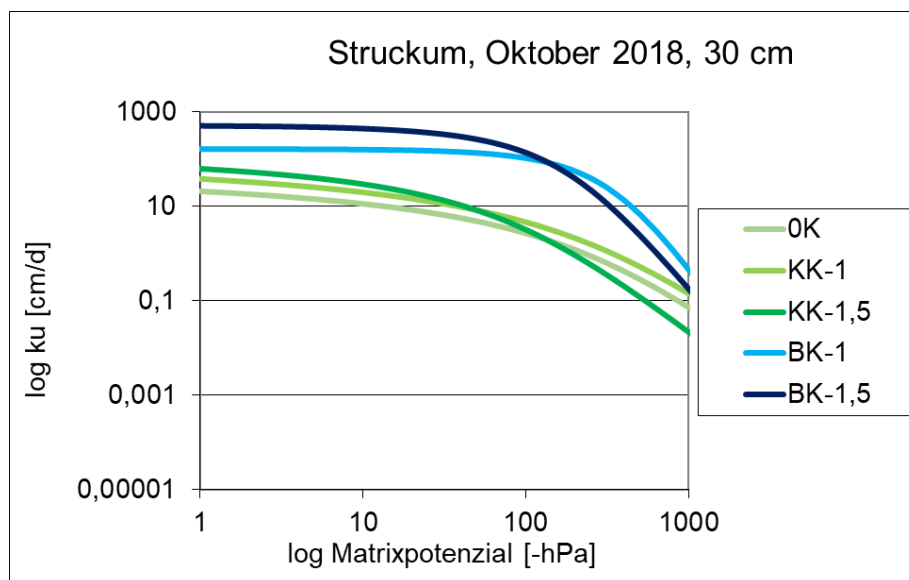


Abbildung 59 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm^*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe, 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

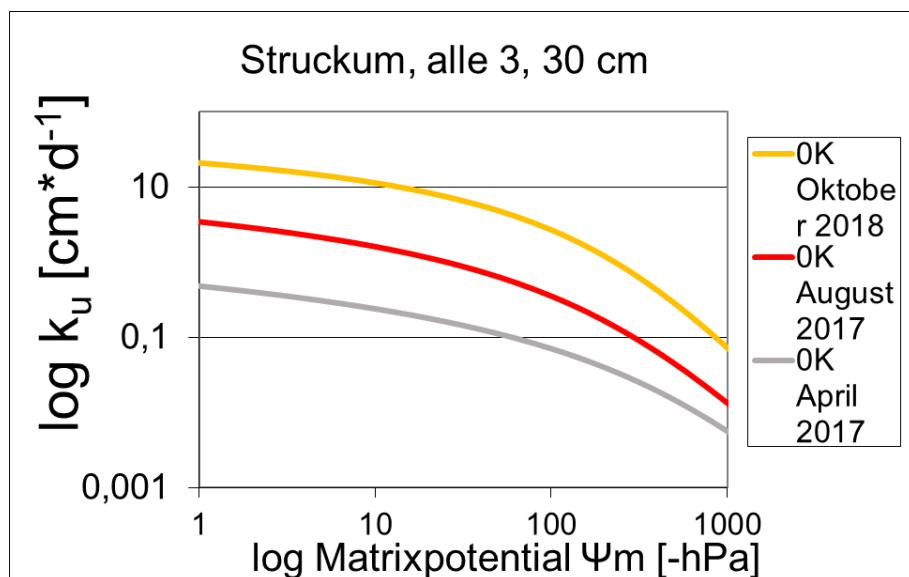


Abbildung 60 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in cm^*d) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante 0K (Nullkalk Referenz) für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

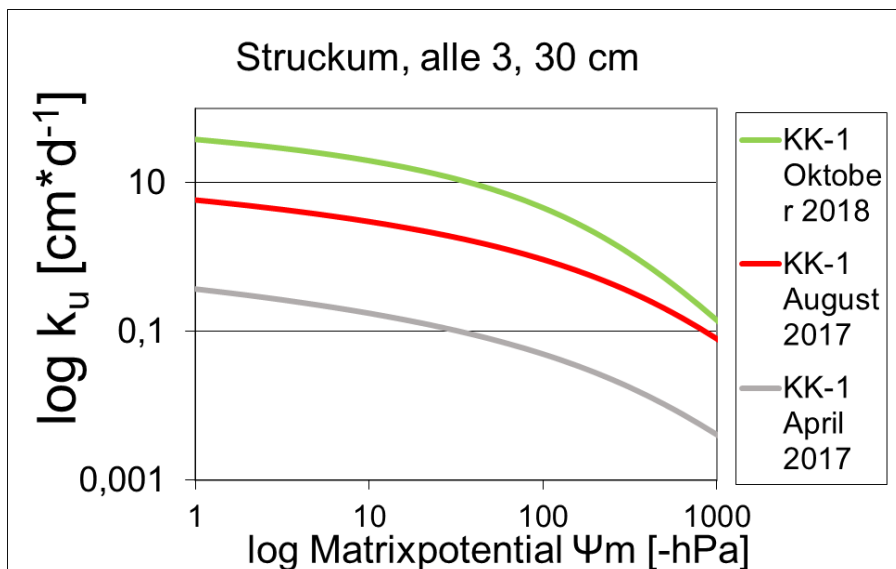


Abbildung 61 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante KK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

