

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde

**Steigerung der Stickstoffnutzungseffizienz
landwirtschaftlicher Ackerkulturen und Minderung
von Stickstoffdüngungsverlusten durch Optimierung
der Struktur landwirtschaftlicher Böden mittels
Kalkung**

AZ: 33068/01 und 33068/02

Abschlussbericht

-Teilbereich Kiel-



M.Sc. Tina Frank

Dr. Iris Zimmermann

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

Kiel, 30.09.2021

I. Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Einleitung und Zielsetzung des Projektes | 18 |
| 2. | Material und Methoden..... | 22 |
| 2.1 | Versuchsaufbau und Probenahme | 22 |
| 2.2 | Versuchsstandorte | 24 |
| 2.2.1 | Struckum..... | 24 |
| 2.2.2 | Barlt | 25 |
| 2.2.3 | Schrecksbach-Holzburg | 26 |
| 2.2.4 | Hergarten | 27 |
| 2.2.5 | Puch..... | 28 |
| 2.2.6 | Neubrandenburg | 29 |
| 2.2.7 | Magdeburg..... | 30 |
| 2.3 | Laboruntersuchungen | 31 |
| 2.3.1 | Messungen an gestörten Bodenmaterial | 31 |
| 2.3.2 | Messungen an ungestörten (Stechzylinder-)Bodenproben | 31 |
| 2.3.3 | Messungen an individuellen Aggregaten..... | 33 |
| 2.4 | Statistische Auswertung | 35 |
| 3. | Ergebnisse | 36 |
| 3.1 | Struckum..... | 36 |
| 3.1.1 | Kationenaustauschkapazität und pH | 36 |
| 3.1.2 | Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter..... | 37 |
| 3.1.3 | Scherparameter und Vorbelastungswerte | 45 |
| 3.1.4 | Zugspannung | 48 |
| 3.2 | Barlt | 49 |
| 3.2.1 | Kationenaustauschkapazität und pH | 49 |
| 3.2.1 | Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter..... | 50 |
| 3.2.2 | Scherparameter und Vorbelastungswerte | 56 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2.3 | Zugspannung und Erosionsfestigkeit..... | 58 |
| 3.3 | Schrecksbach..... | 64 |
| 3.3.1 | Kationenaustauschkapazität und pH | 64 |
| 3.3.2 | Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter..... | 65 |
| 3.3.3 | Scherparameter und Vorbelastungswerte | 71 |
| 3.3.4 | Zugspannung | 73 |
| 3.4 | Hergarten..... | 75 |
| 3.4.1 | Kationenaustauschkapazität und pH | 75 |
| 3.4.2 | Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter..... | 76 |
| 3.4.3 | Scherparameter und Vorbelastungswerte | 82 |
| 3.4.4 | Zugspannung | 85 |
| 3.5 | Puch..... | 86 |
| 3.5.1 | Kationenaustauschkapazität und pH | 86 |
| 3.5.2 | Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter..... | 87 |
| 3.5.3 | Scherparameter und Vorbelastungswerte | 94 |
| 3.5.4 | Zugspannung | 96 |
| 3.6 | Neubrandenburg | 98 |
| 3.6.1 | Kationenaustauschkapazität und pH | 98 |
| 3.6.1 | Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter..... | 99 |
| 3.6.2 | Scherparameter und Vorbelastungswerte | 106 |
| 3.6.3 | Zugspannung | 108 |
| 3.7 | Magdeburg..... | 111 |
| 3.7.1 | Kationenaustauschkapazität und pH | 111 |
| 3.7.2 | Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter..... | 112 |
| 3.7.3 | Scherparameter und Vorbelastungswerte | 118 |
| 3.7.4 | Zugspannung | 120 |
| 4. | Diskussion..... | 122 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Die Effekte einer Kalkung auf chemische und physikalische Bodeneigenschaften | 122 |
| 4.2 | Beeinflussung der Ergebnisse durch die Bodenbearbeitung..... | 128 |
| 5. | Handlungsempfehlungen..... | 129 |
| 6. | Öffentlichkeitsarbeit..... | 131 |
| 7. | Literaturverzeichnis | 132 |
| 8. | Anhang..... | 142 |

II. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Kleimarsch in Struckum, Schleswig-Holstein | 24 |
| Abbildung 2: Kleimarsch in Barlt, Schleswig-Holstein | 25 |
| Abbildung 3: Pseudogley am Standort Schrecksbach, Hessen..... | 26 |
| Abbildung 4: Pseudogley-Parabraunerde am Standort Hergarten, Nordrhein-Westfalen | 27 |
| Abbildung 5: Normbraunerde am Standort Puch, Bayern | 28 |
| Abbildung 6: Normparabraunerde am Standort Neubrandenburg, Mecklenburg-Vorpommern | 29 |
| Abbildung 7: Braunerde-Gley am Standort Magdeburg, Sachsen-Anhalt | 30 |
| Abbildung 8: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) am Standort Struckum für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$)..... | 38 |
| Abbildung 9: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Struckum für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5). in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die graue Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten (n = 4). | 39 |
| Abbildung 10: Luftkapazität [Vol.-%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$)..... | 42 |
| Abbildung 11: Nutzbare Feldkapazität [Vol.-%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum (n = 8) für die Jahre 2017-2020. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$)..... | 43 |
| Abbildung 12: Totwassergehalte [Vol.-%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum in den Jahren 2017-2020 (n = 8). | |

Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).....44

Abbildung 13: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 (n = 4).46

Abbildung 14: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Struckum für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).47

Abbildung 15: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019 und 2020) aus dem Oberboden des Standortes Struckum für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).....48

Abbildung 16: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).50

Abbildung 17: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die gelbe Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten (n = 4).51

Abbildung 18: Luftkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt (n = 8) für die Jahre 2017-2020. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).....53

Abbildung 19: Nutzbare Feldkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk

| | |
|---|----|
| 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt (n = 8) für die Jahre 2017-2020. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05)..... | 54 |
| Abbildung 20: Totwassergehalte [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt für die Untersuchungsjahre 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05)..... | 55 |
| Abbildung 21: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt für die Jahre 2017-2020 (n = 4)..... | 57 |
| Abbildung 22: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05). | 58 |
| Abbildung 23: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\emptyset \sim 16$ mm) (2017 – 2020) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05)..... | 59 |
| Abbildung 24: Zugspannung Y [kPa] auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\emptyset \sim 16$ mm) (2018 – 2020) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05). | 60 |
| Abbildung 25: Erosionsfestigkeit (E_s) der äußeren (äuß.) und inneren (inn.) Schichten von luftgetrockneten Aggregaten ($\emptyset \sim 16$ mm) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 10). Die Vierecke markieren den arithmetischen Mittelwert. Die Großbuchstaben (A, B) zeigen den statistisch signifikanten Unterschied der Schichten innerhalb einer Kalkvariante der Aggregate (p ≤ 0.01). Die Kleinbuchstaben (a, b) zeigen den statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Kalkvarianten (p < 0.05)..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 26: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_r) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Schrecksbach für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019 ($n = 12$). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 65 |
| Abbildung 27: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Schrecksbach für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die violette Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten ($n = 4$). | 66 |
| Abbildung 28: Luftkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach ($n = 8$) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 68 |
| Abbildung 29: Nutzbare Feldkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach ($n = 8$) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 69 |
| Abbildung 30: Totwassergehalte [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach für die Untersuchungsjahre 2017-2019 ($n = 8$). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 70 |
| Abbildung 31: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach für die Jahre 2017-2019 ($n = 4$). | 72 |
| Abbildung 32: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Schrecksbach für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 8$) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 73 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 33: Zugspannung γ [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2017 und 2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019) aus dem Oberboden des Standortes Schrecksbach für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$)..... | 74 |
| Abbildung 34: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_r) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Hergarten für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019 (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 76 |
| Abbildung 35: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Hergarten für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die blaue Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten (n = 4). | 77 |
| Abbildung 36: Luftkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$)..... | 79 |
| Abbildung 37: Nutzbare Feldkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$)..... | 80 |
| Abbildung 38: Totwassergehalte [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten für die Untersuchungsjahre 2017-2019 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 81 |
| Abbildung 39: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten für die Jahre 2017-2019 (n = 4). | 83 |

Abbildung 40: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Hergarten für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).84

Abbildung 41: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019) aus dem Oberboden des Standortes Hergarten für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).85

Abbildung 42: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Puch für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019 (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).88

Abbildung 43: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Puch für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017 und 2018. Die grüne Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten (n = 4).89

Abbildung 44: Luftkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).91

Abbildung 45: Nutzbare Feldkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).92

Abbildung 46: Totwassergehalte [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch für die Untersuchungsjahre 2017-2019 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).93

| | |
|---|-----|
| Abbildung 47: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch für die Jahre 2017-2019 (n = 4). | 95 |
| Abbildung 48: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Puch für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 96 |
| Abbildung 49: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\emptyset \sim 16$ mm) (2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\emptyset \sim 16$ mm) (2019) aus dem Oberboden des Standortes Puch für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 97 |
| Abbildung 50: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 100 |
| Abbildung 51: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5). in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die graue Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten (n = 4). | 101 |
| Abbildung 52: Luftkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 103 |
| Abbildung 53: Nutzbare Feldkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg (n = 8) für die Jahre 2017-2020. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 104 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 54: Totwassergehalte [Vol.-%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg in den Jahren 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 105 |
| Abbildung 55: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 (n = 4)..... | 107 |
| Abbildung 56: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 108 |
| Abbildung 57: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2017, 2018 und 2020) aus dem Oberboden des Standortes Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$)..... | 109 |
| Abbildung 58: Zugspannung Y [kPa] auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019 - 2020) aus dem Oberboden des Standortes Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 110 |
| Abbildung 59: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Magdeburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$). | 112 |
| Abbildung 60: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Magdeburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5). in den Untersuchungsjahren 2017-2018. Die grüne Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten (n = 4). | 113 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 61: Luftkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg für die Jahre 2017-2019 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05)..... | 115 |
| Abbildung 62: Nutzbare Feldkapazität [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05)..... | 116 |
| Abbildung 63: Totwassergehalte [Vol.%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg in den Jahren 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05)..... | 117 |
| Abbildung 64: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg für die Jahre 2017-2020 (n = 4). | 119 |
| Abbildung 65: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Magdeburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05). | 120 |
| Abbildung 66: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019 und 2020) aus dem Oberboden des Standortes Magdeburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05)..... | 121 |
| Abbildung 67: Kohäsion (c) in kPa (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) zusammenfassend dargestellt an allen Standorten für die Jahre 2017-2020 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. | 126 |

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datum der Kalkausbringung, applizierte Kalkmenge in dt CaO Äquivalente je ha⁻¹ auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen, sowie der Zeitraum (Z) zwischen Probenahme und Kalkausbringung für die Jahre 2017-2020 dargestellt für alle untersuchten Standorte..**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 2: Austauschbare Kationen K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H⁺ und Al³⁺ [mmolc kg⁻¹], welche insgesamt die KAK_{eff} [mmolc kg⁻¹] ergeben und der pH Wert [CaCl₂] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Struckum für die Jahre 2017-2020 (n = 2).**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 3: Lagerungsdichte ρ_B in g cm⁻³ und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (kl) bei $\psi_m = -6$ kPa in cm d⁻¹ sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05).**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 4: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (ϕ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05).**Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 5: Austauschbare Kationen K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H⁺ und Al³⁺ [mmol_c kg⁻¹], welche insgesamt die KAK_{eff} [mmol_c kg⁻¹] ergeben und der pH Wert [CaCl₂] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Barlt für die Jahre 2017-2020 (n = 2).49

Tabelle 6: Lagerungsdichte ρ_B in g cm⁻³ und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_l) bei $\psi_m = -6$ kPa in cm d⁻¹ sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt für die Jahre 2017-2020 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05).52

Tabelle 7: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (ϕ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach

| | |
|---|----|
| VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt für die Jahre 2017-2020 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05)..... | 56 |
| Tabelle 8: Dichte (ρ) der äußeren (äuß.) und inneren (inn.) Schichten mit der Standardabweichung (SD) von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 10)..... | 62 |
| Tabelle 9: pH (-), Gesamt-N (mass-%) und Gesamt-C (mass-%) der äußeren (äuß.) und inneren (inn.) Schichten von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 2)..... | 63 |
| Tabelle 10: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$mmol_c kg^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$mmol_c kg^{-1}$] ergeben und der pH Wert [$CaCl_2$] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Schreckbach für die Jahre 2017-2019 (n = 2). | 64 |
| Tabelle 11: Lagerungsdichte ρ_B in $g cm^{-3}$ und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei $\psi_m = -6$ kPa in $cm d^{-1}$ sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach für die Jahre 2017-2019 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05). | 67 |
| Tabelle 12: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in $^\circ$ (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach für die Jahre 2017-2019 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05)..... | 71 |
| Tabelle 13: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$mmol_c kg^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$mmol_c kg^{-1}$] ergeben und der pH Wert [$CaCl_2$] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Hergarten für die Jahre 2017-2019 (n = 2). | 75 |
| Tabelle 14: Lagerungsdichte ρ_B in $g cm^{-3}$ und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei $\psi_m = -6$ kPa in $cm d^{-1}$ sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten für die Jahre 2017- | |

| | |
|---|-----|
| 2019 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$)..... | 78 |
| Tabelle 15: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten für die Jahre 2017-2019 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$)..... | 82 |
| Tabelle 16: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [mmol _c kg ⁻¹], welche insgesamt die KAK_{eff} [mmol _c kg ⁻¹] ergeben und der pH Wert [$CaCl_2$] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Puch für die Jahre 2017-2019 (n = 2)..... | 87 |
| Tabelle 17: Lagerungsdichte ρ_B in g cm ⁻³ und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei $\psi_m = -6$ kPa in cm d ⁻¹ sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch für die Jahre 2017-2019 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$)..... | 90 |
| Tabelle 18: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch für die Jahre 2017-2019 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$)..... | 94 |
| Tabelle 19: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [mmol _c kg ⁻¹], welche insgesamt die KAK_{eff} [mmol _c kg ⁻¹] ergeben und der pH Wert [$CaCl_2$] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 (n = 2)..... | 99 |
| Tabelle 20: Lagerungsdichte ρ_B in g cm ⁻³ und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei $\psi_m = -6$ kPa in cm d ⁻¹ sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$)..... | 102 |
| Tabelle 21: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach | |

VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05)..... 106

Tabelle 22: Austauschbare Kationen K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H⁺ und Al³⁺ [mmol_c kg⁻¹], welche insgesamt die KAK_{eff} [mmol_c kg⁻¹] ergeben und der pH Wert [CaCl₂] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Magdeburg für die Jahre 2017-2020 (n = 2). 111

Tabelle 23: Lagerungsdichte ρ_B in g cm⁻³ und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei ψ_m = -6 kPa in cm d⁻¹ sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg für die Jahre 2017-2019 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05). 114

Tabelle 24: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: ψ_m = -6 kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg für die Jahre 2017-2020 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an (p < 0,05)..... 118

1. Einleitung und Zielsetzung des Projektes

Agrar(öko)systeme werden weltweit intensiv genutzt, um ihre Kapazität für die Nahrungsmittelproduktion zu erhöhen, während sie gleichzeitig ökologisch und sozial erhalten werden müssen (Warkentin 2001). Im Zuge zunehmender Veränderungen des Klimas und der damit verbundenen Landdegradation (Olsson et al. 2020) sowie einer wachsenden Weltbevölkerung (FAO et al. 2019) ist das Schicksal der Böden in Agrar(öko)systemen in den letzten Jahren stärker in den Fokus gerückt. Bodendegradationsprozesse werden durch menschliche Aktivitäten aufgrund nicht nachhaltiger Bewirtschaftung gefördert und zerstören den Boden langfristig. Folgen sind Wind- und Wassererosion, Zerstörung der Bodenstruktur und damit verbundener Verlust der organischen Bodensubstanz. Dies kann auch zu wirtschaftlichen Verlusten in Agrarproduktionssystemen führen (Olsson et al. 2020).

Global gesehen ist die Pflanzenproduktion und der damit verbundene Einsatz von Stickstoffdüngern in den letzten 40 Jahren stark gestiegen (Dobermann 2005; Deltedesco et al. 2015). Dies wird zum Problem, weil der Stickstoff aus der mineralischen und organischen Düngung nicht komplett im landwirtschaftlichen System verbleibt, sondern weit mehr als die Hälfte durch diverse Verlustpfade in die umgebende Umwelt eintritt und anliegende Ökosysteme belasten kann. Die Konsequenzen daraus sind u.a. die erhöhte Entstehung von Treibhausgasen (z.B. Lachgas), ein erhöhter Biodiversitätsverlust und auch eine Gesundheitsgefährdung für den Menschen durch zu hohe Nitratgehalte im Grundwasser (Raun und Johnson 1999).

In den letzten Jahren haben die regionalen Landwirtschaftsbehörden vor den, mit der Versauerung verbundenen, Problemen gewarnt und auf die Bedeutung der Neutralisierung saurer Böden der Ackerflächen Deutschlands, auch hinsichtlich der Ernährungssicherung, hingewiesen (Lorenz et al. 2020). So sind beispielsweise für die Böden Thüringens 20 % der Nährstoff-Mangelscheinungen an Pflanzen auf eine unzureichende Kalkung zurückzuführen (Kerschberger 2008). Dabei definiert der VDLUFA (2000a) fünf Kalkversorgungsklassen für Mineralböden. Die Klassen "A" und "B" stehen für Böden mit schlechter Bodenstruktur, verminderter Nährstoffverfügbarkeit, Mobilisierung und erhöhter Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen und in der Folge gravierenden Ertragseinbußen. In diesen versauerten Böden ist die Kalkung die wichtigste Düngungsmaßnahme zur Wiederherstellung der Produktivität (= Gesundungskalkung), aber auch zum Schutz des Bodens vor Erosion, Verschlammung und Verdichtung (Jacobs et al. 2018). Aber auch bei Böden, die sich derzeit in einer optimalen Versorgungsklasse (C) mit guter Bodenstruktur und Nährstoffverfügbarkeit befinden, kann es wichtig sein, sie mit regelmäßigen Kalkanwendungen zu unterstützen, um den optimalen pH-Bereich zu erhalten (= Erhaltungskalkung). In den Kalkversorgungsklassen "D" und "E" ist eine Anwendung mit Kalk nicht notwendig, da ein erhöhter pH-Wert zu einer Fixierung von

Spurenelementen und auch zu reduzierten Pflanzenerträgen führen kann. Böden dieser Klassen kommen dort vor, wo Kalk im Ausgangsgestein vorhanden ist, z.B. in Löss-, Kalk- und Keuperverwitterungsböden. Böden, die einen geringen Gehalt an organischer Substanz aufweisen und aus der Schieferverwitterung, aus dem Unteren und Mittleren Buntsandstein, oder aus Gneis und Porphyrt entstanden sind, haben oft einen höheren Sandanteil und damit ein höheres Versauerungsrisiko aufgrund eines geringen Säureneutralisationsvermögens. Lausen (2012) stellte fest, dass die Kalkung in der Landwirtschaft in Schleswig-Holstein oft vernachlässigt wird. Derzeit sind 58 % der ackerbaulich genutzten Sandböden in Schleswig-Holstein mit Kalk unterversorgt. Ton- und Schluffböden haben aufgrund ihres hohen Sorptions- und Puffervermögens einen höheren Bedarf an Kalk, aber auch diese Böden sind in Schleswig-Holstein zu etwa 50 % unterversorgt. In Sachsen-Anhalt sind mehr als 25 % der Ackerböden unterversorgt und haben einen dringenden Kalkbedarf (Stolpe und Schimpf 2017). Eine statistische Auswertung der Kalkversorgung bayerischer Böden hat ebenfalls den Bedarf an einer erhöhten Kalkung aufgezeigt. Hier wurden zwischen 2014 und 2019 Bodenproben gezogen an verschiedenen Standorten, von denen 28 % in eine "niedrige" (=A und B) Versorgungsklasse eingestuft wurden (Lfl Agrarökonomie, München 2020). Eine Studie von Jacobs et al. (2018) ergab, dass nur 35 % der Ackerböden und 24 % der Grünlandböden im optimalen Versorgungsbereich (= C) lagen, während der pH-Wert von ca. 42 % der Mineralböden im Ackerbau und 57 % der Grünlandböden zu niedrig war. Innerhalb eines Jahres werden etwa 400-600 kg/ha CaO-Äquivalente entweder von den Wurzeln aufgenommen oder durch Infiltration mit Wasser ausgewaschen (Rechsteiner und Keller 2019). Daher ist eine Kalkung auf Ackerböden mindestens alle drei Jahre erforderlich, um den optimalen Nährstoffzustand und pH-Wert gemäß der Empfehlung des VDLUFA (2000a) zu erhalten.

Die Kalkung ist eine weltweit genutzte Maßnahme auf landwirtschaftlichen Flächen, um den pH-Wert zu erreichen, der für den gegebenen Gehalt an organischer Substanz, der vorhandenen Bodentextur und die Art der Nutzung (Ackerland oder Grünland) als optimal angesehen wird (VDLUFA 2000a). Bei mineralischen Böden verringert der Sandanteil sowohl den Kalkbedarf als auch den Boden-pH-Wert, bei dem Kalk benötigt wird. Böden mit einem höheren Anteil an Ton und organischer Substanz haben den größten Kalkbedarf, um die im Boden vorhandenen Säuren zu kompensieren (Goulding 2016), denn mit zunehmendem Anteil an Ton und organischer Substanz hat der Boden eine hohe Basenneutralisationskapazität (Vogel et al. 2020) und damit einen hohen Anteil an gebundener Säure, d. h. austauschbaren Protonen an den Austauscherplätzen im Boden. Gleichzeitig führt der durch die Kalkung erhöhte pH-Wert zu einer erhöhten Kationenaustauschkapazität (KAK) und damit zu einer höheren Sorptionskapazität für Nährstoffe im Boden.

Unter humiden Klimabedingungen erfolgt die Bodenversauerung allmählich durch kontinuierlichen Eintrag bzw. Bildung von Säuren, wird aber auch maßgeblich durch die Versauerung der Rhizosphäre durch Pflanzenwurzeln, zur Aufnahme von Nährstoffen, beeinflusst (Bolan et al. 2015). Der pH-Wert des Bodens unterliegt zeitlichen Schwankungen und kann eine erhebliche räumliche Variabilität aufweisen (Zehetner 2004). Daher ist die Kalkanwendung auf Ackerland eine weit genutzte Praxis, um die mit sauren und/oder strukturell geschädigten Böden verbundenen Probleme zu überwinden (Bolan et al. 2015). Das Kalken hat mehrere Vorteile: die Verbesserung der Stabilität der Bodenaggregate und der Oberflächenladung (ein steigender pH-Wert erhöht die negative Nettoladung (Haynes und Naidu 1998)), die Mobilisierung von Nährstoffen (u.a. Molybdän und Phosphat (Ruhberg 2017)) und die Immobilisierung von toxischen Elementen (Kunhikrishnan et al. 2016)). Um wirksam zu sein, muss der Kalk Wasserstoff-, Aluminium- und Mangan-Ionen aus den Austauschstellen der Bodenkolloide verdrängen, H^+ neutralisieren und Al^{3+} und Mn^{2+} in der Bodenlösung ausfällen (Helyar und Porter 1989). Die Auflösung von kohlensaurem Kalk ($CaCO_3$), der auf den Boden aufgebracht wird, verbraucht H^+ -Ionen aus der Bodenlösung (Erhöhung des pH-Wertes) und setzt Ca^{2+} -Ionen und HCO_3^- frei (Wisotzky 2011). Das freigesetzte Ca^{2+} fördert weiter den Austausch und die Auswaschung von sauren Kationen (H^+ , Al^{3+} , Mn^{2+}) (Beetham 2015; Holland et al. 2018). Mit steigendem pH-Wert im Oberboden werden die freigesetzten Ca^{2+} -Ionen von der negativen Ladung an den Oberflächen von Tonmineralen angezogen, wobei die entstehenden Bindungen vollständig kovalent oder ionisch oder eine Kombination aus beidem sein können (Rengasamy et al. 2016). Negativ geladene Bodenkolloide (z. B. Tonpartikel) werden von einer diffusen Doppelschicht aus Kationen und Anionen in verschiedenen Stadien der Anziehung zur Kolloidoberfläche umgeben. Die Zunahme der ionischen Kraft zusammen mit der größeren Verfügbarkeit von löslichem Ca^{2+} im Boden fördert eine Komprimierung der diffusen Doppelschicht um Bodenkolloide (Sparks 2003). Infolgedessen wird die Annäherung einzelner Tonpartikel erleichtert und es ist wahrscheinlicher, dass sie sich zu Flocken zusammenschließen, „Face-to-Face“-Assoziationen eingehen und Cluster bilden (Dash und Hussain 2015) oder sich mit negativ geladenen organischen Kolloiden mit Hilfe von kalziumhaltigen Kittsubstanzen (z. B. Kalzit) verbinden (Beetham 2015; Haas 2018).