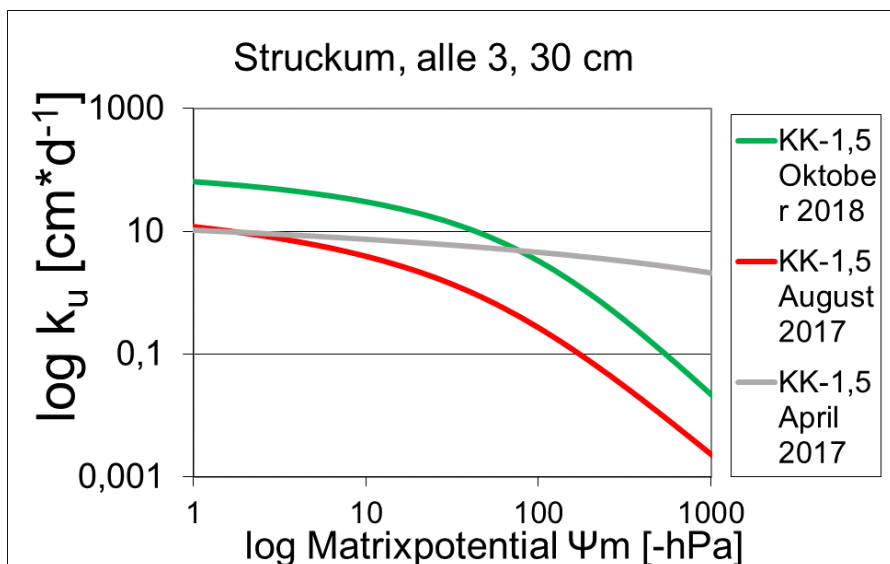


Abbildung 62 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante KK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

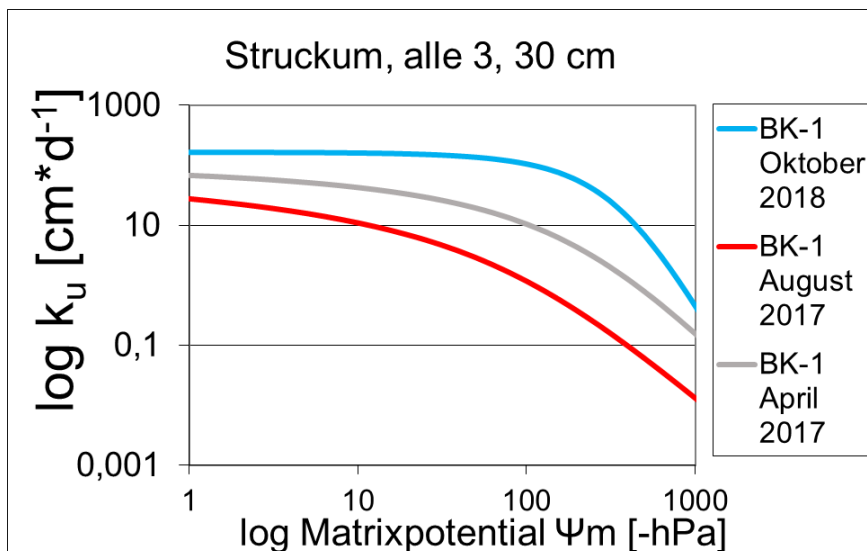


Abbildung 63 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante BK-1 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

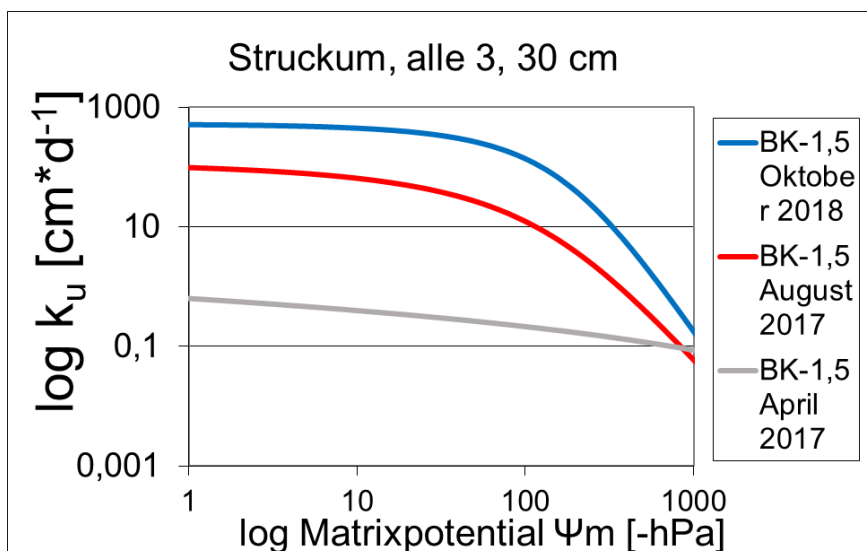


Abbildung 64 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (in $\text{cm} \cdot \text{d}$) am Standort Struckum in 30 cm Tiefe für die Variante BK-1,5 für alle 3 Probenahmen 7, 12 und 26 Monate nach Kalkung, $n = 4$.

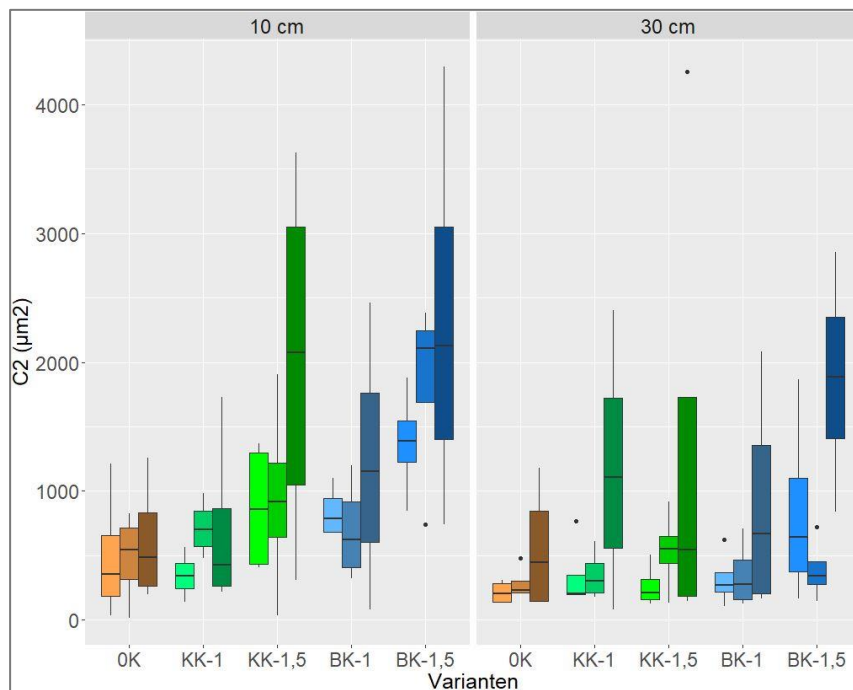


Abbildung 65 C₂ Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; n= 4.

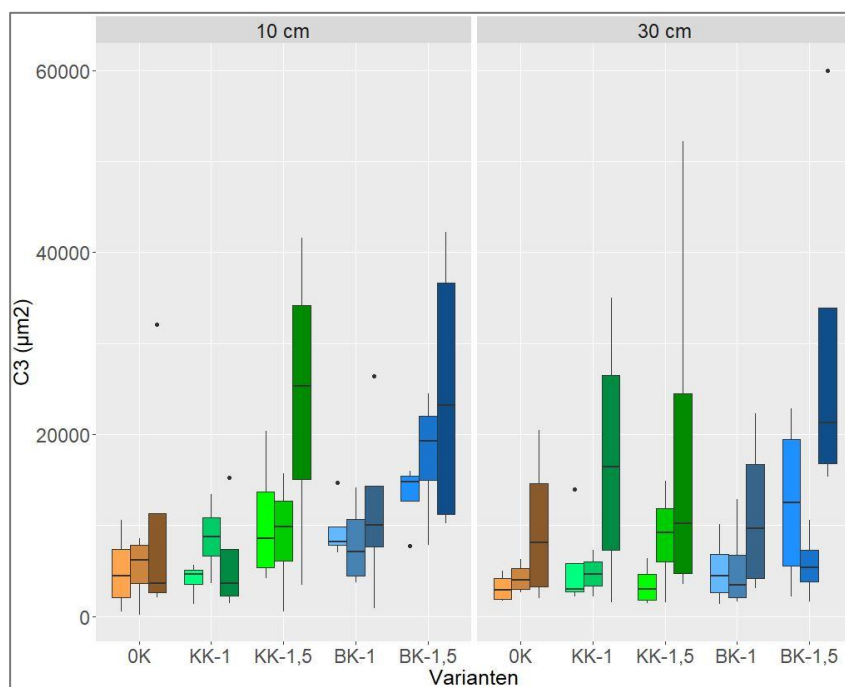


Abbildung 66 C₃ Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmeterminen; n= 4.