Die beiden primären Reaktionen (i) Kationenaustausch und (ii) Flockung finden in Böden schnell statt, verringern die Plastizität, verbessern die Bearbeitbarkeit und die mechanische Festigkeit (Mallela et al. 2004) aufgrund einer erhöhten Aggregatstabilität. Die Stabilisierung in Boden-Kalk-Gemischen steigt mit dem Tongehalt (Bell 1996; Maubec et al. 2017). Diese Boden-Kalk-Gemische führen zu einem gut vernetzten Porensystem und stabilen Aggregaten (Chan und Heenan 1999), die meist durch die Ausflockung und Agglomeration von Ton- und

Schluffpartikeln unterstützt werden (Hartge und Ellies 1977; Beetham 2015; Bohne 1983). Die kalkinduzierte Partikelumlagerung steigert die Wasserspeicherkapazität des Bodens, die gesättigte und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit, die Gasflüsse und die Nährstoffspeicherung (Haynes und Naidu 1998; Hoyt 1981). Die festigende Wirkung von Kalk auf Ton- und Lössböden (Bohne 1983) verbessert auch die Anfälligkeit des Bodens gegenüber äußeren Belastungen, wie sie zum Beispiel während der Bodenbearbeitung auftreten können (Krümmelbein et al. 2013).

Eine ganzheitliche Betrachtung der vielseitigen Berührungspunkte der Kalkwirkungen (chemisch, physikalisch und biologisch) auf Strukturbildung sowie Stabilität des Bodens und dessen N-Dynamik lag bisher nicht vor. Das Forschungsprojekt „Steigerung der Stickstoffnutzungseffizienz landwirtschaftlicher Ackerkulturen und Minderung von Stickstoffdüngungsverlusten durch Optimierung der Struktur landwirtschaftlicher Böden mittels Kalkung“ soll durch die Quantifizierung der N-Düngungsverluste bei unterschiedlicher Kalkversorgung mittels neuer, innovativer Methoden neue Erkenntnisse zu dieser aktuellen Thematik ergeben. Darüber erfolgt eine Neudefinition des optimalen Kalkzustandes unter integrativer Berücksichtigung von Nährstoff- (insbesondere N) und Wasserverfügbarkeit sowie Aspekten des Bodenschutzes (siehe Kapitel 5. Handlungsempfehlungen). Das Ziel ist, durch Optimierung des Kalkzustandes von Ackerböden einen konkreten und substanziellen Beitrag zum Ausgleich von N-Bilanzen und zur Minimierung von N-Düngungsverlusten liefern zu können. Um einen Wissensgewinn zu erzielen, der nah an der landwirtschaftlichen Praxis ist und um die neuen Erkenntnisse anschließend auch zu vermitteln, wurde von Beginn an eine intensive Zusammenarbeit mit den Landwirtschaftskammern und Landesanstalten der jeweiligen Bundesländer gepflegt.

Ausgehend von den oben genannten Annahmen wurden sieben praxisnahe Feldversuche zwischen August 2016 und April 2017, auf den folgenden Ackerstandorten mit unterschiedlichen Texturen und Humusgehalten in Deutschland angelegt:

- Struckum (Schleswig-Holstein)
- Barlt (Schleswig-Holstein)
- Schrecksbach-Holzburg (Hessen)
- Hergarten (Nordrhein-Westfalen)
- Puch (Bayern)
- Neubrandenburg (Mecklenburg-Vorpommern)
- Magdeburg (Sachsen-Anhalt)

Die Anlage der Parzellen erfolgte hierbei in vierfacher Wiederholung mit kreuzklassifizierten Kalk- und N-Stufen.

Daraus ergaben sich folgende Aufgabenstellungen und Arbeitspakete (gemäß Projektantrag):

Arbeitspaket 4: Anlage der Versuchsflächen (Kapitel. 2.1)

Arbeitspaket 1: Grundkennzeichnung der Böden auf den Versuchsstandorten vor Beginn der Kalkung (Kapitel 2.2)

Arbeitspaket 2: Erfassung der Strukturfunktionalität von ungestörten Bodenproben und deren auflastabhängiger Änderung (Kapitel. 3)

Arbeitspaket 3: Erfassung der mechanischen Stabilität/Persistenz (Kapitel. 3)

Arbeitspaket 8: Veröffentlichungen / Berichte / Dissertationen (Kapitel 6)

Arbeitspaket 9: Ableitung von Beratungsempfehlungen (Kapitel. 5)

Die Details der durchgeführten Arbeitsschritte aus den einzelnen Arbeitspaketen, sowie die angewandten Methoden und erzielten Ergebnisse werden in den nächsten Kapiteln näher erläutert.

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsaufbau und Probenahme

Der Versuchsaufbau bestand aus zwölf Varianten, die auf einer ca. 100 m² Fläche angelegt wurden. Auf jedem Untersuchungsstandort liegen die Kalk- und Stickstoffvarianten in einer Kreuzklassifikation vor.

Die drei verschiedenen Kalkstufen sind:

- Kalk 0: keine Kalkung
- Kalk 1: Kalkmenge gemäß Empfehlung des VDLUFA (2000a)
- Kalk 1.5: Kalkmenge gemäß Empfehlung des VDLUFA (2000a) x 1,5

Die vier N-Stufen sind:

- N-0: keine N-Düngung
- N-100: N-Düngung gemäß Bedarfsermittlung des VDLUFA (2010)
- N-80: N-Düngung gemäß nach Bedarfsermittlung des VDLUFA (2010) – 20 %
- N-120: N-Düngung gemäß nach Bedarfsermittlung des VDLUFA (2010) + 20 %

So ergeben sich an jedem Standort 12 Varianten, die in einem randomisierten Blockdesign mit vier Wiederholungen angeordnet sind. Die Kalkapplikation mit feingemahlenem kohlenstoffsaurem Kalk (CaCO₃) erfolgte mit Hilfe eines Exaktstreuers auf vier Untersuchungsflächen im Herbst 2016 und auf drei Untersuchungsflächen im Frühjahr 2017 (Tabelle 1). Angepasst an die Gegebenheiten vor Ort hat jede Parzelle eine Größe von ~108 m².

Tabelle 1: Datum der Kalkausbringung, applizierte Kalkmenge in dt CaO-Äquivalenten je ha auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen, sowie der Zeitraum (Z) zwischen Probenahme und Kalkausbringung für die Jahre 2017-2020 dargestellt für alle untersuchten Standorte

| Standort | Datum Kalkaus- bringung | Kalk 1 | Kalk 1.5 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|----------------|-------------------------------|-------------------------|----------|---------------------------------|------|------|------|
| | | dt CaO ha ⁻¹ | | Monate nach der Kalkausbringung | | | |
| Struckum | 25.08.2016 | 80 | 120 | 11 | 21 | 25 | 45 |
| Barlt | 26.08.2016 | 36 | 54 | 12 | 24 | 32 | 45 |
| Schrecksbach | 03.04.2017 | 98 | 147 | 3 | 12 | 23 | - |
| Hergarten | 13.10.2016 | 50 | 75 | 9 | 18 | 30 | - |
| Puch | 24.10.2016 | 70 | 105 | 9 | 18 | 30 | - |
| Neubrandenburg | 06.04.2017 | 25 | 37,5 | 6 | 12 | 23 | 37 |
| Magdeburg | 04.04.2017 | 30 | 45 | 6 | 12 | 23 | 37 |

Die Probennahmen auf den Versuchsstandorten erfolgten für die Arbeitspakete 2 und 3 jeweils im Ap-Horizont (Oberboden). Es wurden gestörte Mischproben (0–30 cm Tiefe) und ungestörte Stechzylinderproben (10 cm Tiefe, 6 x 236 cm³, 5 x 100 cm³ und 1 x 470 cm³) entnommen. Im Arbeitspaket 2 wurde die Strukturfunktionalität von ungestörten Bodenproben und deren auflastabhängige Änderung, im Arbeitspaket 3 die mechanische Stabilität erfasst. Die Proben wurden aus den nicht gekalkten, bedarfsgerecht mit N versorgten Parzellen, sowie aus den gekalkten, bedarfsgerecht mit N versorgten Parzellen (Kalk 0 / N 100, Kalk 1 / N 100, Kalk 1.5 / N 100) gezogen. Diese Varianten werden in den folgenden Kapiteln vereinfacht als Kalk 0 (Kontrollvariante), Kalk 1 und Kalk 1.5 bezeichnet.

2.2 Versuchsstandorte

2.2.1 Struckum



Abbildung 1: Kleimarsch in Struckum, Schleswig-Holstein

Die Versuchsfläche in Struckum liegt an der Westküste Schleswig-Holsteins im Kreis Nordfriesland. Die Böden bestehen hier aus marinen Sedimenten der Nordsee, sodass das Substrat meist karbonat- und salzhaltig ist. Durch den Prozess der Entsalzung und Entkalkung entsteht die Kleimarsch, wie sie auch am Standort Struckum zu finden ist (Abb. Abbildung 1). Unter dieser Kleimarsch steht ab einer Tiefe von 125 cm ein Niedermoortorf an. Ausgeprägte Hydromorphiemerkmale, die typisch für den Marschboden sind, finden sich im Go-, Gro- und Gr-Horizont. Der Oberboden mit der Bodenart stark toniger Schluff (Ut4) hat einen Tongehalt von 28 % und einen Humusgehalt von 9 g kg^{-1} . Das dominierende Tonmineral ist Illit. Der Start-pH liegt bei 5,0 und der empfohlene pH-Wert liegt zwischen 6,4 und 7,2 (VDLUF 2000a). Es wurden bei Anlegung des Feldversuches $80 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1 Parzellen und $120 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1,5 Parzellen ausgebracht und mit einem Grubber etwa 23 cm tief eingearbeitet. Die Fruchtfolge war Winterweizen (2017), Futterhafer (2018), Raps (2019) und Winterweizen (2020). Die Probenahmen fanden 12 (2017), 26 (2018), 31 (2019) und 45 (2020) Monate nach der Kalkausbringung auf den Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen statt.

2.2.2 Barlt

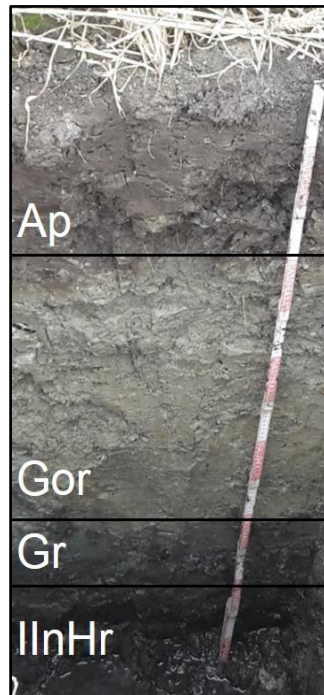


Abbildung 2: Kleimarsch in Barlt, Schleswig-Holstein

Die Versuchsfläche in Barlt liegt an der Westküste Schleswig-Holsteins im Kreis Dithmarschen. Auch an diesem Standort liegt eine Kleimarsch über einem Niedermoor vor, welche ausgeprägte Hydromorphie Merkmale in den Go/Gr Horizonten zeigt (Abbildung 2). Der Oberboden mit der Bodenart mittel schluffiger Ton (Tu3) hat einen Tongehalt von 45 % und einen Humusgehalt von 56 g kg^{-1} . Die dominanten Tonminerale sind Montmorillonite und Illite. Der Start-pH liegt bei 5,9 und der empfohlene pH-Wert liegt zwischen 5,9 und 6,7 (VDLUFA 2000a). Es wurden bei Anlegung des Feldversuches 36 dt CaO ha^{-1} auf den Kalk 1 Parzellen und 54 dt CaO ha^{-1} auf den Kalk 1,5 Parzellen ausgebracht und mit einem Pflug etwa 25 cm tief eingearbeitet. Die Fruchtfolge war Winterweizen (2017), Sommerweizen (2018), Winterweizen (2019) und Wintergerste (2020). Die Probenahmen fanden 12 (2017), 24 (2018), 32 (2019) und 45 (2020) Monate nach der Kalkausbringung auf den Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen statt.

2.2.3 Schrecksbach-Holzburg

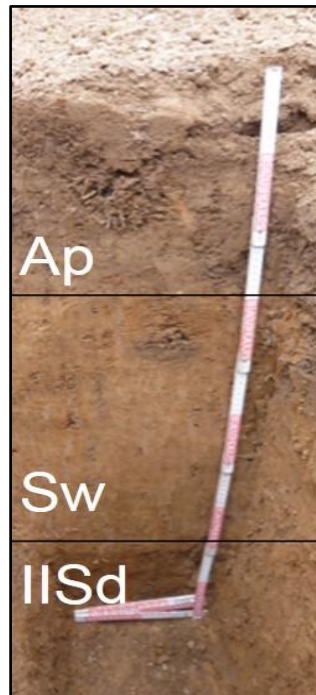


Abbildung 3: Pseudogley am Standort Schrecksbach, Hessen

Die Versuchsfläche Schrecksbach liegt im Naturraum Schwalm in Mittelhessen. An diesem Standort liegt als Bodentyp ein Pseudogley vor (Abbildung 3). Entwickeln konnte sich dieser aus dem Sand-Tonstein des Mittleren Buntsandsteins. Periglaziale Fließerden über Fließschutt sind hier zu finden und beeinflussten die Bodenentwicklung. Besonders im Sw - und IISd - Horizont sind die typischen Hydromorphiemerkmale sichtbar. Diese kennzeichnen den Schwankungsbereich des Stauwassers und werden durch unterschiedlich gefärbte Flecken und Konkretionen sichtbar. Hierbei zeigen dunkelrostfarbene Verfärbungen oxidierte Eisenverbindungen und braunschwarze Verfärbungen oxidierte Manganverbindungen an. Gebleichte bzw. grüngraue bis blaugraue Verfärbungen zeigen hingegen reduktive Merkmale. Der Oberboden mit der Bodenart stark toniger Schluff (Ut4) hat einen Tongehalt von 24 % und einen Humusgehalt von 26 g kg^{-1} . Das dominierende Tonmineral ist Kaolinit. Der Start-pH liegt bei 5,3 und der empfohlene pH-Wert liegt zwischen 6,4 und 7,2 (VDLUFA 2000a). Bei Anlegung des Feldversuches wurden $98 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1 Parzellen und $147 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1,5 Parzellen ausgebracht und mit einer Scheibenegge etwa 8 cm tief eingearbeitet. Die Fruchtfolge war Sommerweizen (2017) und Winterweizen (2018-2019). Die Probenahmen fanden 3 (2017), 12 (2018) und 24 (2019) Monate nach der Kalkausbringung auf den Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen statt.

2.2.4 Hergarten

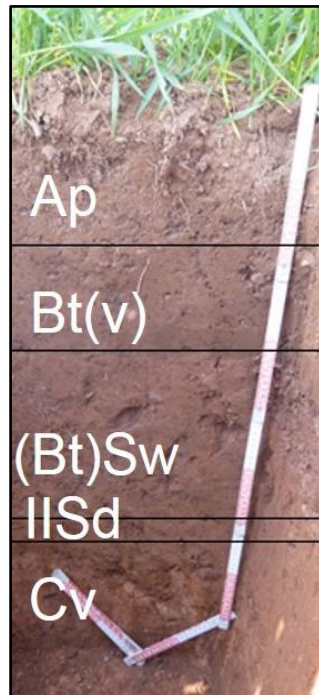


Abbildung 4: Pseudogley-Parabraunerde am Standort Hergarten, Nordrhein-Westfalen

Die Versuchsfläche in Hergarten, ein Ortsteil der Stadt Heimbach, liegt im Naturpark der Nordeifel. Auf dieser Fläche wurde eine Pseudogley-Parabraunerde diagnostiziert (Abbildung 4). Als Ausgangsgestein liegt ein Gemisch aus Ton- und Sandstein aus dem Oberen Buntsandstein vor. Im Oberboden findet sich ein stark lehmiger Sand (SI4) mit einem Tongehalt von 13 % und einem Humusgehalt von 27 g kg^{-1} . Die dominanten Tonminerale sind Illit und Kaolinit. Der Start-pH liegt bei 4,8 und der empfohlene pH-Wert liegt zwischen 6,3 und 7,0 (VDLUFA 2000a). Bei Anlegung des Feldversuches wurden $50 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1 Parzellen und $75 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1,5 Parzellen ausgebracht und mit einem Grubber etwa 8 cm tief eingearbeitet. Die Fruchtfolge war Winterweizen (2017), Raps (2018) und Wintergerste (2019). Die Probenahmen fanden 9 (2017), 18 (2018) und 30 (2019) Monate nach der Kalkausbringung auf den Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen statt.

2.2.5 Puch

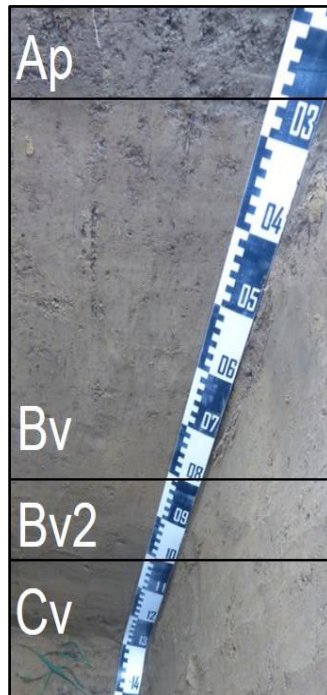


Abbildung 5: Normbraunerde am Standort Puch, Bayern

Auf der Versuchsfläche im bayrischen Puch, nordwestlich von München liegt nach Ad-hoc-AG Boden (2005) eine Normbraunerde vor (Abbildung 5). Die Horizontfolge lautet Ap/Bv/Bv2/Cv und im Oberboden findet sich ein stark lehmiger Sand (Sl4) mit einem Tongehalt von 14 % und einem Humusgehalt von 17 g kg^{-1} . Die dominanten Tonminerale sind Chlorite-Montmorillonite. Der Start-pH liegt bei 5,3 und der empfohlene pH-Wert liegt zwischen 6,3 und 7,0 (VDLUFA 2000a). Bei Anlegung des Feldversuches wurden $70 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1 Parzellen und $105 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1.5 Parzellen ausgebracht und mit einer Scheibenegge etwa 9 cm tief eingearbeitet. Die Fruchtfolge war Winterweizen (2017), Wintergerste (2018) und Raps (2019). Die Probenahmen fanden 9 (2017), 18 (2018) und 30 (2019) Monate nach der Kalkausbringung auf den Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen statt.

2.2.6 Neubrandenburg

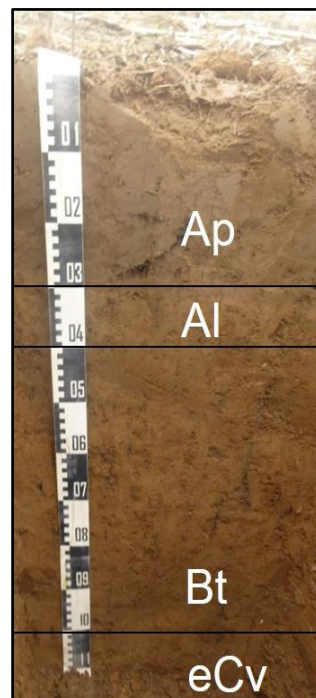


Abbildung 6: Normparabraunerde am Standort Neubrandenburg, Mecklenburg-Vorpommern

Die Versuchsfläche Neubrandenburg befindet sich in Mecklenburg-Vorpommern. Im Oberboden findet sich ein mittel lehmiger Sand (Sl3) mit einem Tongehalt von 11 % und einem Humusgehalt von 13 g kg^{-1} . Die Profilsprache nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ergab eine Normparabraunerde über Geschiebemergel als Ausgangsgestein, welcher bereits im unteren Teil des Bt-Horizonts sichtbar wurde (Abbildung 6). Erklären lässt sich das Vorkommen von Geschiebemergel oder auch Geschiebedecksanden durch die Weichsel-Kaltzeit, welche die Landschaft in Mecklenburg-Vorpommern formte. Die dominanten Tonminerale sind Muskovit und Naktit. Der Start-pH liegt bei 5,8 und der empfohlene pH-Wert liegt zwischen 6,3 und 7,0 (VDLUFA 2000a). Bei Anlegung des Feldversuches wurden $25 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1 Parzellen und $37,5 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1.5 Parzellen ausgebracht und mit Hilfe einer Scheibenegge etwa 12 cm tief eingearbeitet. Die Fruchtfolge war Winterweizen (2017), Winterweizen (2018) und Wintergerste (2019). Die Probenahmen fanden 6 (2017), 12 (2018), 23 (2019) und 37 (2020) Monate nach der Kalkausbringung auf den Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen statt.

2.2.7 Magdeburg



Abbildung 7: Braunerde-Gley am Standort Magdeburg, Sachsen-Anhalt

Auf der Versuchsfläche südöstlich von Magdeburg in Sachsen-Anhalt wird die diagnostische Horizontfolge von Ap/Go-Bv/Go erkennbar, welches nach Ad-hoc-AG Boden (2005) den Bodensubtyp Braunerde-Gley ergab (Abbildung 7). Die Bodenart im Oberboden ist ein schwach toniger Lehm (Lt2) mit einem Tonanteil von 32 % und einem Humusgehalt von 32 g kg^{-1} . Die Fläche liegt direkt neben der Elbe und ist durch fluviatile Ablagerungen (Sand und Schotter) sowie Auensande geprägt. Die dominanten Tonminerale sind Kaolinite-Chlorite. Der Start-pH liegt bei 6,0 und der empfohlene pH-Wert liegt zwischen 6,4 und 7,2 (VDLUFA 2000a). Bei Anlegung des Feldversuches wurden $30 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1 Parzellen und $45 \text{ dt CaO ha}^{-1}$ auf den Kalk 1.5 Parzellen ausgebracht und etwa 5 cm tief eingearbeitet. Die Fruchtfolge war Zuckerrübe (2017), Winterweizen (2018) und Mais (2019). Die Probenahmen fanden 6 (2017), 12 (2018), 23 (2019) und 36 (2020) Monate nach der Kalkausbringung auf den Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen statt.

2.3 Laboruntersuchungen

2.3.1 Messungen an gestörten Bodenmaterial

Das gestörte Bodenmaterial wurde zunächst luftgetrocknet und auf ≤ 2 mm gesiebt. Die Korngrößenverteilung wurde mit Hilfe des Sieb- und Sedimentationsverfahrens nach DIN ISO 11277 (2002) bestimmt. Der pH Wert wurde in einer 0,01 mol/l CaCl_2 Lösung (1:2,5 Boden: CaCl_2) gemessen (DIN ISO 11260 2018).

Die Kationen K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} (S-Wert) wurden aus einer homogenisierten Bodenlösung extrahiert, welche mit BaCl_2 versetzt wurde. Die Konzentrationen der austauschbar gebundenen Kationen in den Extrakten wurden im Flammen-Atomabsorptionsspektrometer (AAS) gemessen. Zusätzlich wurden die sauren austauschbaren Kationen H^+ und Al^{3+} durch Titration in KCl bestimmt. Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde aus der Summe des S-Wertes und der austauschbaren sauren Kationen berechnet und die potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) wurde mit Hilfe des H-Wertes nach Schachtschabel und des S-Wertes berechnet (DIN ISO 11260 2018).

Die Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff wurden mit einem CNS Element-Analyzer (Vario EL III, Elementar, Langenselbold/Deutschland) nach DIN ISO 10694 (1995) und DIN ISO 13878 (1998) bestimmt. Der anorganische Kohlenstoffgehalt wurde aus der CO_2 -Freisetzung bei Zugabe von 10 % HCl bestimmt (Scheibler-Methode, (DIN ISO 10693 1997)). Der organische Kohlenstoffgehalt wurde aus der Differenz zwischen Gesamtkohlenstoffgehalt und anorganischem Kohlenstoffgehalt bestimmt. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff wurde mit dem Faktor 1,72 in den Gehalt an organischer Bodensubstanz umgerechnet.

Die Tonmineralogie wurde mittels Röntgendiffraktometrie (XRD = X-ray diffraction) analysiert (D2 Phaser Bruker AXS GmbH, Karlsruhe/Deutschland). Die Analyse erforderte eine Trennung des Tons vom restlichen Boden mit Hilfe der Sieb- und Sedimentationstechnik. Dann wurde die homogenisierte Tonpaste auf flachen Objektträgern aufgestrichen und in drei Schritten gemessen: Zuerst wurde die luftgetrocknete Probe mit Hilfe der XRD analysiert, danach wurde die Probe mit Ethylenglykol verdampft und mittels XRD analysiert und als letztes wurde die Probe bei 550°C getrocknet und erneut analysiert (Moore und Reynolds 1997). Nach diesen Schritten erfolgte eine grafische Auswertung der Tonminerale mit der Software DIFFRAC.EVA Version V4 (Bruker AXS GmbH, Karlsruhe/Deutschland).