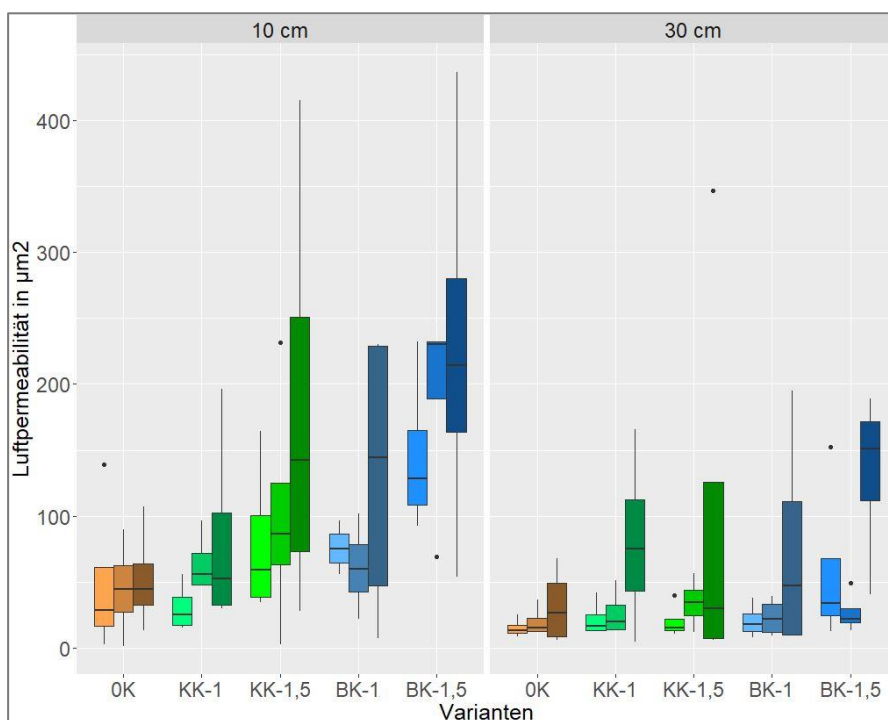


Abbildung 67 Luftpermeabilität (in μm^2), $\Psi_m = -60 \text{ hPa}$, Standort Barlt, 3 Probenahmen (7, 12 und 24 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine; $n=4$.

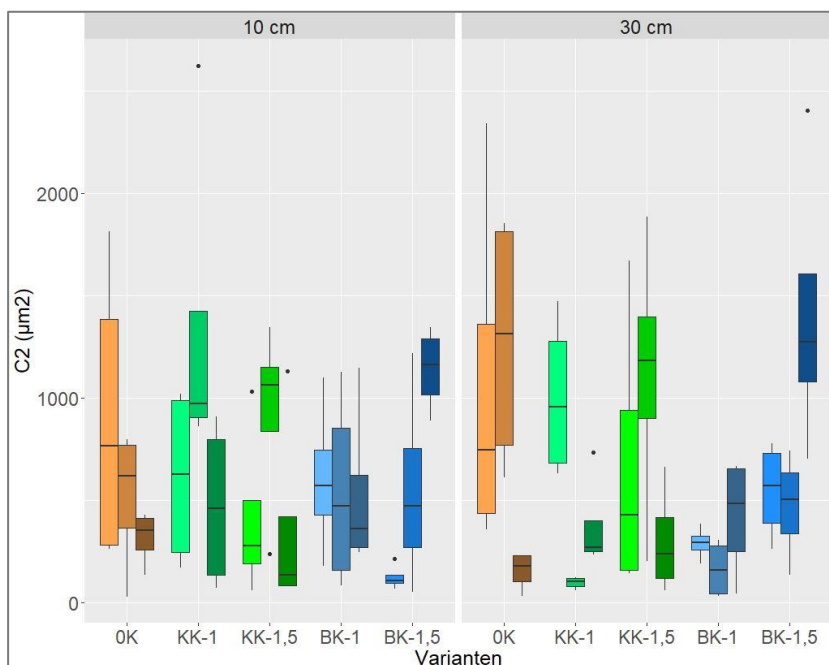


Abbildung 68 C_2 Indices [-], $\Psi_m = -60 \text{ hPa}$, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine; $n=4$.