Des Weiteren wurden für das Arbeitspaket 2 folgende physikalische Bodenparameter gemessen oder berechnet:

2.3.2 Messungen an ungestörten (Stechzylinder-)Bodenproben

Die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) wurde mit Hilfe einer Variante der Evaporationsmethode nach Plagge (1991) bestimmt. Hierbei werden die feldfeuchten

Stechzylinderproben (470 cm³) zunächst aufgesättigt und die darauffolgende Austrocknung durch Verdunstung mit Hilfe von Tensiometern und TDR (Time Domain Reflectometry) Sonden dokumentiert. Die aus den entstehenden Gradienten von Matrixpotential und Wassergehalt berechneten k_u Werte werden mit Hilfe des van Genuchten und Mualem Modell (van Genuchten 2005) mit der Software RETC Version 6.02 angepasst, um eine k/ψ_m Kurve mit Hilfe der empirischen Parametern α , n und m zu erstellen.

$$k_u(\psi_m) = k_f \cdot \frac{(1 - (\alpha \cdot \psi_m)^{m \cdot n} \cdot (1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n)^{-m})^2}{(1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n)^{1-m}} \quad \text{Gl. 1}$$

mit

k_u = ungesättigte Wasserleitfähigkeit (cm s⁻¹)

k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm s⁻¹)

ψ_m = Matrixpotential (kPa)

Die Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) wurde nach Hartge (1993) unter instationären Strömungsbedingungen mittels Haubenpermeameter an ungestörten Stechzylinderproben (100 cm³) bestimmt.

Die Kennwerte des Luft- und Wasserhaushaltes: Gesamtporenvolumen (GPV), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Feinporen (FP) wurden aus der Porengrößenverteilung abgeleitet. Diese wurde über die schrittweise Entwässerung ($\psi_m = -60$ hPa, -300 hPa, -500 hPa) von Stechzylinderproben (100 cm³) mittels Unterdrucks bestimmt. Zur Bestimmung des Wassergehaltes bei -15000 hPa wurde die Überdruckmethode an gestörten Stechzylinderproben (2 cm³) verwendet (Hartge und Horn 2009). Die Einteilung der Porenklassen in weite Grobporen (wGP: $\psi_m = 0$ hPa bis -60 hPa; $\emptyset > 50$ μm), enge Grobporen (eGP: $\psi_m = -60$ hPa bis -300 hPa; $\emptyset > 10$ μm), Mittelporen (MP: $\psi_m = -300$ hPa und -15.000 hPa; $\emptyset > 0,2$ μm) und Feinporen (FP: $\psi_m > -15.000$ hPa; $\emptyset < 0,2$ μm) erfolgte nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Hierbei entsprechen die Anteile der wGP die LK, die eGP und MP ergeben die nFK und der Anteil der FP ergibt das TW (Ad-hoc-AG Boden 2005).

Die Lagerungsdichte (ρ_B) wurde aus dem Verhältnis von Gewicht zu Volumen nach der Trocknung bei 105°C für 24 Stunden bestimmt. Das Gesamtporenvolumen (GPV) wurde dann aus der ρ_B und der Festsubstanzdichte (ρ_S) nach der folgenden Gleichung bestimmt:

$$GPV = \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_S}\right) \cdot 100 \quad \text{Gl. 2}$$

mit

GPV = Gesamtporenvolumen (vol.-%)

ρ_B = Lagerungsdichte (g cm⁻³)

ρ_S = Festsubstanzdichte von Quarz (2,65 g cm⁻³)

Die Luftleitfähigkeit (k_l) wurde nach Vorentwässerung auf $\psi_m = -60$ hPa mit Hilfe eines Schwebekörper-Durchflussmessgerätes gemessen (Peth 2004).

$$k_l = \frac{\rho \cdot g \cdot q \cdot L_s}{A_s \cdot p} \quad \text{Gl. 3}$$

mit

k_l = Luftleitfähigkeit (cm s^{-1})

ρ = Dichte von Luft (kg m^{-3})

g = Erdbeschleunigung (m s^{-2})

q = Durch die Probe durchgeströmte Luft in der Zeit (t) ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

L_s = Länge der Probe (m)

A_s = Querschnittsfläche Zylinder (m^2)

p = eingestellter Durchströmungsdruck (hPa)

Für das Arbeitspaket 3 wurden weitere physikalische Parameter zur Bewertung der Strukturbildung und -entwicklung bestimmt:

Die Scherparameter wurden an $\psi_m = -60$ hPa vorentwässerten Proben mit Hilfe eines Kastenschervergerätes ermittelt. Für die Ermittlung der Mohr-Coulomb'schen Bruchgeraden wurde der maximale Scherwiderstand bei definierten Auflasten (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) bestimmt und gegen die Normalspannung aufgetragen. Anschließend wurden aus dem Schnittpunkt der Bruchgeraden mit der Ordinate die Kohäsion c und aus der Steigung der Geraden der Winkel der inneren Reibung ϕ abgeleitet (Kézdi und Rétháti 1988).

Mit Hilfe einer pneumatischen Multistep-Drucksetzungsanlage wurden steigende Auflasten von 0 bis 300 kPa auf vorentwässerte ($\psi_m = -60$ hPa) Stechzylinderproben aufgebracht. Aus dem Drucksetzungsverhalten des Bodens kann anschließend die als Vorbelastung (P_v) definierte Normalspannung (Vertikalspannung) am Übergang vom Wiederverdichtungsast (elastischer Bereich) in den Erstverdichtungsast (plastischer Bereich) grafisch nach Casagrande (1936) abgeleitet werden.

2.3.3 Messungen an individuellen Aggregaten

Die Aggregatstabilität wurde im uniaxialen Scherversuch (= Crushing Test) an Einzelaggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) ermittelt. Für diese Messung wurden ungestörte Bodenblöcke (1 dm^3) im Feld entnommen, um im Labor daraus die Aggregate zu gewinnen. Hierbei wurde immer entlang der schwächsten Bruchebene des Aggregates gebrochen. Die entnommenen Aggregate wurden anschließend getrocknet, um sie für den Crushing Test vorzubereiten. Ein zweiter Satz von Aggregaten wurde in gleicher Weise aus ungestörten auf $\psi_m = -300$ hPa entwässerten Zylinderproben (236 cm^3) entnommen, und unmittelbar danach der Crushing

Test durchgeführt. Für die Durchführung des Crushing Tests wurde das Zweisäulenprüfsystem (Instron Serie 5569, Darmstadt/Deutschland, Software Merlin 5.31.00) verwendet. Während der Messung bewegt sich eine Traverse 5 mm min^{-1} senkrecht von oben auf das Aggregat bis dieses zerbricht. Die dabei aufgewendete Kraft wird kontinuierlich gemessen. Die maximale Zugspannung (Y) im Inneren des Aggregates wurde nach Dexter und Kroesbergen (1985) berechnet (Gl. 4).

$$Y = 0.576 \cdot F / d^2 \quad \text{Gl. 4}$$

mit

Y = Zugspannung des Einzelaggregates (kPa)

F = Kraft bei Bruch (N)

d = Aggregatedurchmesser (mm)

Je höher Y im Moment des Bruchs, umso stabiler ist das Aggregat.

Die Erosionsstabilität (festigkeit) von Aggregaten wurde mit der „soil aggregate erosion“ (SAE)-Kammer Methode bestimmt (Santos et al. 1997). Hierfür wurde die äußere Schicht von luftgetrockneten Aggregaten „abgeschält“ (Urbanek et al. 2014). Die abgetragene Schicht und der verbleibende Aggregatkern repräsentieren hierbei die äußeren (äuß.) und inneren (inn.) Eigenschaften der Aggregate (Park und Smucker 2005a). Das Aggregatvolumen sowie die Aggregatdichte wurden vor und nach dem Entfernen der äußeren Schicht im Pycnometer (Geopyc 1360, Micromeritics, Unterschleißheim/Deutschland) bestimmt. Das Entfernen der äußeren Schicht der Aggregate wurde mit Hilfe von Erosionskammern ($\varnothing = 24 \text{ mm}$), welche auf einem Rotationsschüttler (IKA KS 260 control, Staufen, Deutschland) bei 400/U min mit ständigen Kontakt zu den Schleifkammerwänden gedreht wurde, solange durchgeführt bis das geschälte Volumen etwa 50 % des ursprünglichen Volumens betrug. Um dies zu ermitteln, wurden Gewicht, Dichte und das Volumen jedes Einzelaggregates in bestimmten (nicht festgelegten) Zeitabständen während des Abschälprozesses bestimmt. Die auf die Aggregate wirkende Zentrifugalkraft in den Kammern wurde nach Gl. 5 bestimmt.

$$C_F = m(t) [R_{SK} + R_{SAE} - R_a(t)] \omega^2 \quad \text{Gl. 5}$$

mit

C_F = Zentrifugalkraft ($g \text{ mm/s}^2$)

$m(t)$ = Masse (g) zum Zeitpunkt t (min.)

R_{SK} = Radius der Schwingerregerbewegung (mm)

R_{SAE} = Radius der Erosionskammer (mm)

$R_a(t)$ = Radius des Aggregates (mm) zum Zeitpunkt t (min.)

ω = Winkelgeschwindigkeit (Radiant/sek.)

Die äußere und innere Erosionsfestigkeit der Aggregate (E_s) entspricht den Erosionskräften, die auf die Oberfläche jeder Bodenaggregatschicht einwirken. Diese wurden aus den auf die Aggregatoberfläche einwirkenden Reibungskräften berechnet, indem die Masse des Bodens, die während einer bestimmten Zeit der einwirkenden Zentrifugalkraft abgetragen wurde, verwendet wurde (Park und Smucker 2005a) (Gl. 6).

$$E_s = C_F / \left[\frac{m(t_n) - m(t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} \right] \quad \text{Gl. 6}$$

mit

E_s = Erosionsfestigkeit des Einzelaggregates (N g/min)

C_F = Zentrifugalkraft (g mm/s²)

$m(t_n) - m(t_{n-1})$ = Masse des Bodenaggregates (g) zum Zeitpunkt t_n und t_{n-1} (min.)

Das abgeschälte Material, sowie der verbleibende Kern der Aggregate wurde für weitere chemische Analysen (pH, C und N verwendet).

2.4 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse wurde mit der Statistiksoftware R Version 3.5.1 (R Core Team 2017) durchgeführt. Basierend auf der grafischen Residualanalyse wurde angenommen, dass die pH-Werte, Wasserretentionsparameter und Scherparameter normalverteilt und aufgrund der unterschiedlichen Kalkausbringungsraten am Standort heteroskedastisch sind. Die Werte von k_s und k_l sind nicht normalverteilt. Aufgrund dieser Annahmen wurde eine Varianzanalyse (einfaktorielle ANOVA) durchgeführt (Snedecor und Cochran 1996). Die Mittelwerte der jeweiligen Kalkvarianten wurden auf den vier Parzellen betrachtet und für jeden Standort getrennt verglichen (Tukey-Test). Die Signifikanz der verschiedenen Tests wurde auf ein α -Niveau von 5 % gesetzt. Für die grafische Darstellung wurden Box-Whisker-Plots gewählt (McGill et al. 1978), die den Median (Mittellinie), das 25/75. Perzentil (unterer/oberer Rand der Box), das 95. und 5. Perzentil (Whiskers), das 1. und 99. Perzentil (untere/obere Linie), Ausreißer (Punkte) und den Mittelwert (Quadrate) zeigen.

3. Ergebnisse

3.1 Struckum

3.1.1 Kationenaustauschkapazität und pH

Als typische Folge der Kalkung ist Ca^{2+} am Standort Struckum in der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante das am stärksten vertretene austauschbare Kation mit $> 90 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Tabelle 2). Im Erkennbar wird, dass durch die Kalkung auch die anderen austauschbaren Kationen und die KAK_{eff} insgesamt beeinflusst werden. Besonders der Mg^{2+} Gehalt sinkt auf den gekalkten Varianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) in den Untersuchungsjahren 2017–2020. Auch die Anteile an K^+ und Na^+ verringert sich auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 in allen Untersuchungsjahren. Gleichzeitig verringern sich insbesondere die Anteile an H^+ und Al^{3+} auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu der Kontrollvariante (Kalk 0) in allen Untersuchungsjahren (H^+ stärker als Al^{3+}).

Die Kalkzugabe erhöht auf allen untersuchten Parzellen die pH-Werte (Tabelle 2). In Struckum liegt der nach VDLUFA (2000a) empfohlene pH Wert zwischen 6,4 und 7,2. Die pH-Werte auf den Kalk 0 Parzellen sind 4,7 (2017), 5,3 (2018), 5,4 (2019) und 5,4 (2020). Der angestrebte Zielbereich konnte auf den Kalk 1 Parzellen in keinem der vier beprobten Jahre erreicht werden. Die auf den Kalk 1 Parzellen gemessenen Werte liegen bei 5,5 (2017), 5,9 (2018), 6,2 (2019) und 6,2 (2020). Auf den Kalk 1.5 Parzellen wurde der Zielbereich erreicht und die pH-Werte liegen hier bei 6,3 (2017), 6,6 (2018), 6,4 (2019) und 6,5 (2020).

Tabelle 2: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$mmol_c kg^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$mmol_c kg^{-1}$] ergeben und der pH Wert ($CaCl_2$) der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden (0-30 cm) des Standortes Struckum für die Jahre 2017–2020 ($n = 2$).

| Jahr | Kalk-variante | K^+ | Na^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} [$mmol_c kg^{-1}$] | H^+ | Al^{3+} | KAK_{eff} | pH [$CaCl_2$] |
|------|---------------|-------|--------|-----------|-----------------------------------|-------|-----------|-------------|--------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 3,5 | 1,5 | 25,1 | 92,3 | 0,9 | 0,2 | 123,5 | 4,7 |
| | Kalk 1 | 3,3 | 1,2 | 20,0 | 97,4 | 0,6 | 0,2 | 122,6 | 5,5 |
| | Kalk 1.5 | 3,2 | 1,6 | 24,3 | 112,7 | 0,4 | 0,1 | 142,2 | 6,3 |
| 2018 | Kalk 0 | 2,1 | 1,3 | 24,8 | 91,3 | 0,6 | 0,2 | 120,1 | 5,3 |
| | Kalk 1 | 1,3 | 1,1 | 20,8 | 100,3 | 0,4 | 0,2 | 124,1 | 5,9 |
| | Kalk 1.5 | 2,3 | 1,1 | 21,2 | 116,0 | 0,2 | 0,1 | 140,9 | 6,7 |
| 2019 | Kalk 0 | 3,4 | 1,4 | 26,1 | 95,4 | 0,7 | 0,2 | 127,3 | 5,3 |
| | Kalk 1 | 3,3 | 1,2 | 20,4 | 110,9 | 0,2 | 0,2 | 136,1 | 6,2 |
| | Kalk 1.5 | 3,3 | 1,1 | 24,5 | 117,6 | 0,2 | 0,1 | 146,7 | 6,4 |
| 2020 | Kalk 0 | 3,3 | 1,3 | 25,4 | 91,9 | 0,9 | 1,3 | 124,0 | 5,4 |
| | Kalk 1 | 2,9 | 1,0 | 21,0 | 115,5 | 0,6 | 0,5 | 141,6 | 6,2 |
| | Kalk 1.5 | 2,8 | 0,9 | 23,1 | 132,7 | 0,3 | 0,3 | 160,1 | 6,5 |

3.1.2 Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter

Zwölf Monate nach der Kalkung (Untersuchungsjahr 2017) ist der Unterschied zwischen der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f) in den gekalkten Parzellen und den Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort Struckum gering (Abbildung 8). Die k_f (Mittel-)Werte liegen laut Ad-hoc-AG Boden (2005) im „sehr hohem“ Bereich für alle Kalkvarianten. In den Jahren 2018–2019 stieg die k_f nach der Kalkung auf beiden Kalkvarianten im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 in Struckum deutlich (aber nicht signifikant) an. Die k_f (Mittel-)Werte liegen laut Ad-hoc-AG Boden (2005) im „geringen“ Bereich auf Kalk 0 (2018) und steigen auf „mittlere“ Bereiche der gekalkten Varianten (2018). Im Untersuchungsjahr 2019 steigen die Werte dann weiter von „mittel“ (Kalk 0) auf „hoch“ bis „sehr hoch“ (Kalk 1 und Kalk 1.5). Im Jahr 2020 weisen die gekalkten Varianten geringere Leitfähigkeiten auf als die Kontrolle. Die Einstufung der Werte

nach Ad-hoc-AG Boden (2005) sinkt von „sehr hoch“ in Kalk 0 auf „hoch“ in Kalk 1.5.

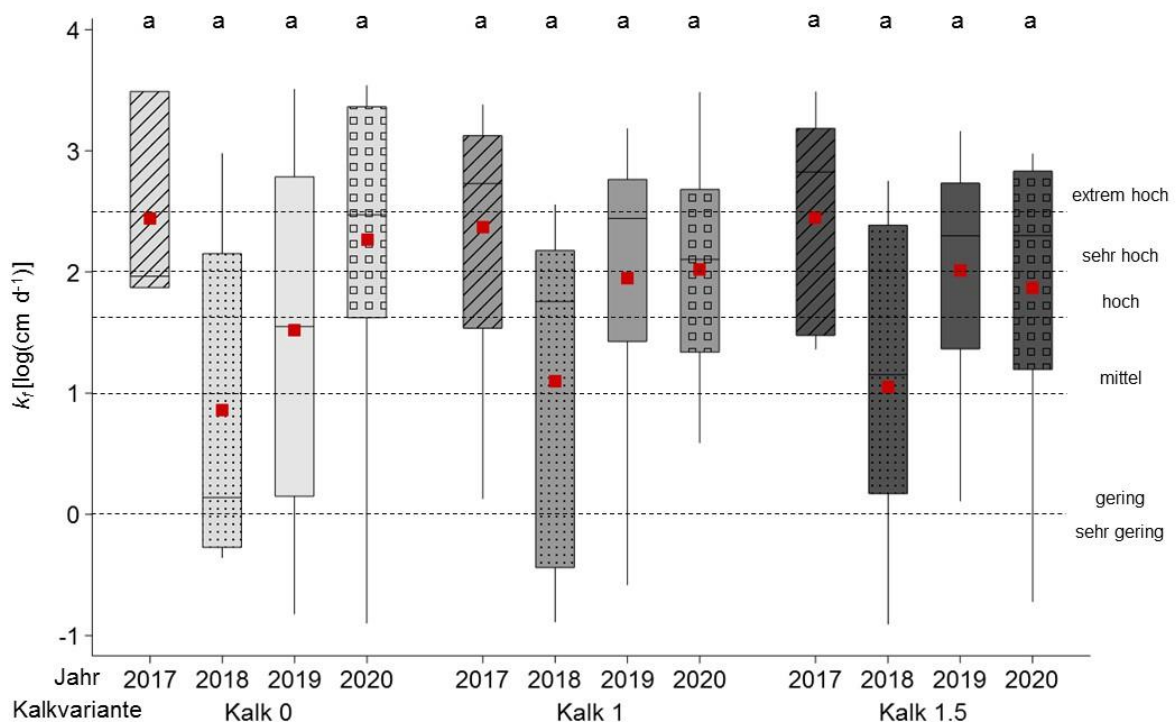


Abbildung 8: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) am Standort Struckum für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 12$). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Im ersten Untersuchungsjahr (2017) und damit 12 Monate nach der Kalkung liegt die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) in der Kalk 1.5 Variante bis zu einem pF von 1,8 deutlich über jener der Kalk 0 und Kalk 1 Variante am Standort Struckum (Abbildung 9). Danach fällt die k_u stark ab. Für die Kalk 0 und Kalk 1 Varianten ergibt sich der gleiche Verlauf der k_u . 12 Monate nach der Kalkung (2017) und auch im 2ten Untersuchungsjahr (2018), 26 Monate nach der Kalkung, ist der Verlauf der k_u der Varianten Kalk 0 und Kalk 1 wieder identisch. Der Verlauf der k_u der Kalk 1.5 Variante liegt im gesamten gemessenen Bereich über den k_u -Verläufen der Kalk 0 und Kalk 1 Varianten. Im Untersuchungsjahr 2019 und damit 31 Monate nach der Kalkung zeigt sich ein gegensätzliches Bild. Hier liegen die k_u in den Kalk 0 und Kalk 1 Varianten über den k_u der Kalk 1.5 Variante.

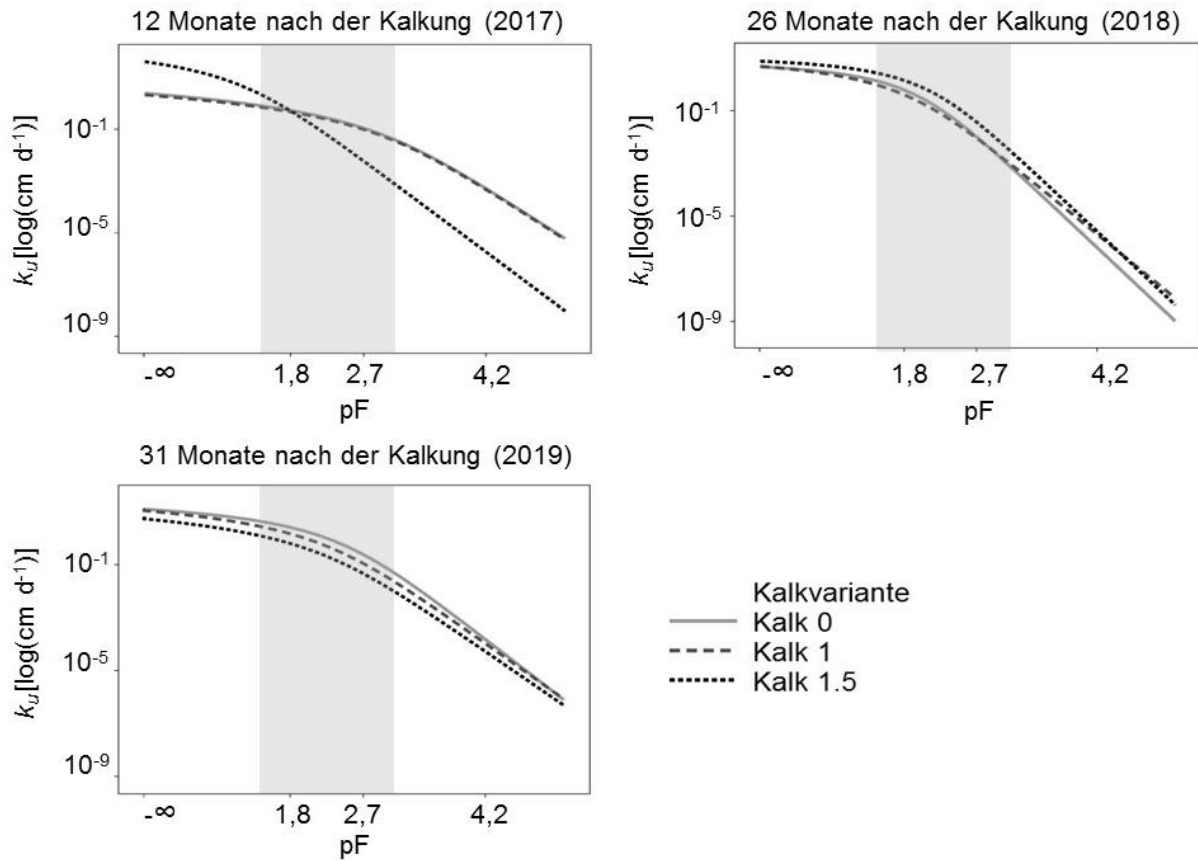


Abbildung 9: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Struckum für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5), in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die graue Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten ($n = 4$).

Am Standort Struckum sind kaum signifikante Unterschiede der Lagerungsdichten ρ_B , des Gesamtporenvolumens (GPV) und der Luftleitfähigkeit (k_l) auf den unterschiedlichen Kalkvarianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) zu erkennen (Tabelle 3). Tendenziell zeigt sich jedoch, dass ρ_B in allen untersuchten Jahren auf den Kalk 1 Parzellen geringer ist als auf den Kalk 0 Parzellen. Für die Kalk 1.5 Variante zeigt sich zunächst der gleiche Trend in den ersten beiden Untersuchungsjahren (2017 und 2018), danach steigt die ρ_B leicht im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Alle Werte der ρ_B sind als gering einzustufen nur die Kalk 1.5 Variante im Untersuchungsjahr 2020 ist als „mittel“ nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzustufen. Das GPV steigt im ersten Untersuchungsjahr (2017) auf den Kalk 1.5 Varianten signifikant an im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). In den darauffolgenden Jahren sind die Werte für das GPV etwas geringer auf den Kalk 1.5 Varianten als auf den Kalk 0 Parzellen. Alle Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ einzustufen. Die Luftleitfähigkeit (k_l) des Oberbodens am Standort Struckum wurde bei $\psi_m = -6$ kPa gemessen und zeigt hohe Schwankungen über die Jahre. Im ersten Untersuchungsjahr 2017 sinkt die k_l auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen. Die Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „gering“ einzustufen. Im zweiten Untersuchungsjahr (2018) liegen die Werte im „mittleren“ bis „hohem“ Bereich auf allen untersuchten Parzellen. 2019 und 2020 zeigt sich, dass die k_l auf den gekalkten Parzellen der Kalk 1 Variante am höchsten sind und nach Ad-hoc-AG Boden (2005) von „mittel“ auf Kalk 0 zu „sehr hoch“ (2019) und „hoch“ (2020) auf den Kalk 1 Parzellen steigen.