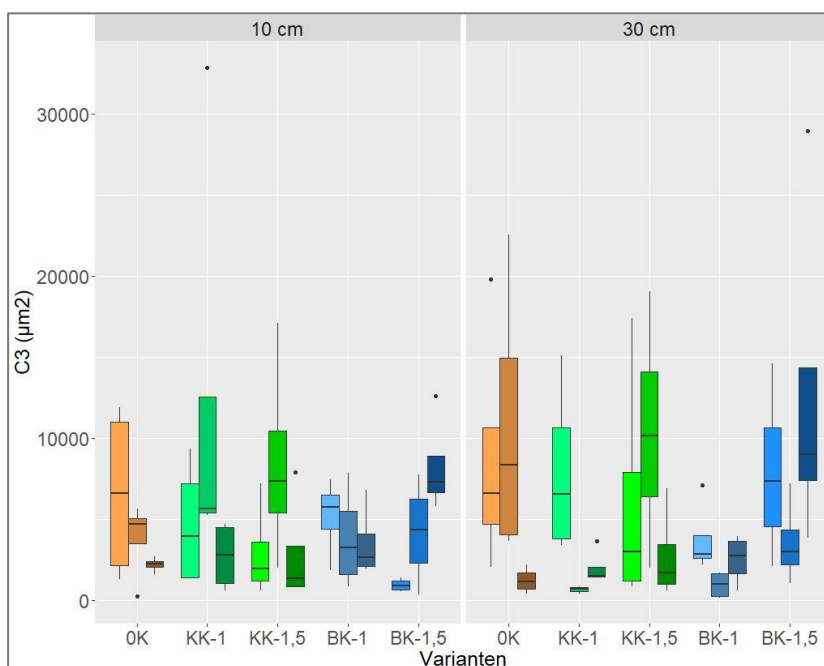


Abbildung 69 C_3 Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine; $n = 4$.

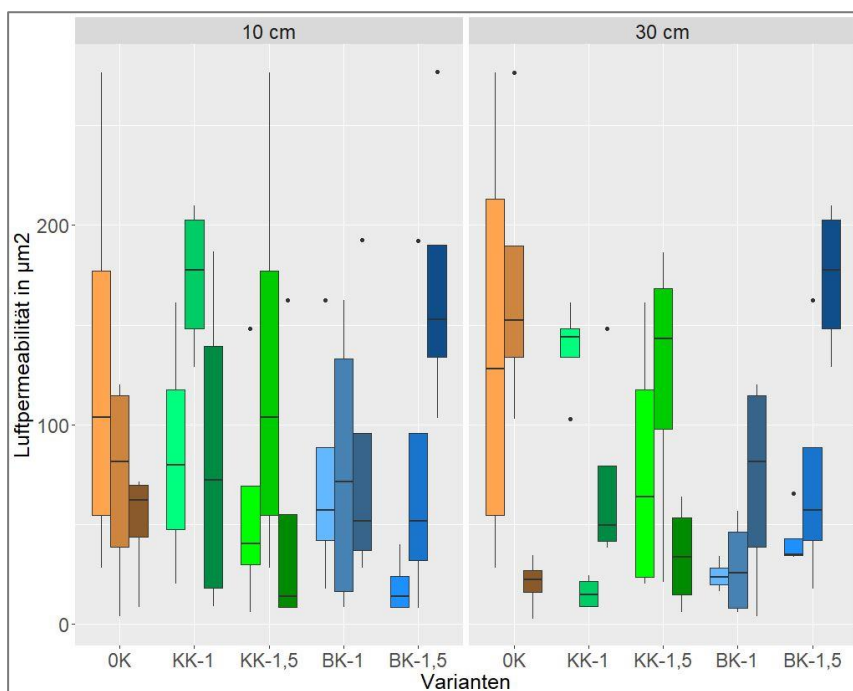


Abbildung 70 Luftpermeabilität (in µm²), $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Struckum, 3 Probenahmen (7, 12 und 26 Monate nach Kalkung). Die drei dunkler werdenden Boxplots einer Farbe symbolisieren die drei Probenahmetermine; $n = 4$.