Tabelle 3: Lagerungsdichte ρ_B in g cm^{-3} und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_l) bei $\psi_m = -6 \text{ kPa}$ in cm d^{-1} sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk-variante | Lagerungsdichte (ρ_B) [g cm^{-3}] | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | GPV Vol.% | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | k_l bei $\psi_m = -6 \text{ kPa}$ cm d^{-1} | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) |
|------|---------------|--|--|--------------|--|---|--|
| 2017 | Kalk 0 | 1,40 | gering | 47 | hoch | 73 | gering |
| | Kalk 1 | 1,38 | gering | 47 | hoch | 53 | gering |
| | Kalk 1.5 | 1,26 | gering | 52* | hoch | 65 | gering |
| 2018 | Kalk 0 | 1,32 | gering | 50 | hoch | 294 | hoch |
| | Kalk 1 | 1,32 | gering | 50 | hoch | 175 | mittel |
| | Kalk 1.5 | 1,31 | gering | 50 | hoch | 351 | hoch |
| 2019 | Kalk 0 | 1,25 | gering | 52 | hoch | 141 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,23 | gering | 53 | hoch | 497 | sehr hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,29 | gering | 51 | hoch | 121 | mittel |
| 2020 | Kalk 0 | 1,39 | gering | 48 | hoch | 202 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,35 | gering | 49 | hoch | 275 | hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,40 | mittel | 47 | hoch | 84 | gering |

Die Luftkapazität (LK) steigt im Oberboden der gekalkten Parzellen der Kalk 1 Variante im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) in allen Untersuchungsjahren am Standort Struckum (Abbildung 10). Die Werte der LK sind hier „mittleren“ bis teilweise „hohem“ Bereich einzustufen. Die Kalk 1.5 Variante zeigt nur in den Jahren 2018 und 2020 etwas höhere LK Werte als die Kontrollvariante Kalk 0.

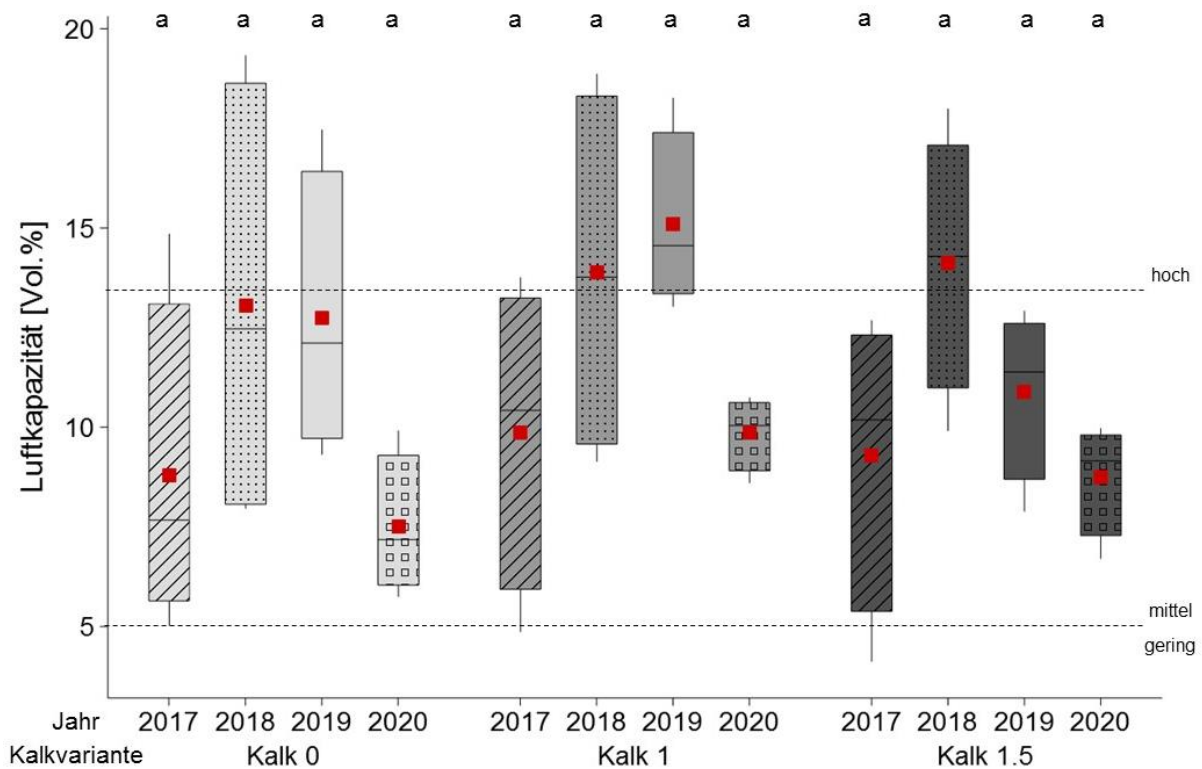


Abbildung 10: Luftkapazität [Vol.-%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) steigt im ersten Untersuchungsjahr (2017) auf den Kalk 1.5-Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 signifikant an (Abbildung 11). Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich damit von „sehr gering“ auf den Kalk 0 Parzellen zu „mittel“ auf den Kalk 1.5 Parzellen. In den darauffolgenden Jahren (2018-2020) liegen die eingestufteten Werte auf allen Parzellen im „geringen“ bis „mittleren“ Bereich und zeigen somit keine Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Varianten (Kalk 0).

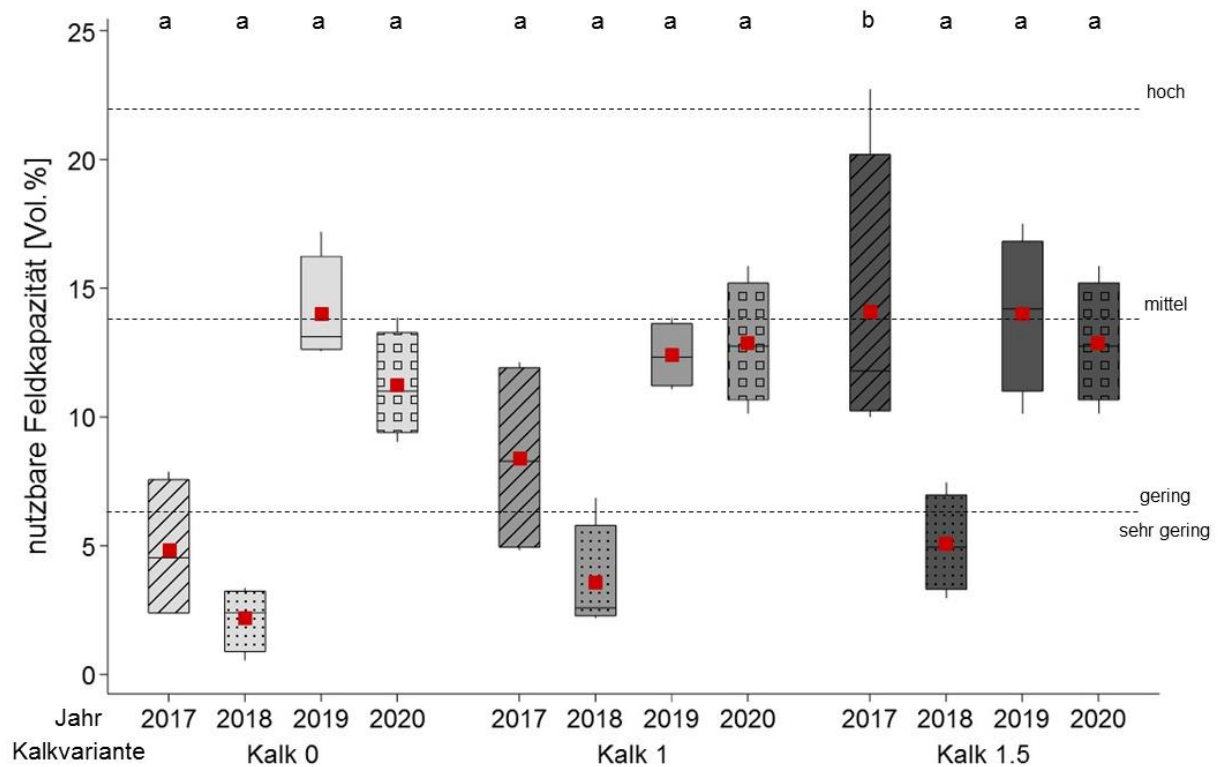


Abbildung 11: Nutzbare Feldkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum (n = 8) für die Jahre 2017-2020. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Der Totwassergehalt (TW) im Oberboden des Standortes Struckum verringert sich signifikant auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr (2017) (Abbildung 12). Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „sehr hoch“ (Kalk 0) bis „hoch“ auf den Kalkvarianten einzuordnen. In den darauffolgenden Untersuchungsjahren (2018 – 2020) sind keine Unterschiede der TW-Gehalte zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen zu erkennen. Auch hier befinden sich die TW-Gehalte in „hohen“ bis „sehr hohen“ Bereichen.

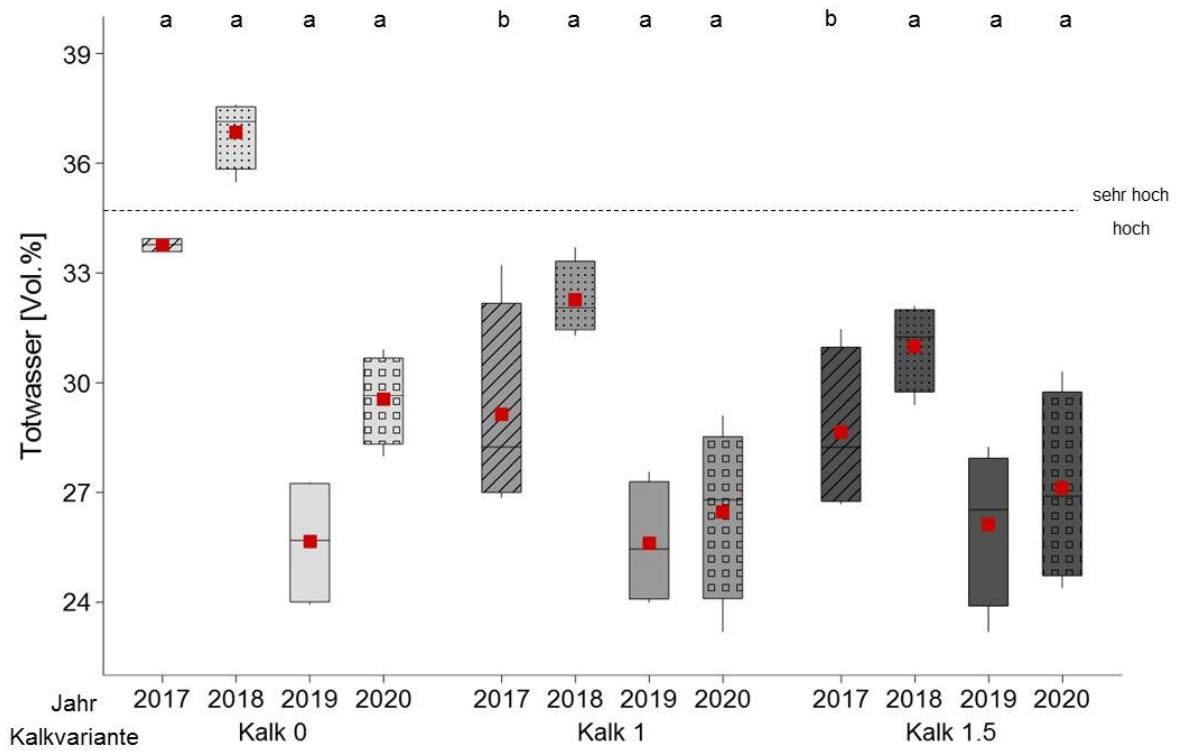


Abbildung 12: Totwassergehalte [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum in den Jahren 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.1.3 Scherparameter und Vorbelastungswerte

Die Scherparameter Kohäsion (c) und Winkel der Inneren Reibung (φ) zeigen keine signifikanten Unterschiede der Kalkvarianten Kalk 1 und Kalk 1.5 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 (Tabelle 4). Es sind erhöhte Werte der c auf den gekalkten Parzellen der Variante Kalk 1.5 in den Jahren 2018 und 2019 zu erkennen. Für das erste Jahr 2017 und das letzte Jahr 2020 zeigt sich allerdings hier eher ein umgekehrter Trend zu einer abnehmenden c . Gleichzeitig verändert sich der φ kaum.

Tabelle 4: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in $^{\circ}$ (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 ($n = 2$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk- variante | c [kPa] | φ [$^{\circ}$] |
|------|-------------------|--------------|-----------------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 19 | 37 |
| | Kalk 1 | 22 | 35 |
| | Kalk 1.5 | 12 | 39 |
| 2018 | Kalk 0 | 18 | 36 |
| | Kalk 1 | 19 | 35 |
| | Kalk 1.5 | 21 | 34 |
| 2019 | Kalk 0 | 17 | 33 |
| | Kalk 1 | 15 | 37 |
| | Kalk 1.5 | 24 | 35 |
| 2020 | Kalk 0 | 34 | 28 |
| | Kalk 1 | 33 | 34 |
| | Kalk 1.5 | 19 | 33 |

Der maximale Scherwiderstand, gemessen als Funktion der Normalspannung, war in Struckum auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) in den ersten beiden Untersuchungsjahren (2017 und 2018) geringer (Abbildung 13). 2017 sorgten hohe Auflasten während des Kastenscherversuchs für Porenwasserüberdrücke, sodass keine Messdaten bei einer Normalspannung von 300 kPa aufgenommen werden konnten. 2019 und 2020 (31 und 45 Monate nach der Kalkung) sind die Scherwiderstände dann auf den gekalkten Parzellen höher als in der Kontrollvariante.

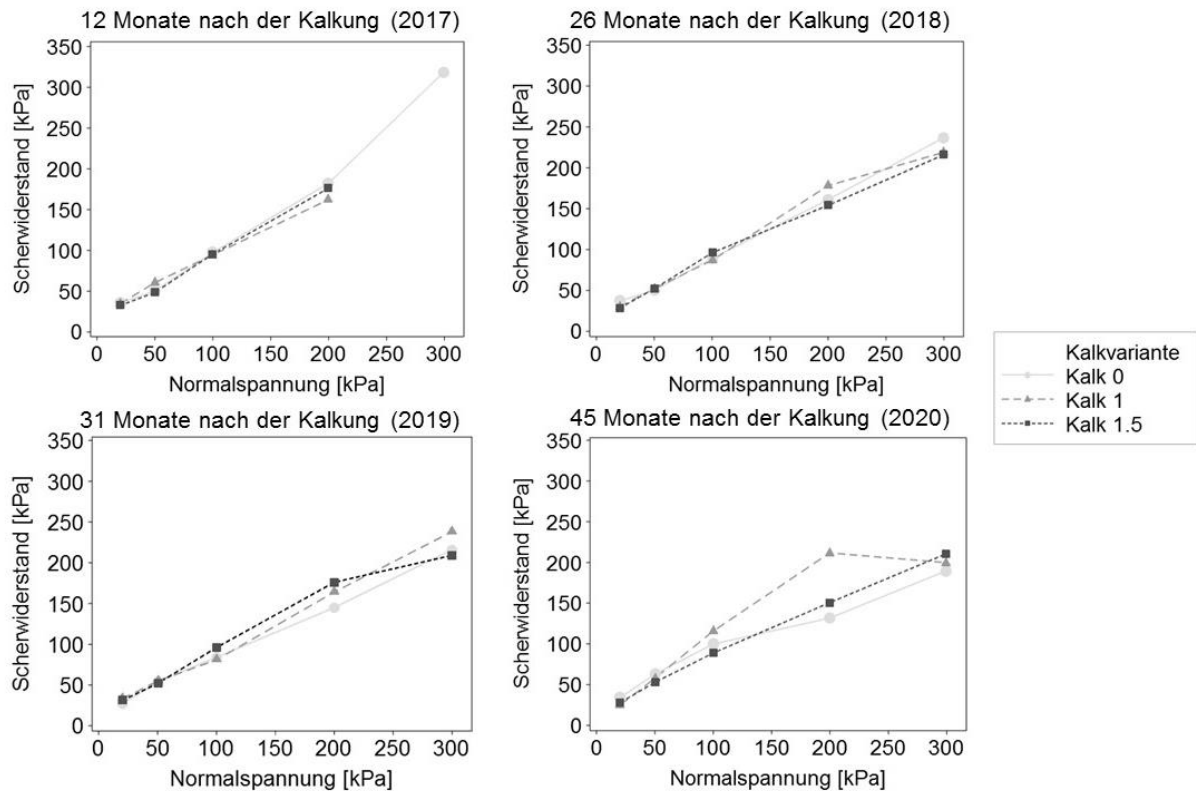


Abbildung 13: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Struckum für die Jahre 2017-2020 (n = 4).

Es sind keine signifikanten Unterschiede der Vorbelastungswerte auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort Struckum in den Jahren 2017 bis 2019 zu erkennen (Abbildung 14). Die Vorbelastung sinkt auf allen Parzellen von 2017 bis 2019. Alle (Mittel-)Werte sind laut DVWK (1997) als gering einzustufen (Ausnahme 2019: Kalk 1.5 „sehr gering“).

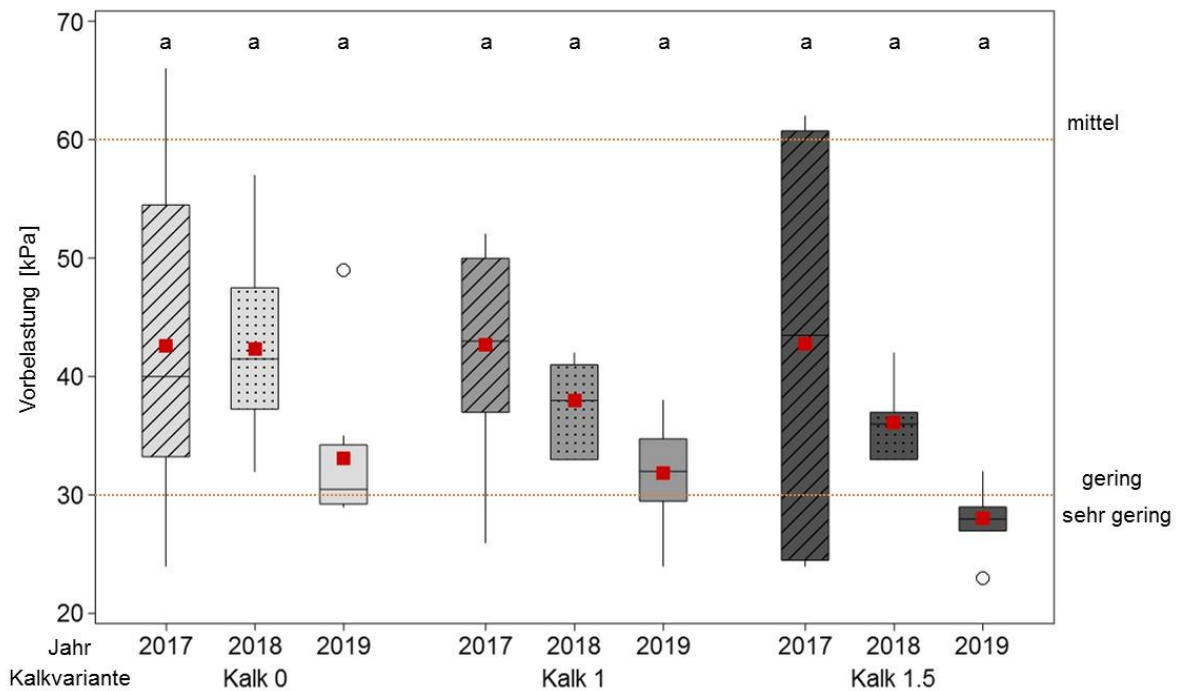


Abbildung 14: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Struckum für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.1.4 Zugspannung

Am Untersuchungsstandort Struckum wurden für die luftgetrockneten Aggregate signifikant niedrigere Werte der Zugspannung (Y) auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im Jahr 2018 festgestellt (Abbildung 15). Gleiches lässt sich für die auf $\psi_m = -30$ kPa entwässerten Aggregate aufzeigen. Hier sind im Jahr 2019 die Werte der Y signifikant niedriger auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu den Kalk 0 Parzellen. Im Jahr 2020 sind auf allen gekalkten Parzellen die Y signifikant geringer.

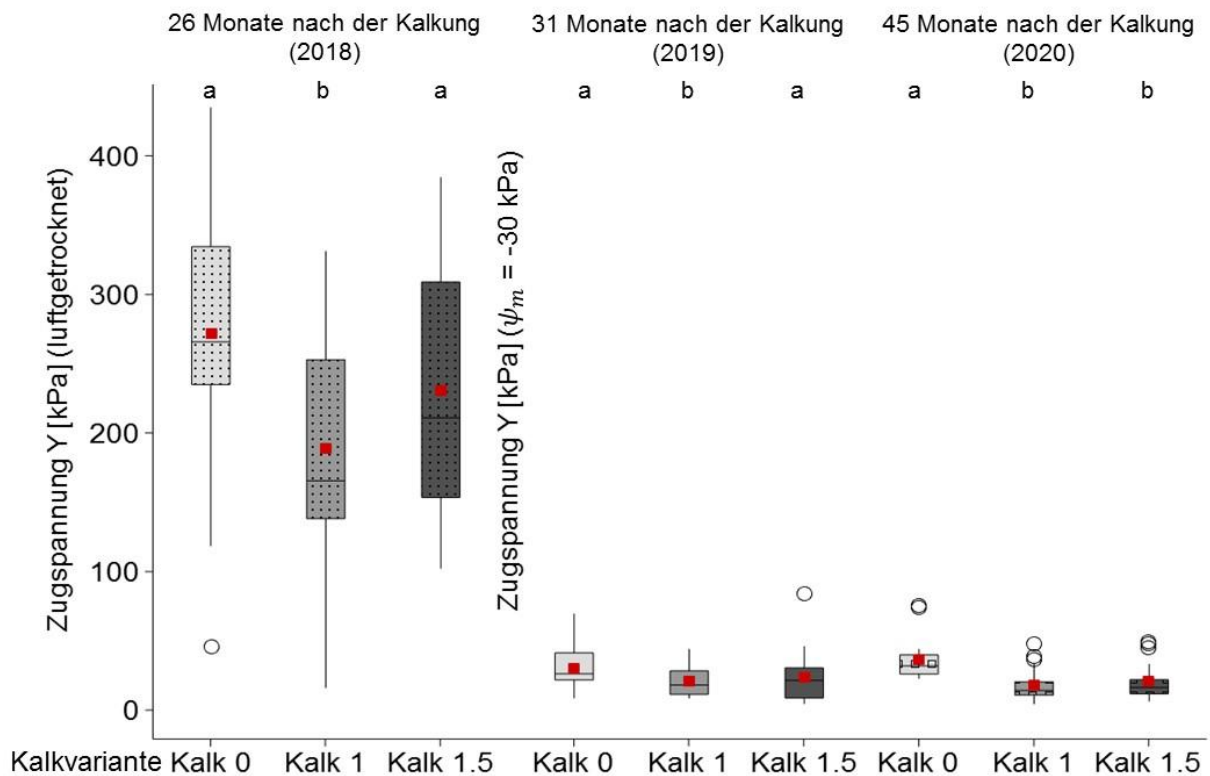


Abbildung 15: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019 und 2020) aus dem Oberboden des Standortes Struckum für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 20$). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.2 Barlt

3.2.1 Kationenaustauschkapazität und pH

Am Standort Barlt ist, als typische Folge der Kalkung, Ca^{2+} das am stärksten vertretene austauschbare Kation mit $> 200 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in den Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten (Tabelle 5). Im Vergleich mit den anderen austauschbaren Kationen ist zu sehen, dass auch ohne eine Kalkung Ca^{2+} den größten Anteil an der KAK_{eff} im Boden hat. Der Mg^{2+} Gehalt ist kaum beeinflusst auf den gekalkten Varianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) in den Untersuchungsjahren 2017-2020. Auch die Anteile an K^+ und Na^+ schwanken auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 in allen Untersuchungsjahren, und sind insgesamt geringer. Gleichzeitig verringern sich insbesondere die Anteile an H^+ und Al^{3+} auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu der Kontrollvariante (Kalk 0) in den Untersuchungsjahren (2017-2019) (H^+ stärker als Al^{3+}).

Tabelle 5: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$] ergeben und der pH Wert [CaCl_2] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Barlt für die Jahre 2017-2020 ($n = 2$).

| Jahr | Kalk-variante | K^+ | Na^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$] | H^+ | Al^{3+} | KAK_{eff} | pH [CaCl_2] |
|------|---------------|--------------|---------------|------------------|---|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 9,8 | 1,5 | 22,9 | 207,1 | 1,2 | 0,4 | 243 | 5,9 |
| | Kalk 1 | 10,0 | 1,2 | 22,7 | 217,6 | 0,7 | 0,2 | 252 | 6,2 |
| | Kalk 1.5 | 9,4 | 1,5 | 22,4 | 219,3 | 0,4 | 0,1 | 253 | 6,3 |
| 2018 | Kalk 0 | 10,9 | 1,6 | 21,0 | 202,7 | 0,4 | 0,1 | 237 | 5,9 |
| | Kalk 1 | 9,5 | 1,3 | 21,7 | 205,6 | 0,5 | 0,0 | 239 | 6,2 |
| | Kalk 1.5 | 10,6 | 1,3 | 20,4 | 215,5 | 0,4 | 0,2 | 248 | 6,5 |
| 2019 | Kalk 0 | 10,4 | 1,2 | 22,2 | 205,3 | 0,4 | 0,1 | 240 | 5,8 |
| | Kalk 1 | 10,1 | 1,1 | 21,1 | 218,6 | 0,4 | 0,1 | 252 | 6,0 |
| | Kalk 1.5 | 10,6 | 1,1 | 23,2 | 218,9 | 0,3 | 0,1 | 254 | 6,4 |
| 2020 | Kalk 0 | 9,8 | 1,3 | 23,3 | 195,4 | 1,0 | 0,0 | 231 | 5,9 |
| | Kalk 1 | 10,1 | 1,5 | 23,9 | 222,8 | 0,9 | 0,2 | 259 | 6,1 |
| | Kalk 1.5 | 9,9 | 1,3 | 20,8 | 226,0 | 1,0 | 0,8 | 260 | 6,3 |

Am Standort Barlt liegt der empfohlene pH-Wert nach VDLUFA (2000a) zwischen 5,9 und 6,4. Die pH-Werte auf den Kalk 0 Parzellen sind 5,9 (2017, 2018), 5,8 (2019) und 5,9 (2020). Der angestrebte Zielbereich konnte nach der Kalkgabe auf den Kalk 1 und Kalk 1,5 Parzellen erreicht werden. Die auf den Kalk 1 Parzellen gemessenen Werte liegen bei 6,2 (2017), 5,9 (2018), 6,0 (2019) und 6,1 (2020). Die Einzelwerte der Kalk 1 Parzellen zeigen im Jahr 2018,

dass der pH-Wert noch vereinzelt unter dem empfohlenen Zielwertbereich lag. Auf den Kalk 1,5 Parzellen liegen die pH-Werte bei 6,3 (2017), 6,5 (2018), 6,4 (2019) und 6,3 (2020) und somit auch im empfohlenen Bereich.

3.2.1 Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter

Zwölf Monate nach der Kalkung (Untersuchungsjahr 2017) ist der Unterschied zwischen der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f) in den gekalkten Parzellen und den Kontrollparzellen (Kalk 0) am Untersuchungsstandort in Barlt gering (Abbildung 16). Die k_f (Mittel-)Werte liegen laut Ad-hoc-AG Boden (2005) im „sehr hohem“ bis „extrem hohem“ Bereich. In den Jahren 2018-2019 stieg die k_f nach der Kalkung auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 in Barlt deutlich (signifikant im Untersuchungsjahr 2018) an. Die k_f (Mittel-)Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) auf Kalk 0 (2018) als „hoch“ und steigen auf „extrem hoch“ (2018) in der Kalk 1 Variante. Im Untersuchungsjahr 2019 steigen die Werte dann weiter von „gering“ (Kalk 0) auf „mittel“ (Kalk 1). Im Jahr 2020 sind sogar geringere Leitfähigkeiten auf der Kalk 1 Variante im Vergleich zur Kalk 0 Variante zu erkennen. Die eingestuftene Werte nach Ad-hoc-AG Boden (2005) sinken von „hoch“ auf Kalk 0 auf „gering“ bei Kalk 1 und bleiben „hoch“ auf Kalk 1.5.

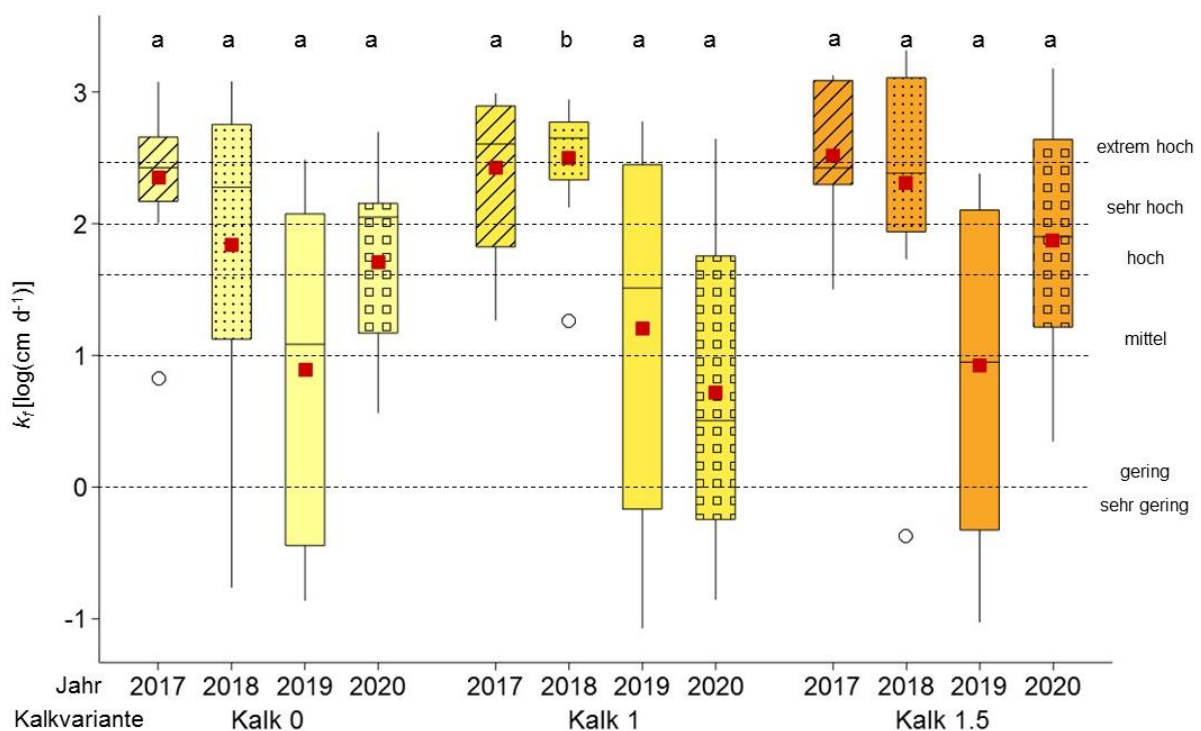


Abbildung 16: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1

(Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 12$). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Im ersten Untersuchungsjahr (2017) und damit 12 Monate nach der Kalkung liegen die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) in der Kalk 0 und Kalk 1 Variante bis zu einem pF von 1,8 deutlich jener der Kalk 1.5 Variante am Standort Barlt (Abbildung 17). Für die Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der k_u . 26 Monate nach der Kalkung (2018). Die Kalk 0 Variante liegt bis zu einem pF 2,7 über den k_u Verläufen von Kalk 1 und Kalk 1.5. Im Untersuchungsjahr 2019 und damit 32 Monate nach der Kalkung zeigt sich, dass die k_u von Kalk 1 über denen von Kalk 0 und Kalk 1.5 liegen bis zu einem pF von 1,8. Danach liegt die k_u in der Kalk 1.5 Variante über denen der Kalk 0 und Kalk 1 Variante.

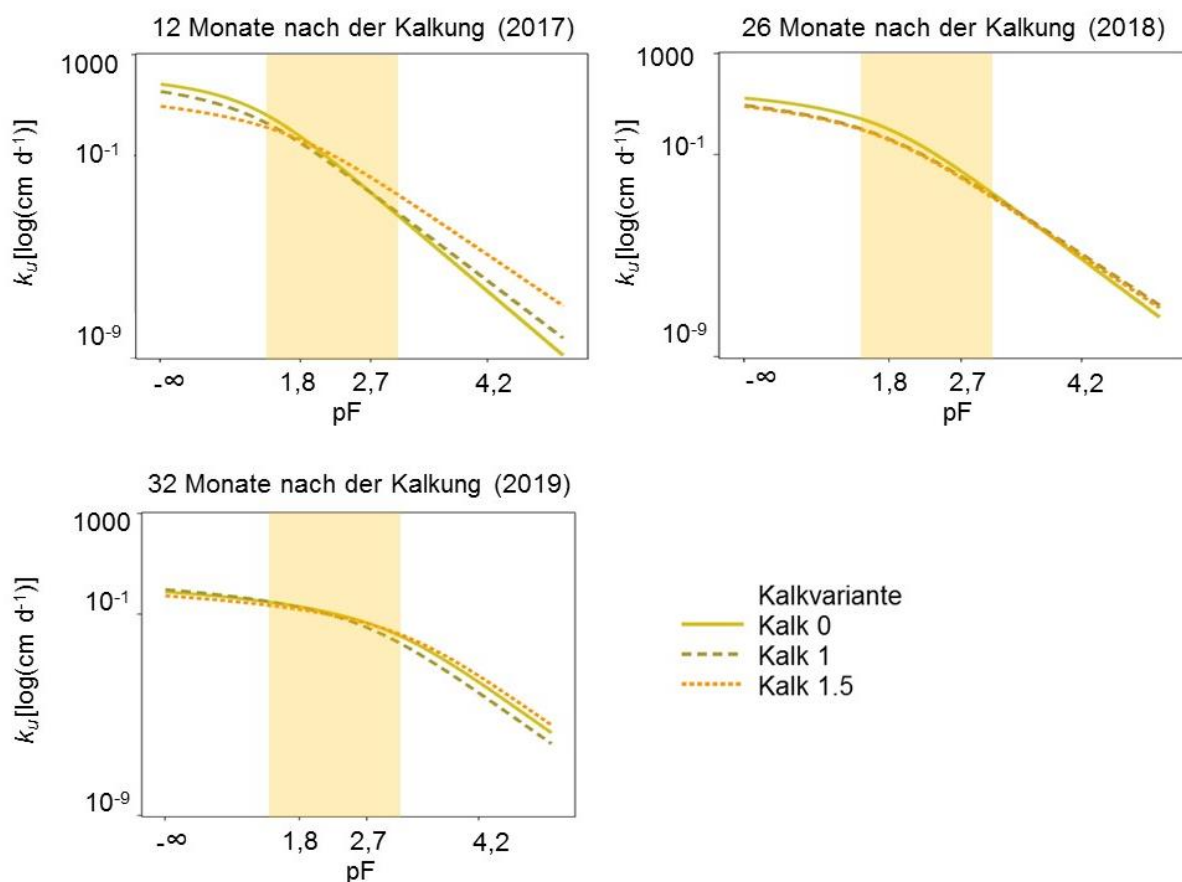


Abbildung 17: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\text{log}(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die gelbe Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten ($n = 4$).

Am Standort Barlt sind kaum signifikante Unterschiede der Lagerungsdichten ρ_B , des Gesamtporenvolumens (GPV) und der Luftleitfähigkeit (k_l) auf den unterschiedlichen Kalkvarianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) zu erkennen (Tabelle 6). Tendenziell zeigt sich jedoch, dass die ρ_B auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) geringer ist als auf den Kalk 0 Parzellen in allen untersuchten Jahren (Ausnahme Kalk 1,

2020). Alle Werte der ρ_B sind als „sehr gering“ einzustufen nur die Kalk 0 und Kalk 1 Variante sind im Untersuchungsjahr 2020 als „gering“ nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzustufen. Das GPV zeigt in den Untersuchungsjahren 2017-2019 kaum Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten (Kalk 0) Varianten. Auf den Kalk 1.5 Varianten ist das GPV deutlich (aber nicht signifikant) höher im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) im Untersuchungsjahr 2020. Alle Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ bis „sehr hoch“ einzustufen. Die Luftleitfähigkeit (k_i) des Oberbodens am Standort Barlt wurde bei $\psi_m = -6$ kPa gemessen und steigt in den Untersuchungsjahren 2017 und 2018 auf den gekalkten Parzellen (signifikant auf Kalk 1.5) an im Vergleich zu den Kontrollparzellen. Die Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „sehr gering“ (Kalk 0) bis „gering“ (Kalk 1) und „hoch“ (Kalk 1.5) einzustufen. Im zweiten Untersuchungsjahr (2018) liegen die Werte im „mittleren“ (Kalk 0) bis „hohem“ Bereich auf den gekalkten Parzellen. 2019 zeigt sich, dass die k_i auf den gekalkten Parzellen der Kalk 1 Variante am höchsten sind und nach Ad-hoc-AG Boden (2005) genau wie Kalk 0 im „mittleren“ Bereich einzuordnen sind. Die Kalk 1.5 ist als „gering“ einzustufen und ist erst im Untersuchungsjahr 2020 wieder höher als auf Kalk 0.

Tabelle 6: Lagerungsdichte ρ_B in g cm^{-3} und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei $\psi_m = -6$ kPa in cm d^{-1} sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt für die Jahre 2017-2020 ($n = 8$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk-variante | Lagerungsdichte (ρ_B) [g cm^{-3}] | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | GPV Vol.% | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | k_i bei $\psi_m = -6$ kPa cm d^{-1} | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) |
|------|---------------|---|--|--------------|--|---|--|
| 2017 | Kalk 0 | 1,15 | sehr gering | 56 | sehr hoch | 40 | sehr gering |
| | Kalk 1 | 1,15 | sehr gering | 56 | sehr hoch | 50 | gering |
| | Kalk 1.5 | 1,15 | sehr gering | 56 | sehr hoch | 248* | hoch |
| 2018 | Kalk 0 | 1,19 | sehr gering | 55 | sehr hoch | 195 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,14 | sehr gering | 57 | sehr hoch | 361 | hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,17 | sehr gering | 56 | sehr hoch | 243 | hoch |
| 2019 | Kalk 0 | 1,12 | sehr gering | 58 | sehr hoch | 110 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,07 | sehr gering | 59 | sehr hoch | 152 | mittel |
| | Kalk 1.5 | 1,09 | sehr gering | 59 | sehr hoch | 62 | gering |
| 2020 | Kalk 0 | 1,24 | gering | 53 | hoch | 147 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,27 | gering | 52 | hoch | 48 | sehr gering |
| | Kalk 1.5 | 1,17 | sehr gering | 56 | sehr hoch | 205 | mittel |

Die Luftkapazität (LK) steigt im Oberboden der gekalkten Parzellen der Kalk 1 (Ausnahme 2020) und Kalk 1.5 Variante im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) in allen Untersuchungsjahren am Standort Barlt (Abbildung 18). Die Werte der LK sind hier „mittleren“ bis teilweise „hohem“ Bereich einzustufen. Die LK in der Kalk 1.5 Variante steigt im Untersuchungsjahr 2019 signifikant im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk).

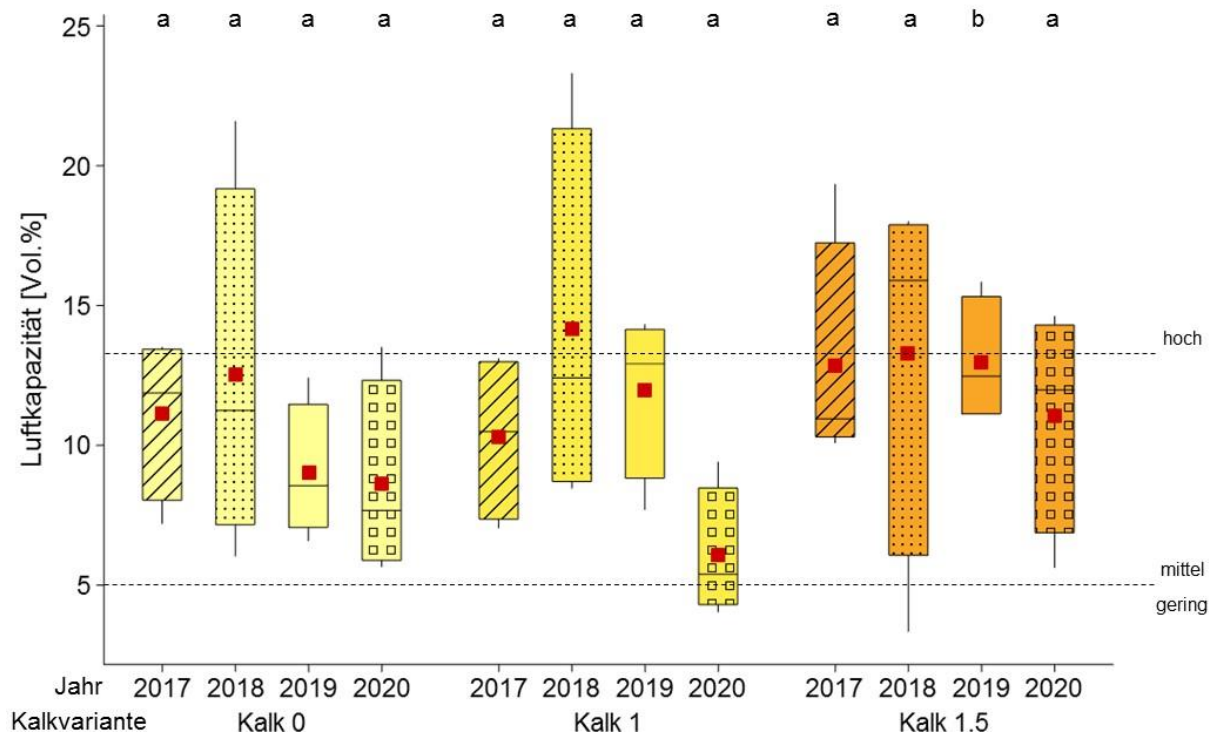


Abbildung 18: Luftkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt (n = 8) für die Jahre 2017-2020. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) zeigt innerhalb der beprobten Varianten große Schwankungen in den Untersuchungsjahren 2017-2020 (Abbildung 19). Im Vergleich zur Kontrollvariante sinkt die nFK in den gekalkten Varianten (Kalk 1 leicht, Kalk 1.5 stärker) im ersten Untersuchungsjahr 2017. Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich damit von „mittel“ auf den Kalk 0 Parzellen zu „gering“ auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen. Im Untersuchungsjahr 2018 ist die nFK in alle Varianten „sehr gering“. Im Jahr 2019 liegen die eingestuftene Werte auf allen Parzellen im „mittleren“ Bereich und steigen leicht (nicht signifikant) auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Im letzten Untersuchungsjahr 2020 ist die nFK wieder im „geringen“ Bereich nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzustufen. Es kann an diesem Standort somit kein eindeutiger Einfluss der Kalkung auf die nFK nachgewiesen werden.

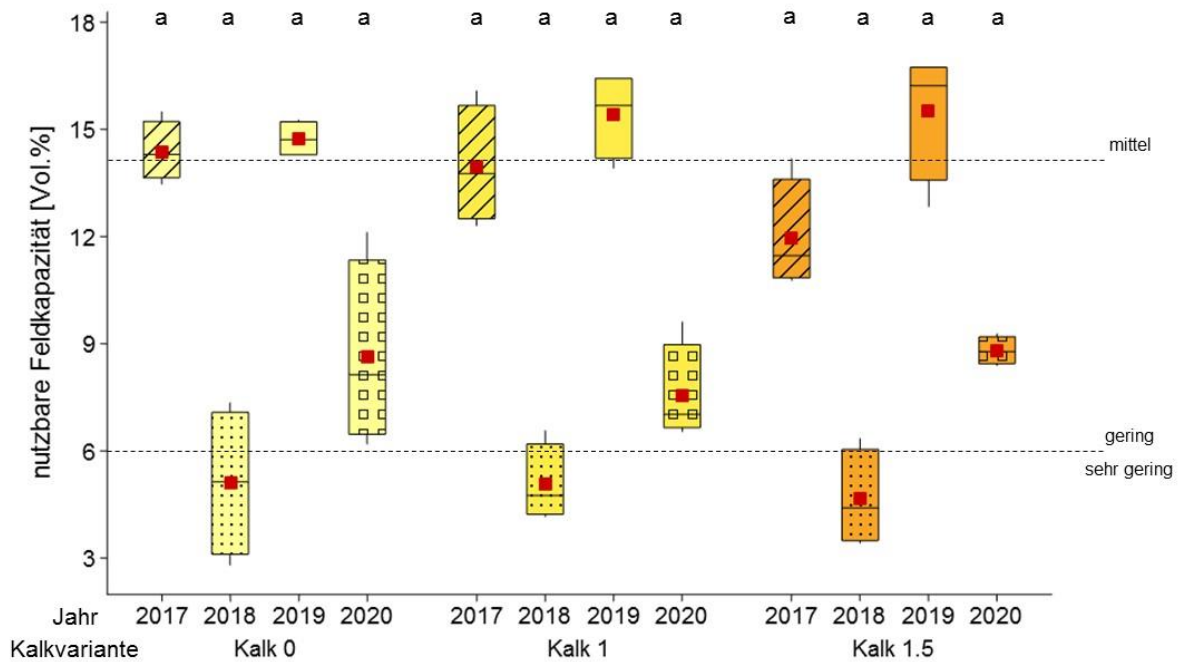


Abbildung 19: Nutzbare Feldkapazität [Vol.-%] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt (n = 8) für die Jahre 2017-2020. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Der Totwassergehalt (TW) im Oberboden des Standortes Barlt zeigt in den ersten beiden Untersuchungsjahren (2017 und 2018) geringere Unterschiede auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) (Abbildung 20). Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ bis „sehr hoch“ einzuordnen. Im Untersuchungsjahr 2019 sinkt der TW-Anteil signifikant auf den Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) und ist auf Kalk 1 und Kalk 1.5 als „hoch“ und auf Kalk 0 als „sehr hoch“ einzustufen. Im letzten Untersuchungsjahr 2020 sind keine Unterschiede der TW-Gehalte zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen zu erkennen. Auch hier befinden sich die TW-Gehalte im „sehr hohen“ Bereich nach Ad-hoc-AG Boden (2005).

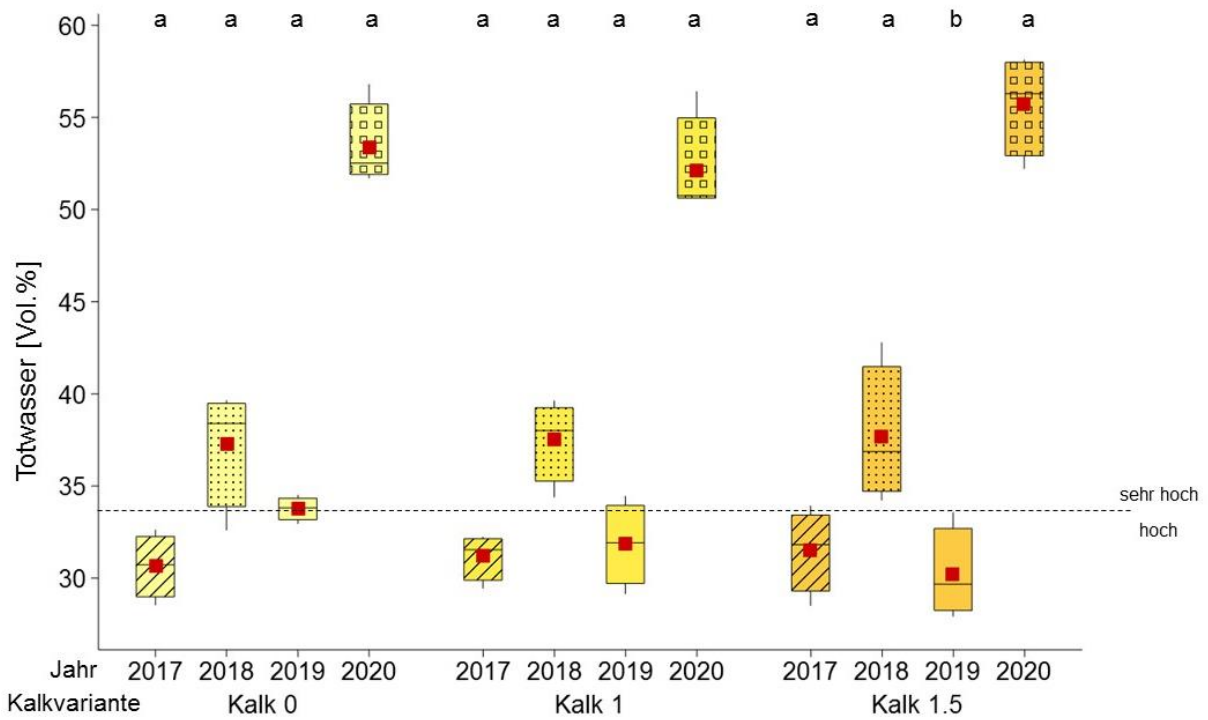


Abbildung 20: Totwassergehalte [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt für die Untersuchungsjahre 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.2.2 Scherparameter und Vorbelastungswerte

Die Kohäsion (c) steigt im ersten Untersuchungsjahr 2017 signifikant auf den Kalkvarianten Kalk 1 und Kalk 1.5 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 am Standort Barlt (Tabelle 7). Gleichzeitig verringert sich der Winkel der Inneren Reibung (φ) signifikant auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Es sind erhöhte Werte der c auch in den folgenden Jahren (2018-2020, signifikant auf Kalk 1 im Jahr 2019) auf den gekalkten Parzellen der Varianten Kalk 1 und Kalk 1.5 zu erkennen. Gleichzeitig verändert sich der φ nur noch im Jahr 2019 und ist auf den gekalkten Varianten geringer als auf der Kontrollvariante (Kalk 0).