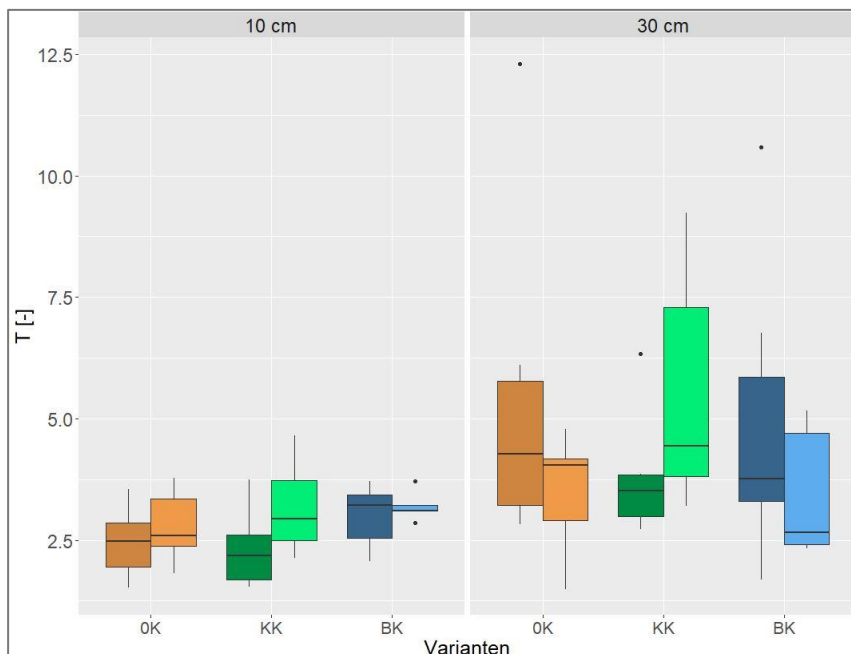


Abbildung 71 Tortuositätsindices $T [-]$, $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung, $n = 4$.

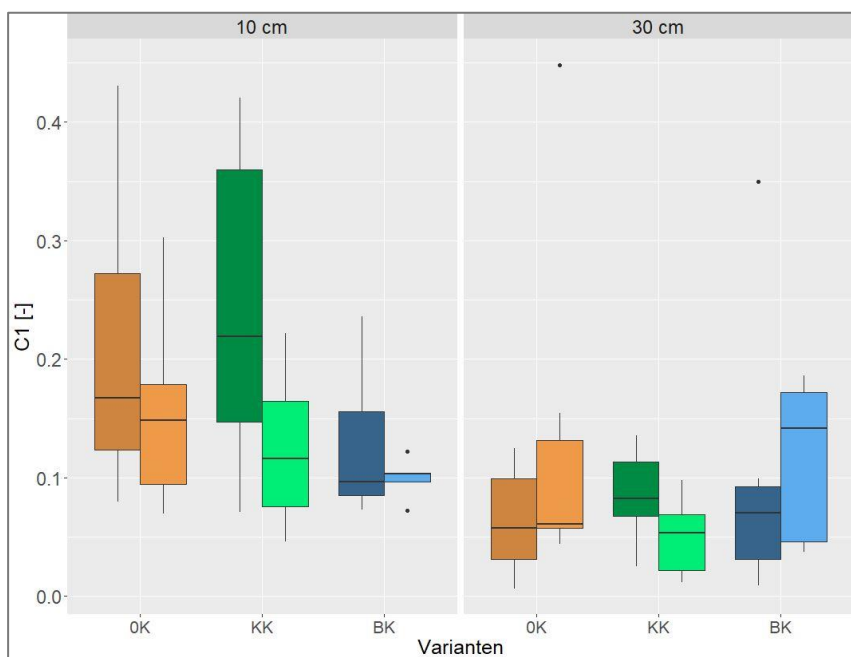


Abbildung 72 C_1 Indices $[-]$, $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung, $n = 4$.

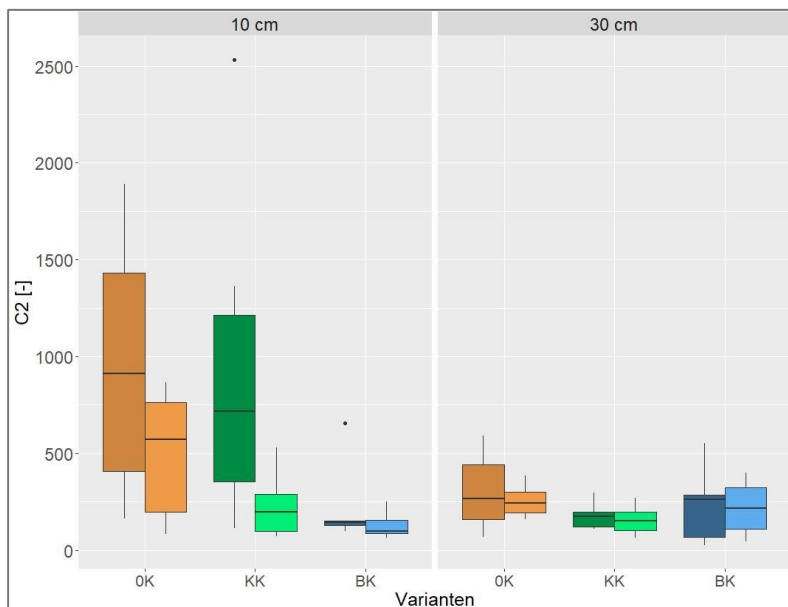


Abbildung 73 C_2 Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung, $n = 4$.