Tabelle 7: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in $^{\circ}$ (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt für die Jahre 2017-2020 ($n = 2$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk-variante | c [kPa] | φ [$^{\circ}$] |
|------|---------------|-----------|--------------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 9 | 37 |
| | Kalk 1 | 25* | 29* |
| | Kalk 1.5 | 33* | 27* |
| 2018 | Kalk 0 | 26 | 32 |
| | Kalk 1 | 30 | 32 |
| | Kalk 1.5 | 32 | 32 |
| 2019 | Kalk 0 | 12 | 35 |
| | Kalk 1 | 21* | 30 |
| | Kalk 1.5 | 18 | 30 |
| 2020 | Kalk 0 | 32 | 25 |
| | Kalk 1 | 33 | 27 |
| | Kalk 1.5 | 32 | 26 |

Der maximale Scherwiderstand, gemessen als Funktion der Normalspannung, war im Oberboden am Standort Barlt, auf den dort gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr (2017), vor allem bei hohen Auflasten, geringer (Abbildung 21). Im Untersuchungsjahr 2018 ist der maximale Scherwiderstand bei allen Auflasten auf den Kalk 1.5 Parzellen am höchsten. 2019 liegen die Scherwiderstände dann wieder auf der Kontrollvariante (Kalk 0) höher im Vergleich zu den gekalkten Varianten. Im letzten Untersuchungsjahr 2020 sind die Verläufe der maximalen

Scherwiderstände für alle Kalkvarianten ähnlich. Lediglich für die Kalk 1 Variante zeigt sich bei einer Auflast von 200 kPa ein höherer Scherwiderstand im Vergleich zu Kalk 0.

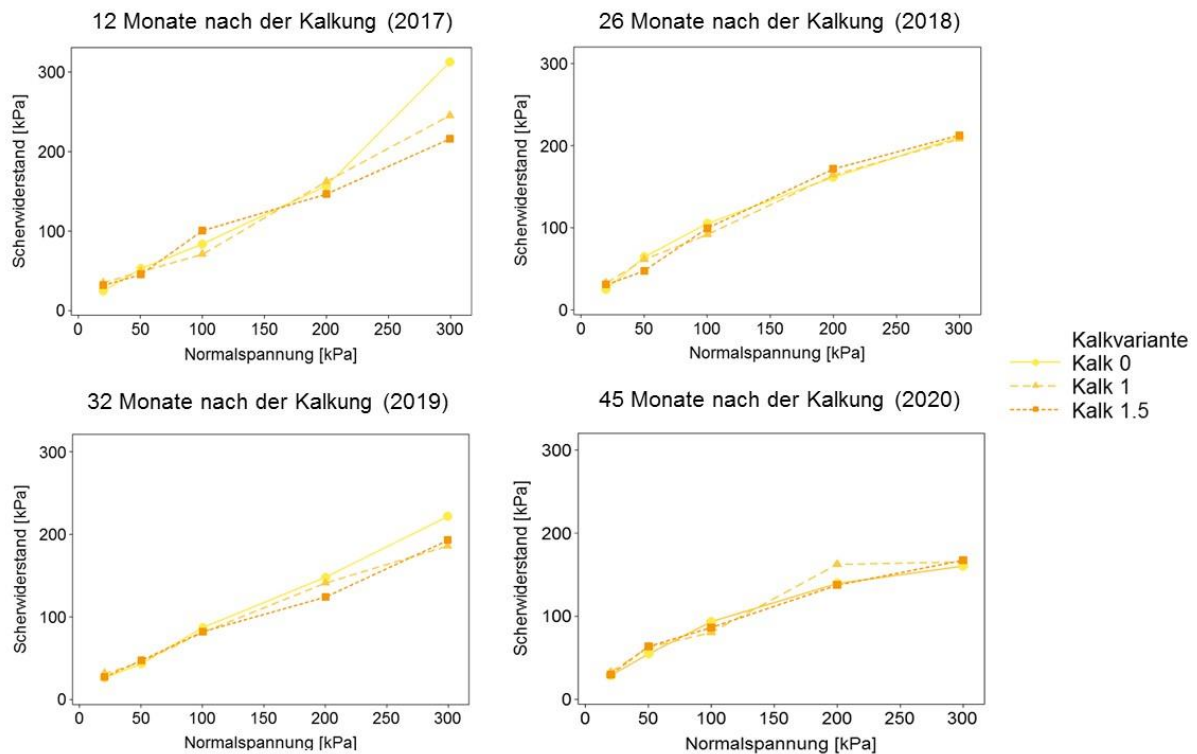


Abbildung 21: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Barlt für die Jahre 2017-2020 (n = 4).

Es sind keine signifikanten Unterschiede der Vorbelastungswerte auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort Barlt in den Jahren 2017 bis 2019 zu erkennen (Abbildung 22). Alle (Mittel-)Werte sind laut DVWK (1997) als „sehr gering“ bis „gering“ einzustufen.

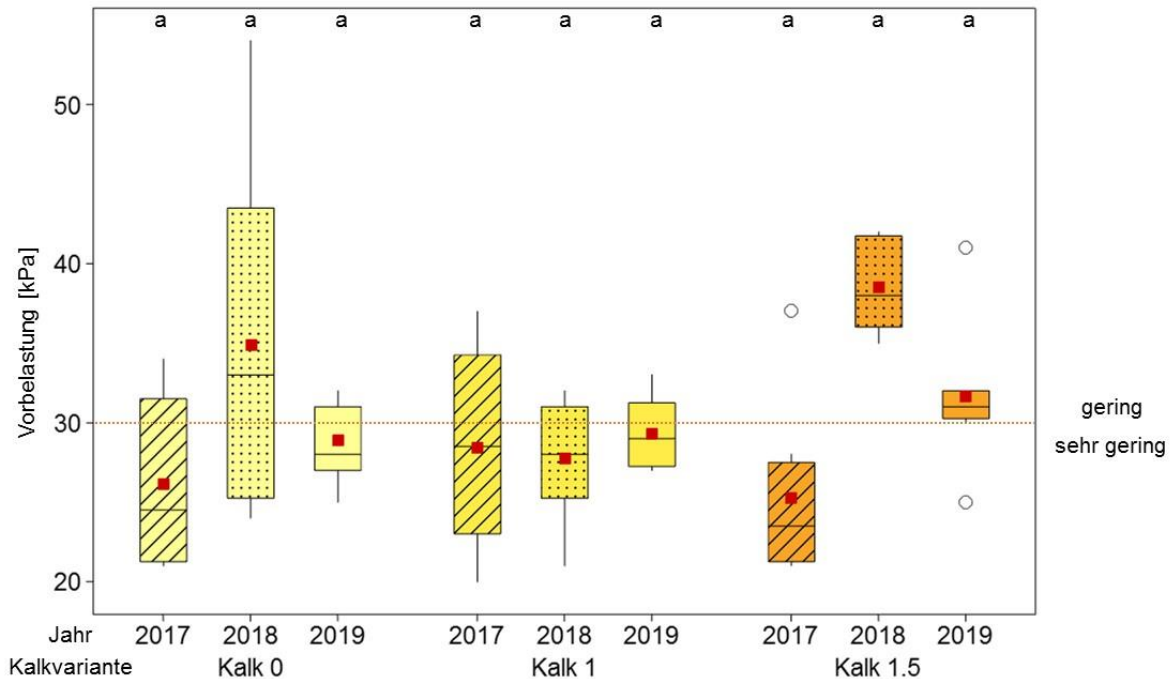


Abbildung 22: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 8$) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.2.3 Zugspannung und Erosionsfestigkeit

Am Feldstandort Barlt wurden für die luftgetrockneten Aggregate ($\emptyset \sim 16$ mm) keine signifikanten Unterschiede der Zugspannung (Y) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) in allen Untersuchungsjahren festgestellt (Abbildung 23). Dennoch zeigt sich, dass Y auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu den Kalk 0 Parzellen in den Jahren 2017 bis 2019 tendenziell höher ist. Im Jahr 2020 sind keine Unterschiede für Y zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen zu erkennen.

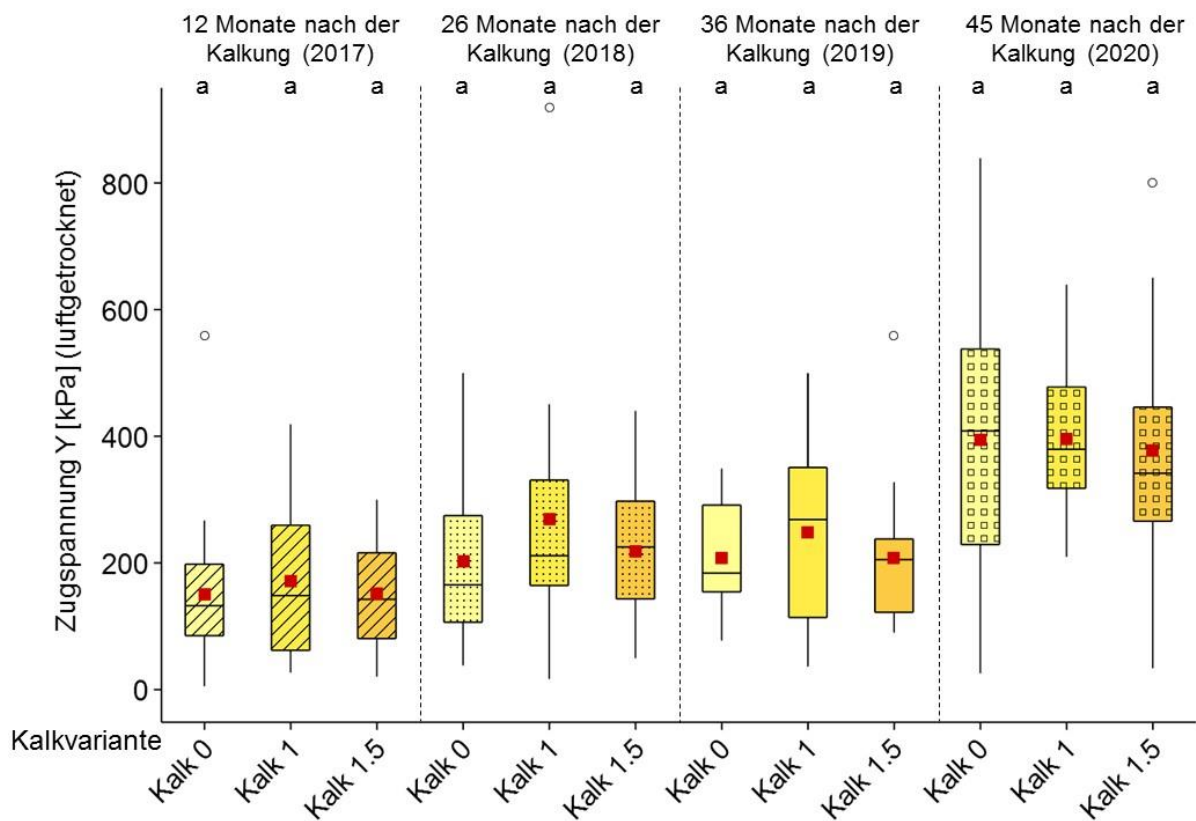


Abbildung 23: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2017 – 2020) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Am Untersuchungsstandort Barlt ist die Zugspannung (Y) für die auf $\psi_m = -30$ kPa entwässerten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) im Untersuchungsjahr 2018 signifikant höher auf den gekalkten Varianten (Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) (Abbildung 24). Auch die Kalk 1 Variante zeigt höhere (nicht signifikante) Werte für Y im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Im Jahr 2019 sind die Werte der Y signifikant höher auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu den Kalk 0 Parzellen. Im Jahr 2020 sind auf allen gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) die Y signifikant geringer als die Kontrollvariante (Kalk 0).

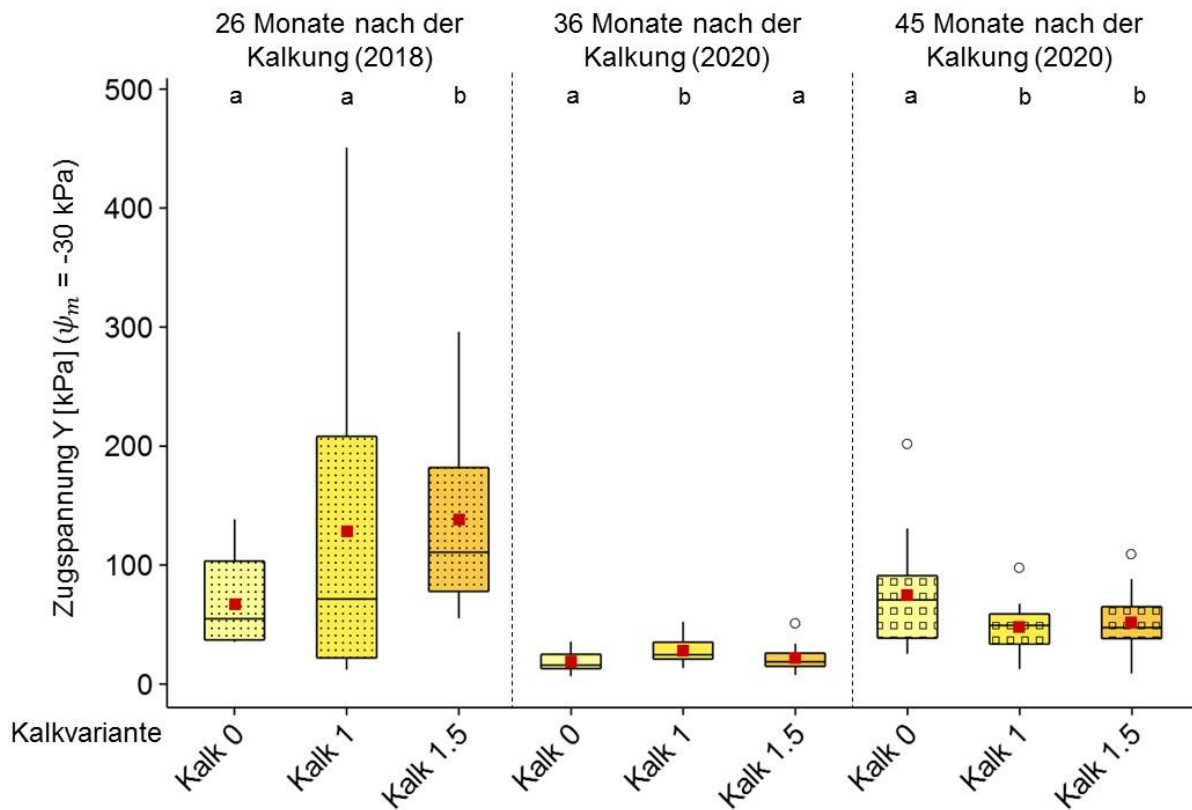


Abbildung 24: Zugspannung Y [kPa] auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2018 – 2020) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Die Erosionsstärke (E_s) der luftgetrockneten Aggregate steigt signifikant von den äußeren (äuß.) zu den inneren (inn.) Schichten innerhalb einer Variante ($p < 0,01$) in allen Varianten (Abbildung 25). Die E_s sinkt signifikant ($p < 0,05$) in der äuß. als auch in der inn. Schicht der Aggregate der Kalk 1 Variante im Vergleich zu den Aggregaten aus der Kontrolle (Kalk 0). Für die Kalk 1.5 Variante zeigt sich, dass die E_s der inn. Schichten der Aggregate steigt (nicht signifikant) im Vergleich zu den Aggregaten der Kontrolle.

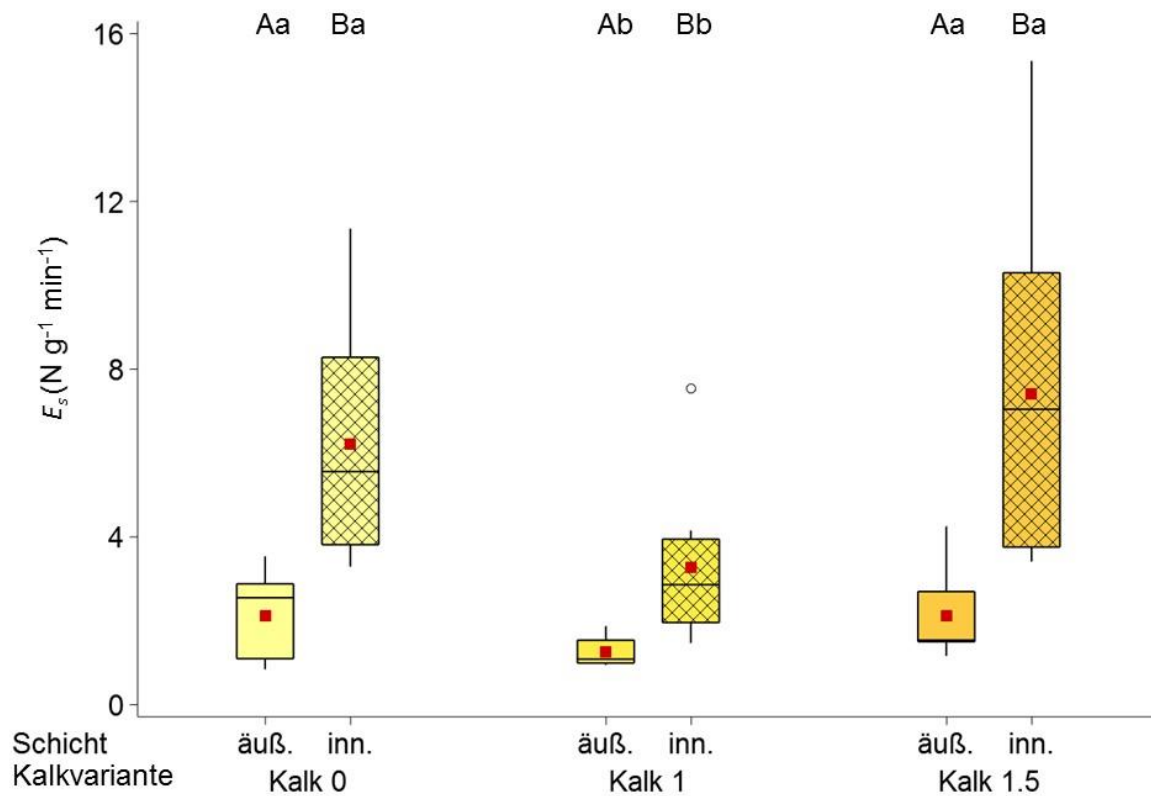


Abbildung 25: Erosionsfestigkeit (E_s) der äußeren (äuß.) und inneren (inn.) Schichten von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA $\times 1,5$) ($n = 10$). Die Vierecke markieren den arithmetischen Mittelwert. Die Großbuchstaben (A, B) zeigen den statistisch signifikanten Unterschied der Schichten innerhalb einer Kalkvariante der Aggregate ($p \leq 0.01$). Die Kleinbuchstaben (a, b) zeigen den statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Kalkvarianten ($p < 0.05$).

Die Dichte (ρ) sowohl der äußeren (äuß.) als auch der inneren (inn.) Schicht nimmt innerhalb der Kalkvarianten ab (Tabelle 8). Ebenfalls ist zu sehen, dass die ρ in Kalk 0 deutlich höher liegt als auf Kalk 1 und Kalk 1.5. Dies betrifft sowohl die äuß. als auch die inn. Schicht der Aggregate.

Tabelle 8: Dichte (ρ) der äußeren (äuß.) und inneren (inn.) Schichten mit der Standardabweichung (SD) von luftgetrockneten Aggregaten ($\emptyset \sim 16$ mm) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 10$).

| Kalkvariante | äuß. Schicht der Aggregate | | inn. Schicht der Aggregate | |
|--------------|------------------------------|------|------------------------------|------|
| | ρ g cm ⁻³ | SD | ρ g cm ⁻³ | SD |
| Kalk 0 | 1,64 | 0,09 | 1,67 | 0,07 |
| Kalk 1 | 1,41 | 0,13 | 1,64 | 0,19 |
| Kalk 1.5 | 1,38 | 0,31 | 1,62 | 0,08 |

Signifikante Veränderungen sowohl der pH-Werte als auch der C- und N-Gehalte sowie des C:N-Verhältnisses konnten nicht festgestellt werden (Tabelle 9). Allerdings waren die pH-Werte in den äuß. und inn. Schichten bei den Aggregaten aus den Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Aggregaten aus der Kontrolle (Kalk 0) niedriger. Die pH-Werte stiegen in den inn. Schichten der luftgetrockneten Aggregate aus den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu den Aggregaten aus der Kontrolle (Kalk 0). Der pH-Wert ist in der inn. Schicht im Vergleich zur äuß. Schicht der Aggregate von Kalk 1 höher. Die pH-Werte sind in der inneren Schicht der Aggregate im Vergleich zur äußeren Schicht bei der Kontrolle (Kalk 0) und Kalk 1.5 Variante niedriger. Der Gesamt-N-Gehalt nahm sowohl in der äuß. als auch in der inn. Schicht der luftgetrockneten Aggregate der Kalkvarianten im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) ab. Der N-Gehalt ist in der inneren Schicht höher als in der äußeren Schicht der Aggregate, die von den Kalk 1 Parzellen entnommen wurden. Außerdem ist der N-Gehalt in der inneren Schicht der Aggregate im Vergleich zur äußeren Schicht bei der Kontrolle (Kalk 0) und bei der Kalk 1.5 Variante niedriger. Der Gesamt-C-Gehalt nahm in den äußeren Schichten der luftgetrockneten Aggregate der Kalkbehandlungen (Kalk1 und Kalk1,5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk0) ab, stieg jedoch in den inneren Schichten der Aggregate der Kalk 1.5-Behandlungen im Vergleich zur Kontrolle (Kalk0) an. Außerdem ist der C-Gehalt in der inneren Schicht der Aggregate höher als in der äußeren Schicht der Aggregate, die auf den Kalk 1 Parzellen entnommen

wurden. Im Vergleich dazu ist der C-Gehalt in der inneren Schicht im Vergleich zur äußeren Schicht bei der Kontrolle (Kalk 0) und bei den Kalk 1.5 Parzellen niedriger. Das C:N-Verhältnis ist in den inneren Schichten aller Behandlungen etwas höher als in den äußeren Schichten der Aggregate.

Tabelle 9: pH (-), Gesamt-N (Masse-%) und Gesamt-C (Masse-%) der äußeren (äuß.) und inneren (inn.) Schichten von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) aus dem Oberboden des Standortes Barlt für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 2).

| Variante | äuß. | inn. | äuß. | inn. | äuß. | inn. | äuß. | inn. |
|----------|------|------|------|------|---------|------|-------|-------|
| | pH | pH | N | N | C | C | C:N | C:N |
| | - | - | | | Masse-% | | | |
| Kalk 0 | 6,04 | 5,98 | 0,33 | 0,32 | 3,48 | 3,35 | 10,57 | 10,59 |
| Kalk 1 | 6,05 | 6,10 | 0,30 | 0,31 | 3,05 | 3,29 | 10,25 | 10,58 |
| Kalk 1.5 | 5,93 | 5,90 | 0,33 | 0,31 | 3,40 | 3,38 | 10,45 | 10,72 |

3.3 Schrecksbach

3.3.1 Kationenaustauschkapazität und pH

Am Standort Schrecksbach ist, als typische Folge der Kalkung, Ca^{2+} das am stärksten vertretene austauschbare Kation mit $> 120 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in der KAK_{eff} in den Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten (Tabelle 10). Im Vergleich mit den anderen austauschbaren Kationen hat Ca^{2+} auch ohne eine Kalkung (Kalk 0) den größten Anteil an der KAK_{eff} . Der Mg^{2+} Gehalt ist auf den gekalkten Varianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) leicht verringert. Die Anteile an K^+ steigen leicht auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 in allen Untersuchungsjahren und die Anteile an Na^+ bleiben nahezu unverändert. Für H^+ und Al^{3+} ergaben sich aufgrund des geringen Gehaltes kaum messbare Werte.

Am Standort Schrecksbach liegt der empfohlene pH-Wert nach VDLUFA (2000a) zwischen 6,4 und 7,2. Die pH-Werte auf den Kalk 0 Parzellen sind 5,7 (2017), 6,3 (2018) und 5,8 (2019) (Tabelle 10). Der angestrebte Zielbereich konnte nach der Kalkgabe auf den Kalk 1 und Kalk 1,5 Parzellen erreicht werden. Die auf den Kalk 1 Parzellen gemessenen Werte liegen bei 7,3 (2017), 6,5 (2018) und 6,9 (2019). Die Einzelwerte der Kalk 1 Parzellen zeigen im Jahr 2018, dass der pH-Wert noch vereinzelt unter dem empfohlenen Zielwertbereich lag. Auf den Kalk 1,5 Parzellen liegen die pH-Werte bei 7,3 (2017), 6,9 (2018) und 7,0 (2019). Einige Parzellen scheinen somit sogar überversorgt.

Tabelle 10: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$] ergeben und der pH Wert [CaCl_2] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Schreckbach für die Jahre 2017-2019 ($n = 2$).

| Jahr | Kalk-variante | K^+ | Na^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$] | H^+ | Al^{3+} | KAK_{eff} | pH [CaCl_2] |
|------|---------------|--------------|---------------|------------------|---|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 3,1 | 0,4 | 21,5 | 108,6 | 1,3 | - | 135 | 5,7 |
| | Kalk 1 | 3,4 | 0,4 | 20,4 | 156,2 | - | - | 180 | 7,3 |
| | Kalk 1.5 | 3,6 | 0,4 | 19,7 | 154,9 | - | - | 179 | 7,3 |
| 2018 | Kalk 0 | 3,5 | 0,6 | 21,7 | 98,4 | - | - | 124 | 5,5 |
| | Kalk 1 | 3,4 | 0,7 | 21,3 | 121,6 | - | - | 147 | 6,5 |
| | Kalk 1.5 | 3,9 | 0,7 | 20,2 | 135,5 | - | - | 160 | 6,9 |
| 2019 | Kalk 0 | 4,4 | 0,5 | 22,1 | 104,5 | 0,7 | 0,2 | 132 | 5,8 |
| | Kalk 1 | 4,4 | 0,4 | 19,5 | 155,7 | - | - | 180 | 6,9 |
| | Kalk 1.5 | 4,6 | 0,5 | 19,3 | 168,0 | - | - | 192 | 7,0 |

3.3.2 Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter

Im ersten Untersuchungsjahr (2017) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) und den ungekalkten Parzellen (Kalk 0) am Standort Schrecksbach (Abbildung 26). Die k_f (Mittel-)Werte liegen laut Ad-hoc-AG Boden (2005) im „sehr hohem“ Bereich. Im Untersuchungsjahr 2018 steigt k_f in der Kalk 1.5 Variante signifikant an im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Die k_f (Mittel-)Werte steigen von „gering“ (Kalk 0) auf „mittel“ (Kalk 1) und „sehr hoch“ (Kalk 1.5) an. Im Jahr 2019 liegen dann alle Werte für die k_f in einem „sehr hohen“ Bereich laut Ad-hoc-AG Boden (2005), und es gibt somit keine signifikanten Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Varianten.

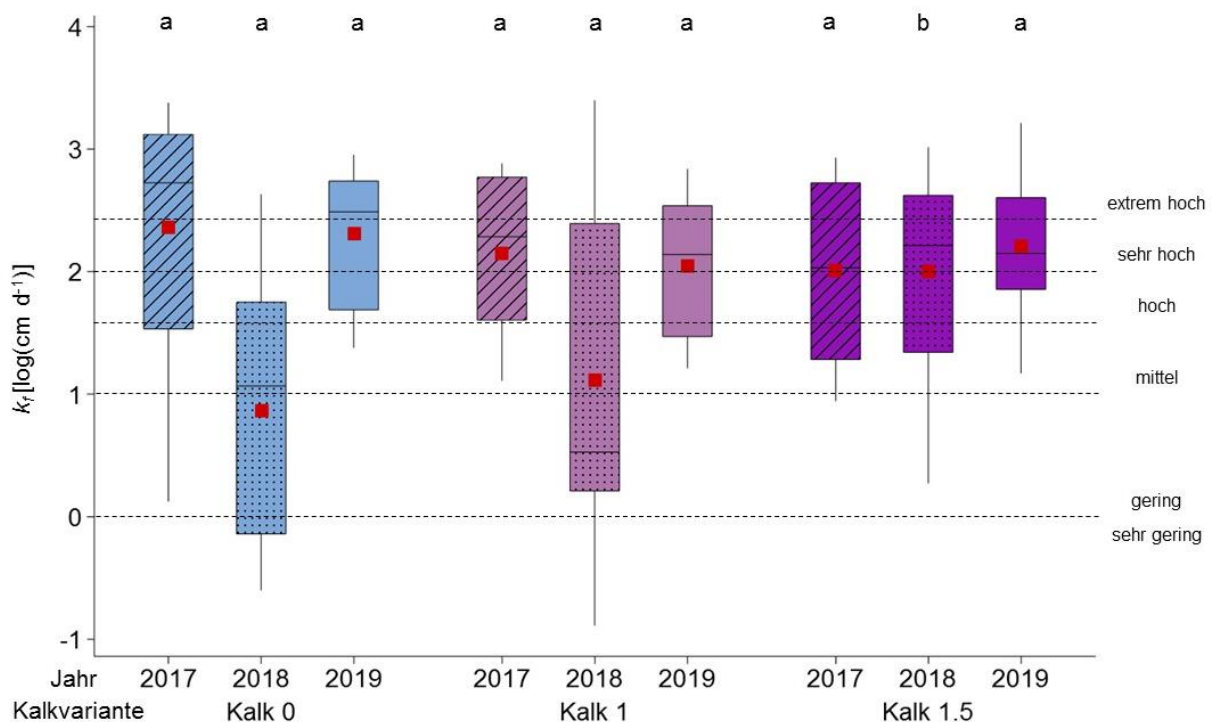


Abbildung 26: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d⁻¹] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Schrecksbach für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019 (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Im ersten Untersuchungsjahr (2017) und damit 6 Monate nach der Kalkung liegt die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) in der Kalk 1 Variante ab einem pF von 0 deutlich über der Kalk 0 Variante am Standort Schrecksbach (Abbildung 27). Die k_u Verläufe der Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten liegen 12 Monate nach der Kalkung (2018) über dem k_u Verlauf von Kalk 0. AB einem pF von 0 sinkt der k_u Verlauf von Kalk 1.5 stark ab. Die k_u von Kalk 1 sinkt erst ab einem pF 2,7 stärker ab. Im Untersuchungsjahr 2019 und damit 24 Monate nach der Kalkung zeigt sich, dass die k_u von Kalk 0 über denen von Kalk 1 und Kalk 1.5 liegt bis zu einem pF von 2,7. Danach liegen die k_u der gekalkten Varianten etwas über denen der Kalk 0 Variante.

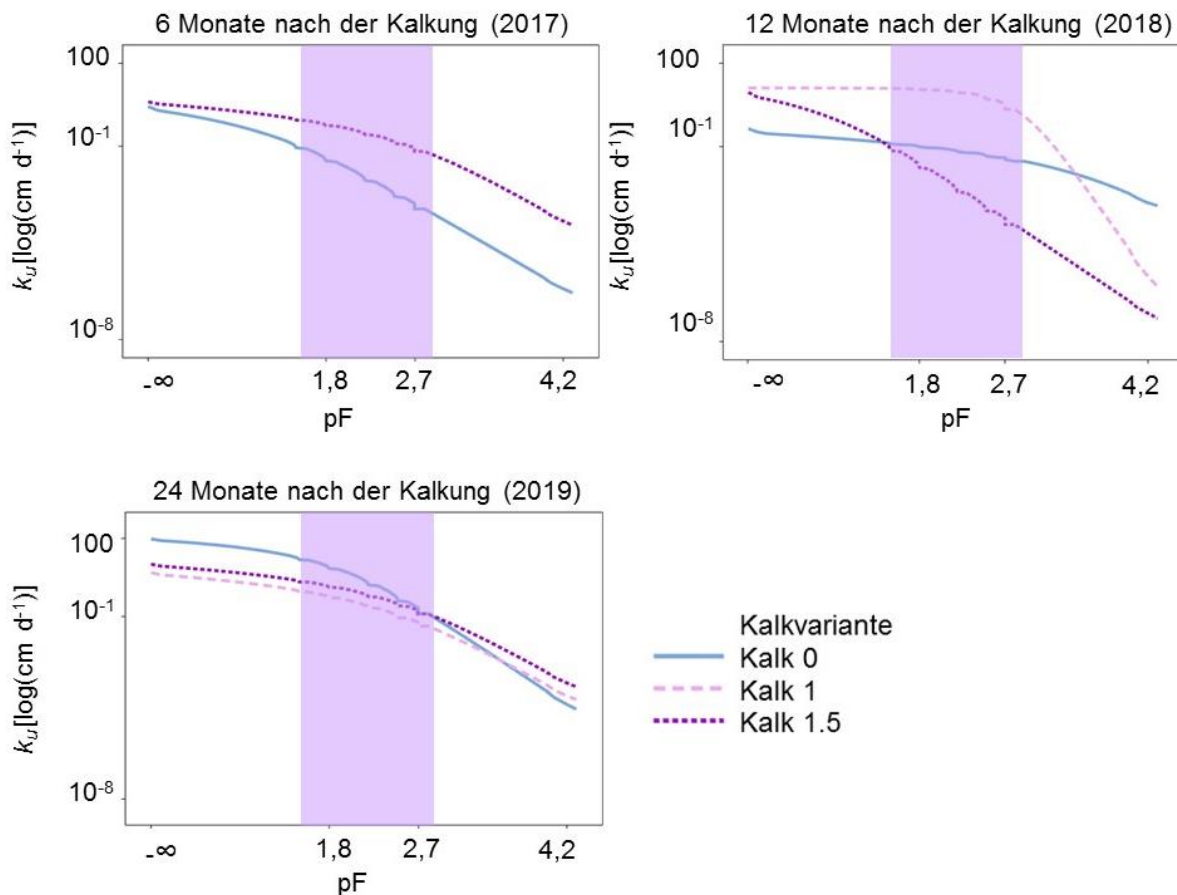


Abbildung 27: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Schrecksbach für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die violette Fläche markiert den Bereich der gemessenen $k_{u,r}$ -Daten ($n = 4$).

Am Standort Schrecksbach sind keine signifikanten Unterschiede der Lagerungsdichten ρ_B , des Gesamtporenvolumens (GPV) und der Luftleitfähigkeit (k_l) auf den unterschiedlichen Kalkvarianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) zu erkennen (Tabelle 11). Es zeigt sich, dass die ρ_B auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) sich kaum von den ρ_B auf den Kalk 0 Parzellen in allen untersuchten Jahren unterscheiden. Alle Werte der ρ_B sind als „gering“ (2017 und 2019) und „mittel“ (2018) nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzustufen. Das GPV zeigt in den Untersuchungsjahren 2017-2019 kaum Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten (Kalk 0) Varianten. Auf den Kalk 1.5 Parzellen ist das GPV etwas (aber nicht signifikant) höher im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) im Untersuchungsjahr 2017. Alle Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ einzustufen. Die Luftleitfähigkeit (k_l) des Oberbodens am Standort Schrecksbach wurde bei $\psi_m = -6$ kPa gemessen und sinkt (nicht signifikant) im ersten Untersuchungsjahr 2017 auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen. Die Werte sind nach Ad-hoc-AG

Boden (2005) als „hoch“ (Kalk 0) bis „gering“ (Kalk 1) und „mittel“ (Kalk 1.5) einzustufen. Im zweiten Untersuchungsjahr (2018) liegen die Werte auf allen Parzellen im „sehr geringen“ Bereich. 2019 zeigt sich, dass die k_i auf den gekalkten Parzellen der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante im Vergleich zur Kalk 0 Variante am höchsten sind und nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „sehr hoch“ eingestuft werden können.

Tabelle 11: Lagerungsdichte ρ_B in g cm^{-3} und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei $\psi_m = -6 \text{ kPa}$ in cm d^{-1} sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach für die Jahre 2017-2019 ($n = 8$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk- variante | Lagerungs- dichte (ρ_B) [g cm^{-3}] | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | GPV Vol.% | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | k_i bei $\psi_m =$ -6 kPa cm d^{-1} | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) |
|------|-------------------|---|--|------------------|--|---|--|
| 2017 | Kalk 0 | 1,33 | gering | 49 | hoch | 101 | hoch |
| | Kalk 1 | 1,34 | gering | 49 | hoch | 52 | gering |
| | Kalk 1.5 | 1,30 | gering | 51 | hoch | 85 | mittel |
| 2018 | Kalk 0 | 1,43 | mittel | 46 | hoch | 29 | sehr gering |
| | Kalk 1 | 1,43 | mittel | 46 | hoch | 42 | sehr gering |
| | Kalk 1.5 | 1,43 | mittel | 46 | hoch | 46 | sehr gering |
| 2019 | Kalk 0 | 1,28 | gering | 51 | hoch | 130 | sehr hoch |
| | Kalk 1 | 1,32 | gering | 50 | hoch | 173 | sehr hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,28 | gering | 51 | hoch | 222 | sehr hoch |

Die Luftkapazität (LK) steigt (nicht signifikant) im Oberboden der gekalkten Parzellen der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) in den ersten beiden Untersuchungsjahren 2017 und 2018 am Standort Schrecksbach (Abbildung 28). Die Werte der LK sind hier im „mittleren“ bis teilweise „hohem“ Bereich einzustufen. Die Kalk 1.5 Variante steigt (nicht signifikant) auf „hoch“ im Vergleich zu Kalk 0 („mittel“) im Untersuchungsjahr 2019. Für die Kalk 1 Variante lässt sich kein Unterschied zur Kalk Variante ausmachen.

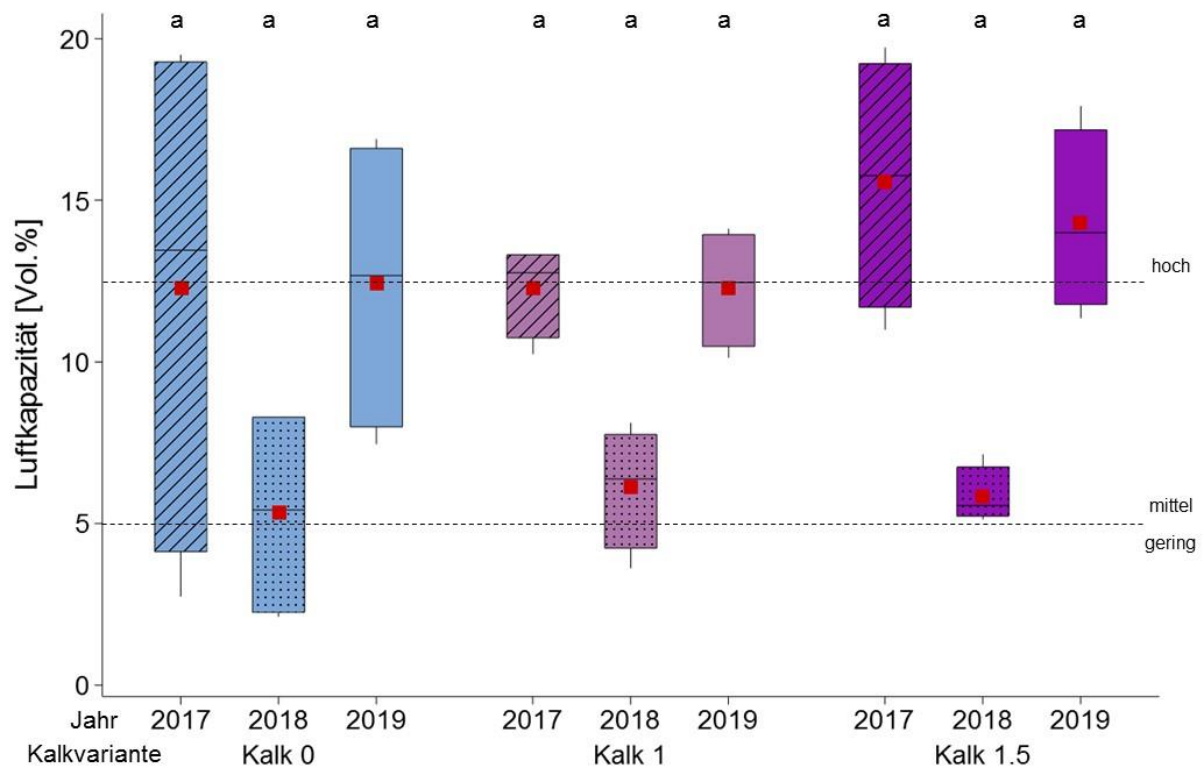


Abbildung 28: Luftkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) zeigt innerhalb der beprobten Varianten große Schwankungen in den Untersuchungsjahren 2017-2019 (Abbildung 29). Im ersten Untersuchungsjahr 2017 scheint die Kalk 1 Variante noch leicht zu steigen im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Im Gegensatz dazu sinkt die nFK auf den Kalk 1.5 Parzellen. Zusätzlich sinkt die nFK signifikant in den gekalkten Varianten im Untersuchungsjahr 2018. Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich damit von „mittel“ auf den Kalk 0 Parzellen zu „gering“ auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen. Im Untersuchungsjahr 2018 liegen alle Varianten im „sehr geringen“ Bereich für die nFK. Auch im Jahr 2019 liegen die Werte der nFK auf den gekalkten Parzellen unter denen der nFK Werte der Kalk 0 Parzellen. Die eingestuftene Werte sinken von „mittel“ (Kalk 0) auf „gering“ (Kalk 1 und Kalk 1.5).

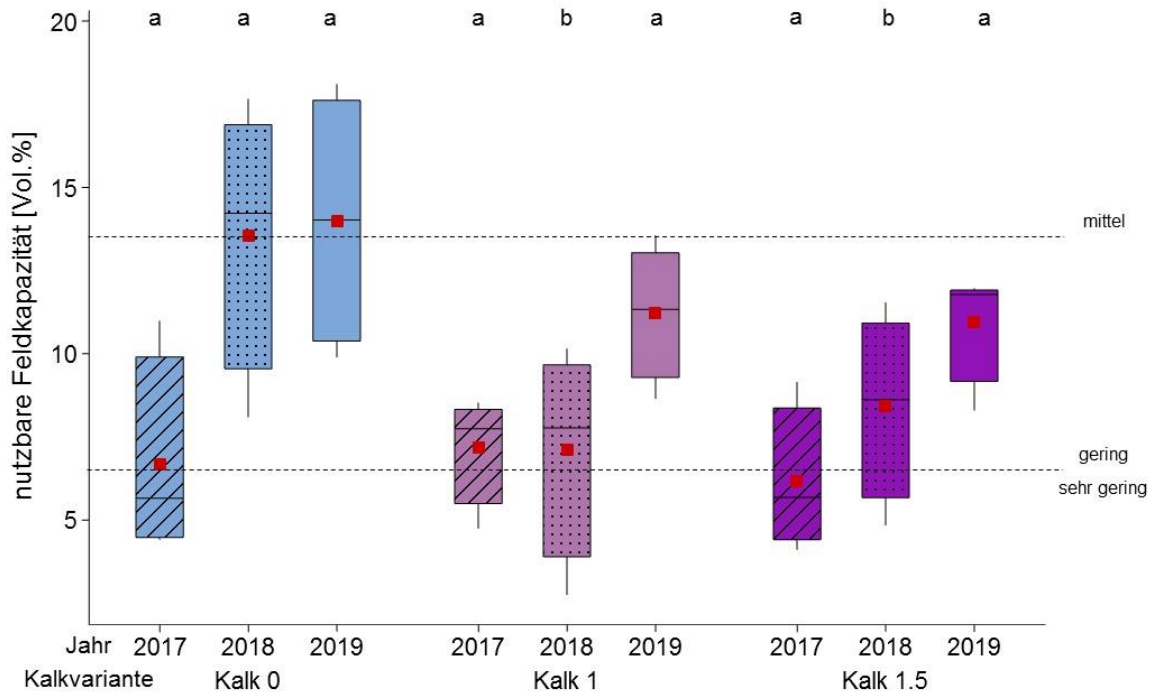


Abbildung 29: Nutzbare Feldkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Der Totwassergehalt (TW) im Oberboden des Standortes Schrecksbach zeigt im ersten Untersuchungsjahr (2017) kaum Unterschiede auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) (Abbildung 30). Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ einzuordnen. In den Untersuchungsjahren 2018 und 2019 steigt der TW-Anteil signifikant (2018) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0), und ist auch hier als „hoch“ einzustufen.

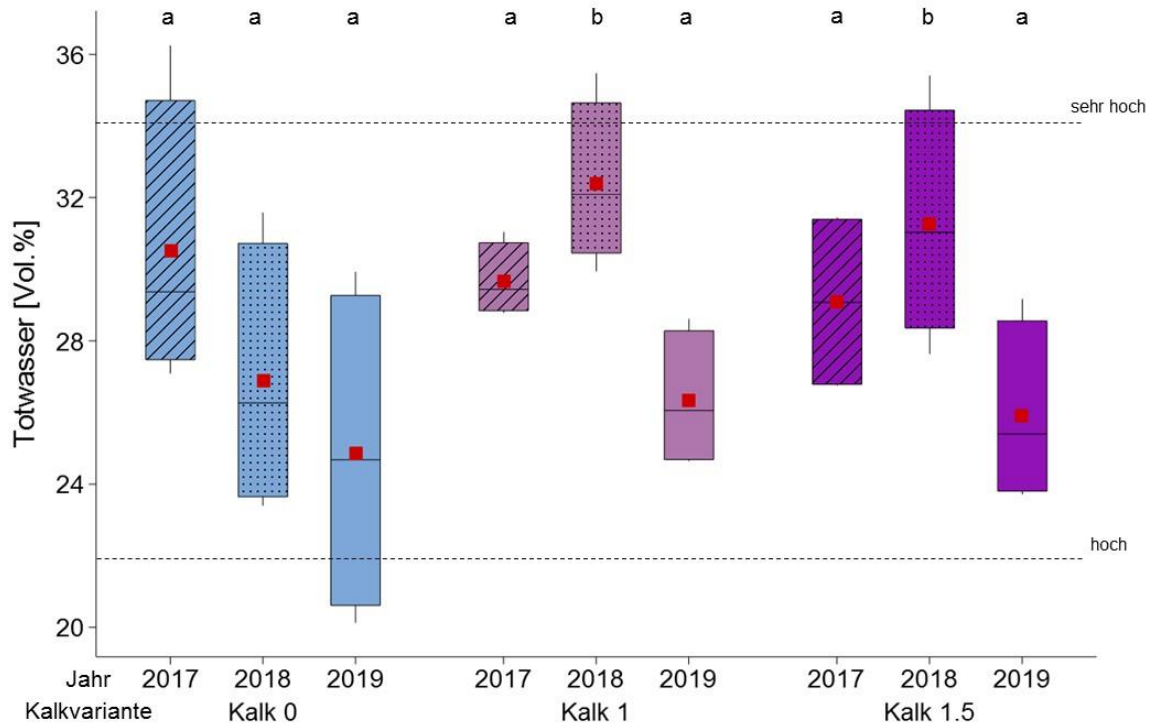


Abbildung 30: Totwassergehalte [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach für die Untersuchungsjahre 2017-2019 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.3.3 Scherparameter und Vorbelastungswerte

Die Kohäsion (c) steigt im ersten Untersuchungsjahr 2017 (nicht signifikant) auf den Kalkvarianten Kalk 1 und Kalk 1.5 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 am Standort Schrecksbach (Tabelle 12). Gleichzeitig verringert sich der Winkel der Inneren Reibung (φ) (nicht signifikant) auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Auch im Jahr 2018 sind erhöhte Werte der c auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 zu erkennen. Gleichzeitig steigt der φ auf den gekalkten Parzellen. Im Untersuchungsjahr 2019 liegt die c auf den gekalkten Parzellen unter denen der Kontrollvariante Kalk 0, während der φ unverändert bleibt.

Tabelle 12: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach für die Jahre 2017-2019 ($n = 2$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt.

| Jahr | Kalk-variante | c [kPa] | φ [°] |
|------|---------------|-----------|---------------|
| 2017 | Kalk 0 | 14 | 36 |
| | Kalk 1 | 21 | 34 |
| | Kalk 1.5 | 26 | 32 |
| 2018 | Kalk 0 | 27 | 33 |
| | Kalk 1 | 31 | 34 |
| | Kalk 1.5 | 22 | 36 |
| 2019 | Kalk 0 | 27 | 32 |
| | Kalk 1 | 23 | 33 |
| | Kalk 1.5 | 23 | 33 |

Der maximale Scherwiderstand, gemessen als Funktion der Normalspannung, war im Oberboden am Standort Schrecksbach auf den dort gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr (2017), vor allem bei hohen Auflasten, geringer (Abbildung 31). In den beiden darauffolgenden Untersuchungsjahren (2018 und 2019, 12-24 Monate nach der Kalkung) ist der maximale Scherwiderstand Auflasten ab 200 kPa auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) am höchsten.

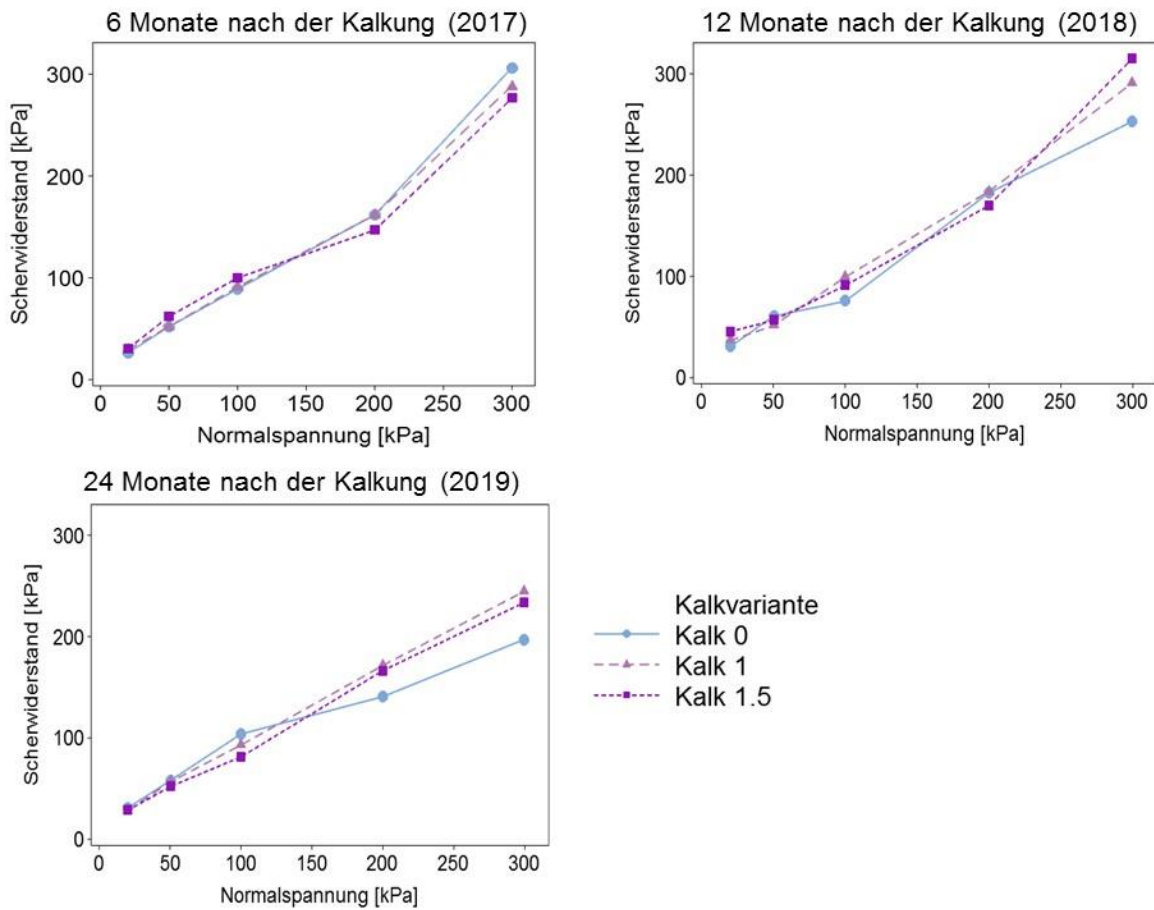


Abbildung 31: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Schrecksbach für die Jahre 2017-2019 (n = 4).