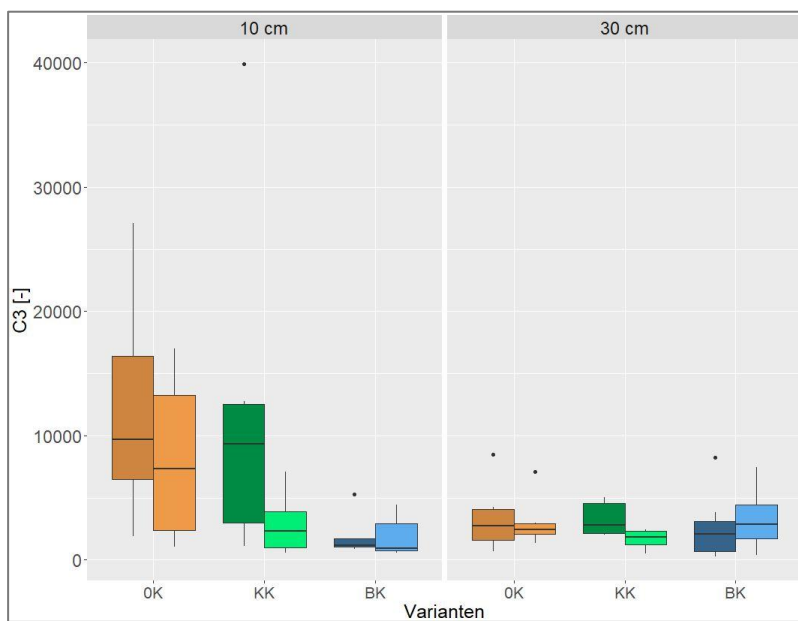


Abbildung 74 C_3 Indices [-], $\Psi_m = -60$ hPa, Standort Cunnersdorf an 2 Probenahmen 18 (linker Boxplot) und 23 Monate (rechter Boxplot) nach letzter Kalkung, $n = 4$.

, CaCl_2

O_2CaCO_3

Tabelle 15 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha$ = Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1-1/n$ definiert ist, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^2/d) am Standort Barlt in 10 und 30 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung (April 2017), $n = 4$

Variante	Tiefe	α	n	m	k_f
OK	10 cm	0,0104	1,0692	0,0647	3,8
KK-1	10 cm	0,00095	1,0093	0,009214	59
KK-1,5	10 cm	0,0059	1,048	0,04587	171
BK-1	10 cm	0,00353	1,12075	0,10774	220
BK-1,5	10 cm	0,00441	1,32768	0,24681	241
OK	30 cm	0,00535	1,10469	0,094769	0,1
KK-1	30 cm	0,00134	1,0555	0,05263	0,1
KK-1,5	30 cm	0,0099	1,47659	0,32276	0,1
BK-1	30 cm	0,00581	1,00182	0,00182	0,1
BK-1,5	30 cm	0,00447	1,08808	0,8095	31

Tabelle 16 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha$ = Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1-1/n$ definiert ist, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^2/d) am Standort Barlt in 10 und 30 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung (August 2017), $n = 4$

Variante	Tiefe	α	n	m	k_f
OK	10 cm	0,01071	1,04297	0,0412	399
KK-1	10 cm	0,06083	1,14634	0,12766	489
KK-1,5	10 cm	0,00157	1,00952	0,00943	555
BK-1	10 cm	0,00343	1,0326	0,03157	95
BK-1,5	10 cm	0,00441	1,32768	0,24681	10
OK	30 cm	0,00771	1,05397	0,051206	11
KK-1	30 cm	0,05042	1,12834	0,11374	11
KK-1,5	30 cm	0,00257	1,10252	0,09299	26
BK-1	30 cm	0,00326	1,0416	0,03994	15
BK-1,5	30 cm	0,004605	1,127680	0,11322	33

Tabelle 17 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha$ = Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1-1/n$ definiert ist, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^2/d) am Standort Barlt in 10 und 30 cm Tiefe, 24 Monate nach Kalkung (August 2018), $n = 4$

Variante	Tiefe	α	n	m	k_f
OK	10 cm	0,00704	1,47042	0,31992	326
KK-1	10 cm	0,0064	1,83558	0,45521	427
KK-1,5	10 cm	0,0056	1,29057	0,22515	648
BK-1	10 cm	0,00438	1,5542	0,3658	705
BK-1,5	10 cm	0,00124	1,3448	0,2564	887
OK	30 cm	0,0146	1,2255	0,18407	64
KK-1	30 cm	0,00492	1,57119	0,36352	271
KK-1,5	30 cm	0,009846	1,1233	0,10977	144
BK-1	30 cm	0,00491	1,56076	0,35929	117
BK-1,5	30 cm	0,00535	1,71468	0,4168	244

Tabelle 18 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha$ = Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1-1/n$ definiert ist, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^2d) am Standort Struckum in 10 und 30 cm Tiefe, 7 Monate nach Kalkung (April 2017), $n = 4$

Variante	Tiefe	α	n	m	k_f
OK	10 cm	0,00155	1,03597	0,034721	53
KK-1	10 cm	0,00231	1,00821	0,00814	225
KK-1,5	10 cm	0,00109	1,01549	0,01525	240
BK-1	10 cm	0,00033	1,005	0,00498	671
BK-1,5	10 cm	0,0063	1,01237	0,01222	851
OK	30 cm	0,00104	1,05368	0,050945	0,3
KK-1	30 cm	0,00101	1,02571	0,02507	14
KK-1,5	30 cm	0,00002	1,06668	0,06251	40
BK-1	30 cm	0,0033	1,31923	0,24198	97
BK-1,5	30 cm	0,00002	1,005	0,00498	228

Tabelle 19 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha$ = Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1-1/n$ definiert ist, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^2d) am Standort Struckum in 10 und 30 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung (August 2017), $n = 4$

Variante	Tiefe	α	n	m	k_f
OK	10 cm	0,0007	1,007	0,006951	21
KK-1	10 cm	0,00056	1,00748	0,00742	35
KK-1,5	10 cm	0,04186	1,1016	0,09223	139
BK-1	10 cm	0,00015	1,01807	0,01775	263
BK-1,5	10 cm	0,00517	1,05349	0,05077	476
OK	30 cm	0,00238	1,089	0,081726	20
KK-1	30 cm	0,0009454	1,0607	0,05723	50
KK-1,5	30 cm	0,01186	1,1416	0,12404	55
BK-1	30 cm	0,00742	1,154	0,13345	98
BK-1,5	30 cm	0,00517	1,45349	0,312	117

Tabelle 20 Kennwerte der ungesättigten Wasserleitfähigkeitsmessungen ($1/\alpha$ = Lufteintrittspunkt, n und m sind Parameter die die Form der Kurve beeinflussen, wobei $m = 1-1/n$ definiert ist, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit in cm^2d) am Standort Struckum in 10 und 30 cm Tiefe, 26 Monate nach Kalkung (Oktober 2017), $n = 4$

Variante	Tiefe	α	n	m	k_f
OK	10 cm	0,0103	1,19776	0,1651	141
KK-1	10 cm	0,007704	1,14493	0,12658	88
KK-1,5	10 cm	0,0049	1,13098	0,11581	120
BK-1	10 cm	0,01034	1,51102	0,3382	364
BK-1,5	10 cm	0,00562	1,38962	0,28038	544
OK	30 cm	0,00269	1,18724	0,157710	47
KK-1	30 cm	0,002545	1,15464	0,13393	105
KK-1,5	30 cm	0,007621	1,26446	0,20915	120
BK-1	30 cm	0,00248	2,14695	0,53422	168
BK-1,5	30 cm	0,00467	1,84633	0,45839	525

Tabelle 21 Respirationsraten (in CO₂ (µg * g getrockneter Boden *h) für den Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung

Inkubationstage			
	CO ₂ (µg * g getrockneter Boden *h)		
Variante	1 Tag	3 Tage	7 Tage
OK	4,2	4,0	3,5
KK-1	4,2	4,1	3,8
KK-1,5	4,1	3,8	3,7
BK-1	3,7	3,6	3,8
BK-1,5	4,3	4,2	3,7

Tabelle 22 Respirationsraten (in CO₂ (µg * g getrockneter Boden *h) für den Standort Barlt in 10 cm Tiefe, 24 Monate nach Kalkung

Inkubationstage			
	CO ₂ (µg * g getrockneter Boden *h)		
Variante	1 Tag	3 Tage	7 Tage
OK	3,2	3,4	3,4
KK-1	3,5	3,1	3,2
KK-1,5	3,4	3,2	3,5
BK-1	3,1	3,4	3,2
BK-1,5	4,0	3,8	3,7

Tabelle 23 Respirationsraten (in CO₂ (µg * g getrockneter Boden *h) für den Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 12 Monate nach Kalkung

Inkubationstage			
	CO ₂ (µg * g getrockneter Boden *h)		
Variante	1 Tag	3 Tage	7 Tage
OK	4,5	4,2	4,3
KK-1	3,9	3,8	4,1
KK-1,5	4,3	4,5	3,9
BK-1	3,7	3,5	4,0
BK-1,5	4,2	3,9	4,1

*Tabelle 24 Respirationsraten (in CO₂ (µg * g getrockneter Boden *h) für den Standort Struckum in 10 cm Tiefe, 26 Monate nach Kalkung*

Inkubationstage			
	CO ₂ (µg * g getrockneter Boden *h)		
Variante	1 Tag	3 Tage	7 Tage
OK	3,6	3,8	3,4
KK-1	3,2	3,6	3,7
KK-1,5	3,5	3,4	3,7
BK-1	3,6	3,1	3,0
BK-1,5	3,4	3,1	3,8