Es sind keine signifikanten Unterschiede der Vorbelastungswerte auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort Schrecksbach in den Jahren 2017 bis 2019 zu erkennen (Abbildung 32). Alle (Mittel-)Werte sind laut DVWK (1997) als „sehr gering“ bis „gering“ einzustufen.

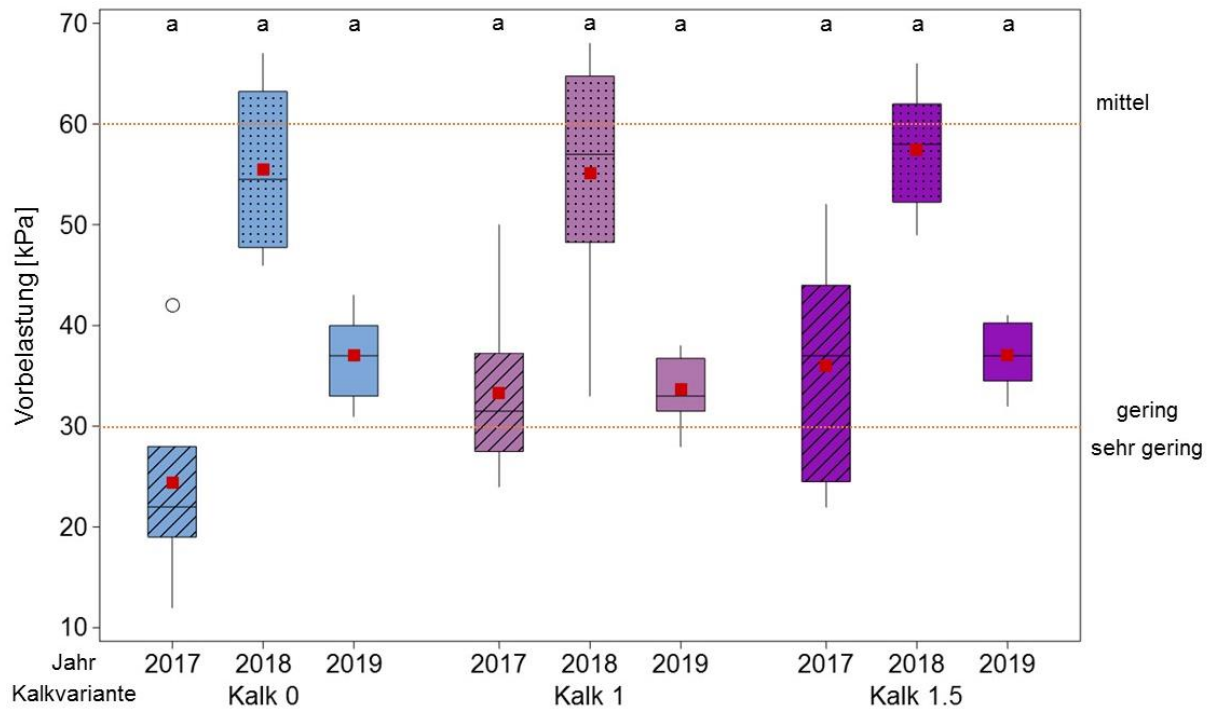


Abbildung 32: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Schrecksbach für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 8$) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.3.4 Zugspannung

Am Standort Schrecksbach wurden für die luftgetrockneten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) keine signifikanten Unterschiede der Zugspannung (Y) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) in beiden Untersuchungsjahren festgestellt (Abbildung 33). Dennoch zeigt sich, dass Y auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) 3 Monate nach der Kalkung geringer ist als die Y auf den Kontrollparzellen (Kalk 0). Im Jahr 2018 steigen die Y dann auf den gekalkten Parzellen und sind höher als die Y auf den ungekalkten Parzellen (Kalk 0). 23 Monate nach der Kalkung (2019) wurde die Y für die auf $\psi_m = -30$ kPa entwässerten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) gemessen. Die Kalk 1.5 Variante zeigt signifikant niedrigere Werte für Y im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Im Gegensatz dazu die Kalk 1 Variante höhere (nicht signifikante) Werte für Y im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0.

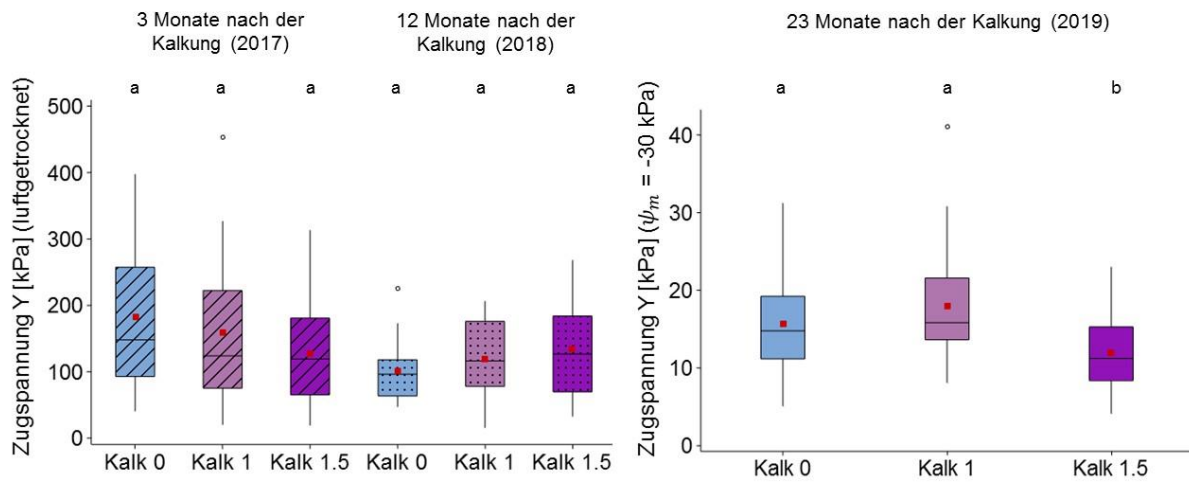


Abbildung 33: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2017 und 2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019) aus dem Oberboden des Standortes Schrecksbach für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.4 Hergarten

3.4.1 Kationenaustauschkapazität und pH

Am Standort Hergarten ist, als typische Folge der Kalkung, Ca^{2+} das am stärksten vertretene austauschbare Kation mit $> 55 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in der KAK_{eff} der Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten (Tabelle 13). Im Vergleich mit den anderen austauschbaren Kationen hat Ca^{2+} auch ohne eine Kalkung den größten Anteil an der KAK_{eff} . Der Mg^{2+} Gehalt sinkt in den Untersuchungsjahren 2017-2019 auf den Kalk 1 Parzellen und steigt leicht auf den Kalk 1.5 Parzellen. Die Anteile an Na^+ gehen auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 in allen Untersuchungsjahren leicht zurück und die Anteile an K^+ bleiben nahezu unverändert. Vor allem im ersten Untersuchungsjahr 2017 wird deutlich, dass der Anteil von H^+ auf den gekalkten Parzellen abnimmt.

Der Start-pH liegt bei 5,4 und der empfohlene pH-Wert liegt zwischen 6,3 und 7,0 (VDLUFA 2000a). Die pH-Werte auf den Kalk 0 Parzellen sind 5,4 (2017), 5,4 (2018) und 5,3 (2019) (Tabelle 13). Der angestrebte Zielbereich konnte nach der Kalkgabe auf den Kalk 1 und Kalk 1,5 Parzellen nicht erreicht werden. Die auf den Kalk 1 Parzellen gemessenen Werte liegen bei 5,4 (2017), 5,6 (2018) und 5,7 (2019). Auf den Kalk 1,5 Parzellen liegen die pH-Werte bei 6,1 (2017), 5,6 (2018) und 5,8 (2019).

Tabelle 13: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$] ergeben und der pH Wert [CaCl_2] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Hergarten für die Jahre 2017-2019 ($n = 2$).

| Jahr | Kalk-variante | K^+ | Na^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} [$\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$] | H^+ | Al^{3+} | KAK_{eff} | pH [CaCl_2] |
|------|---------------|--------------|---------------|------------------|---|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 2,5 | 0,3 | 5,8 | 53,0 | 0,6 | 0,4 | 63 | 5,4 |
| | Kalk 1 | 2,3 | 0,3 | 5,3 | 55,1 | 0,7 | 0,0 | 64 | 5,4 |
| | Kalk 1.5 | 2,6 | 0,3 | 6,0 | 67,0 | 0,5 | 0,0 | 76 | 6,1 |
| 2018 | Kalk 0 | 2,1 | 0,6 | 5,4 | 53,8 | 0,0 | 0,0 | 62 | 5,4 |
| | Kalk 1 | 1,7 | 0,4 | 5,1 | 58,4 | 0,5 | 0,0 | 66 | 5,6 |
| | Kalk 1.5 | 1,6 | 0,4 | 5,5 | 59,8 | 0,6 | 0,0 | 68 | 5,6 |
| 2019 | Kalk 0 | 1,7 | 0,6 | 5,4 | 54,7 | - | - | 62 | 5,3 |
| | Kalk 1 | 1,6 | 0,3 | 5,2 | 55,6 | - | - | 63 | 5,7 |
| | Kalk 1.5 | 1,7 | 0,3 | 5,6 | 56,8 | - | - | 64 | 5,8 |

3.4.2 Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter

Es zeigen sich keine signifikanten Unterschiede für die gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f) zwischen den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) und den ungekalkten Parzellen (Kalk 0) am Standort Hergarten (Abbildung 34). Die k_f (Mittel-)Werte sind im ersten Untersuchungsjahr 2017 laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ (Kalk 0 und Kalk 1) bis „mittel“ (Kalk 1.5) einzustufen. Im Untersuchungsjahr 2018 steigt k_f in der Kalk 1.5 Variante (nicht signifikant) an im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Die k_f (Mittel-)Werte sind als „sehr hoch“ einzustufen. Auch im Jahr 2019 liegt die k_f auf den Kalk 1.5 etwas höher als auf der ungekalkten Varianten (Kalk 0). Auf den Kalk 1 Varianten zeigen sich keine Unterschiede zur Kontrolle. Die k_f (Mittel-)Werte sind als „hoch“ (Kalk 0 und Kalk 1) und „sehr hoch“ (Kalk 1.5) einzustufen.

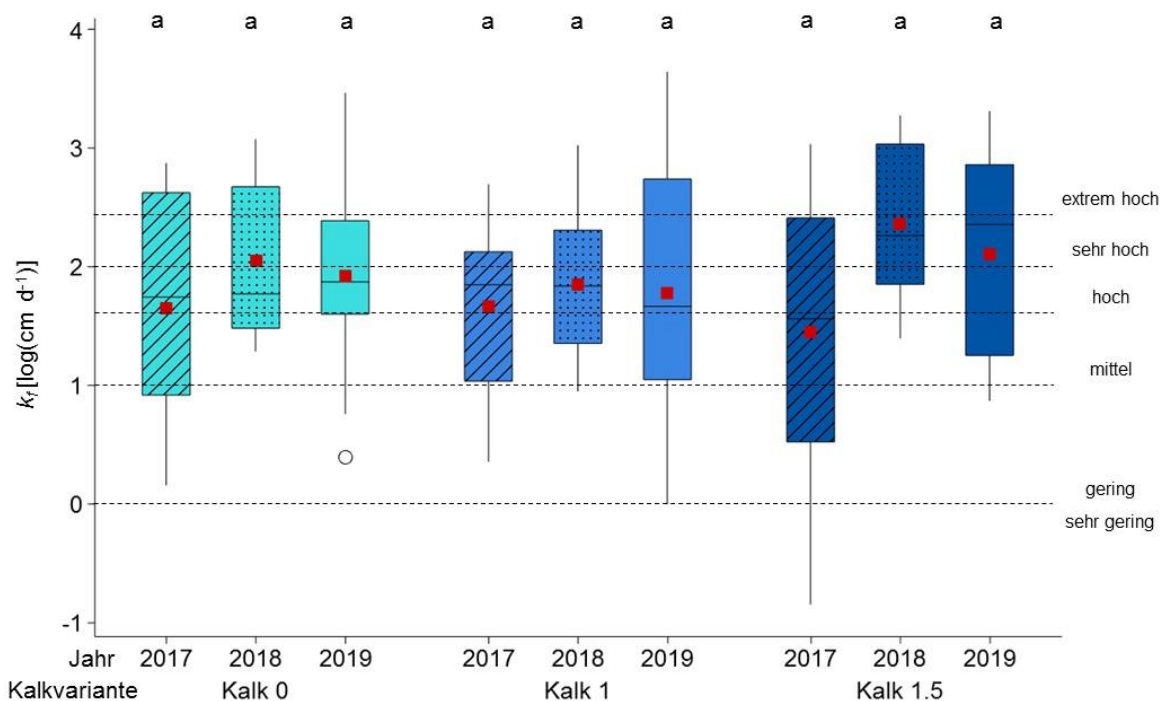


Abbildung 34: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d⁻¹] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Hergarten für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019 (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

In den ersten beiden Untersuchungsjahren (2017 und 2018) zeigen sich ähnliche Verläufe der ungesättigten Wasserleitfähigkeit (k_u) in den gekalkten und ungekalkten Varianten am Standort Hergarten (Abbildung 35). Die k_u Verläufe der Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten liegen 30 Monate nach der Kalkung (2019) unter dem k_u Verlauf von Kalk 0. Ab einem pF von 2,7 übersteigt die k_u der gekalkten Varianten die der Kalk 0 Variante.

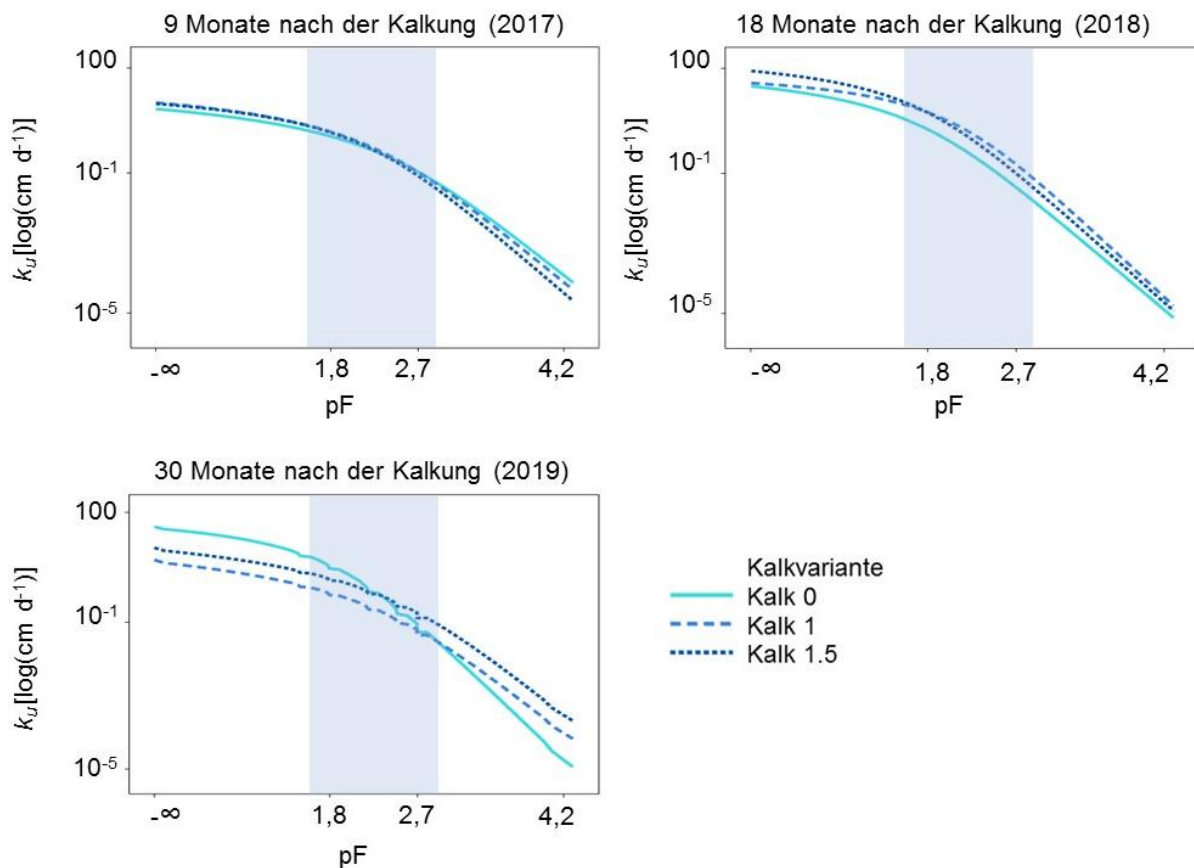


Abbildung 35: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Hergarten für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA $\times 1,5$) in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die blaue Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten ($n = 4$).

Am Standort Hergarten sind keine signifikanten Unterschiede der Lagerungsdichten ρ_B und des Gesamtporenvolumens (GPV) auf den unterschiedlichen Kalkvarianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) zu erkennen (Tabelle 14). Es zeigt sich, dass die ρ_B in allen untersuchten Jahren auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) geringer sind als auf den Kalk 0 Parzellen. Die Werte der ρ_B sind als „mittel“ (2017-2019) und „gering“ (Kalk 1, 2017) nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzustufen. Das GPV steigt in den Untersuchungsjahren 2017-2019 auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Parzellen (Kalk 0). Alle Werte für das GPV sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „mittel“ (Ausnahme Kalk 1, 2017: „hoch“) einzustufen. Die Luftleitfähigkeit (k_l) des Oberbodens am Standort Hergarten wurde bei $\psi_m = -6$ kPa gemessen und sinkt (nicht signifikant) im ersten Untersuchungsjahr 2017 auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen. Die Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „mittel“ (Kalk 0) bis „gering“ (Kalk 1) und „sehr“ (Kalk 1.5) einzustufen. Im zweiten Untersuchungsjahr (2018) steigen die k_l -Werte auf den gekalkten Parzellen von „gering“ (Kalk 0) auf „mittel“ (Kalk 1).

Auch im Untersuchungsjahr 2019 zeigt sich, dass die k_i auf den gekalkten Parzellen der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante im Vergleich zur Kalk 0 Variante am höchsten sind. Auf allen Parzellen sind die Werte als „mittel“ nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzuordnen.

Tabelle 14: Lagerungsdichte ρ_B in g cm^{-3} und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei $\psi_m = -6 \text{ kPa}$ in cm d^{-1} sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten für die Jahre 2017-2019 ($n = 8$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk-variante | Lagerungsdichte (ρ_B) [g cm^{-3}] | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | GPV Vol.% | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | k_i bei $\psi_m = -6 \text{ kPa}$ cm d^{-1} | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) |
|------|---------------|--|--|--------------|--|---|--|
| 2017 | Kalk 0 | 1,45 | mittel | 44 | mittel | 113 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,37 | gering | 48 | hoch | 98 | gering |
| | Kalk 1.5 | 1,44 | mittel | 45 | mittel | 32 | sehr gering |
| 2018 | Kalk 0 | 1,52 | mittel | 42 | mittel | 58 | gering |
| | Kalk 1 | 1,50 | mittel | 43 | mittel | 187* | mittel |
| | Kalk 1.5 | 1,48 | mittel | 44 | mittel | 62 | gering |
| 2019 | Kalk 0 | 1,51 | mittel | 42 | mittel | 114 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,47 | mittel | 44 | mittel | 129 | mittel |
| | Kalk 1.5 | 1,43 | mittel | 45 | mittel | 145 | mittel |

Die Luftkapazität (LK) sinkt signifikant im Oberboden der gekalkten Parzellen der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahren 2017 am Standort Hergarten (Abbildung 36). Die Werte der LK sind hier als „hoch“ (Kalk 0 und Kalk 1) bis „mittel“ (Kalk 1.5) nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzustufen. Die Werte der LK scheinen im zweiten Untersuchungsjahr 2018 auf den gekalkten Parzellen (nicht signifikant) zu steigen. Alle Werte der LK sind als „mittel“ einzustufen. Die Kalk 1 Variante steigt (nicht signifikant) auf „hoch“ im Vergleich zu Kalk 0 („hoch“), wohingegen sich die Kalk 1.5 Variante verringert und als „mittel“ einzustufen ist im Untersuchungsjahr 2019.

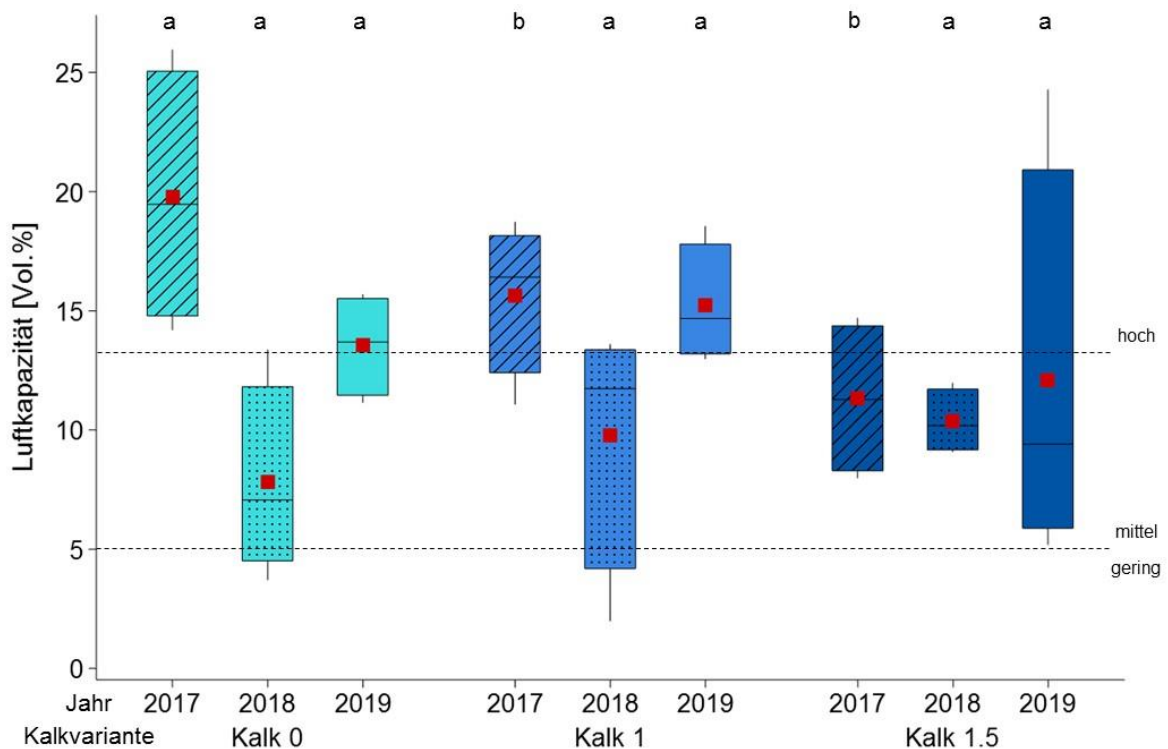


Abbildung 36: Luftkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Im ersten Untersuchungsjahr 2017 steigt die nFK signifikant auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 (Abbildung 37). Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich daraufhin von „gering“ zu „mittel“. Weiterhin sind die Werte der nFK auf den gekalkten Parzellen im zweiten Untersuchungsjahr (2018) (nicht signifikant) höher als auf den ungekalkten Parzellen (Kalk 0). Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich hierbei nicht und die Werte liegen auf allen Parzellen im „geringen“ Bereich. Auch im Jahr 2019 liegen die Werte der nFK auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1.5) signifikant höher als auf den Kalk 0 Parzellen. Die eingestufteten Werte sinken von „sehr gering“ (Kalk 0) zu „gering“ (Kalk 1 und Kalk 1.5).

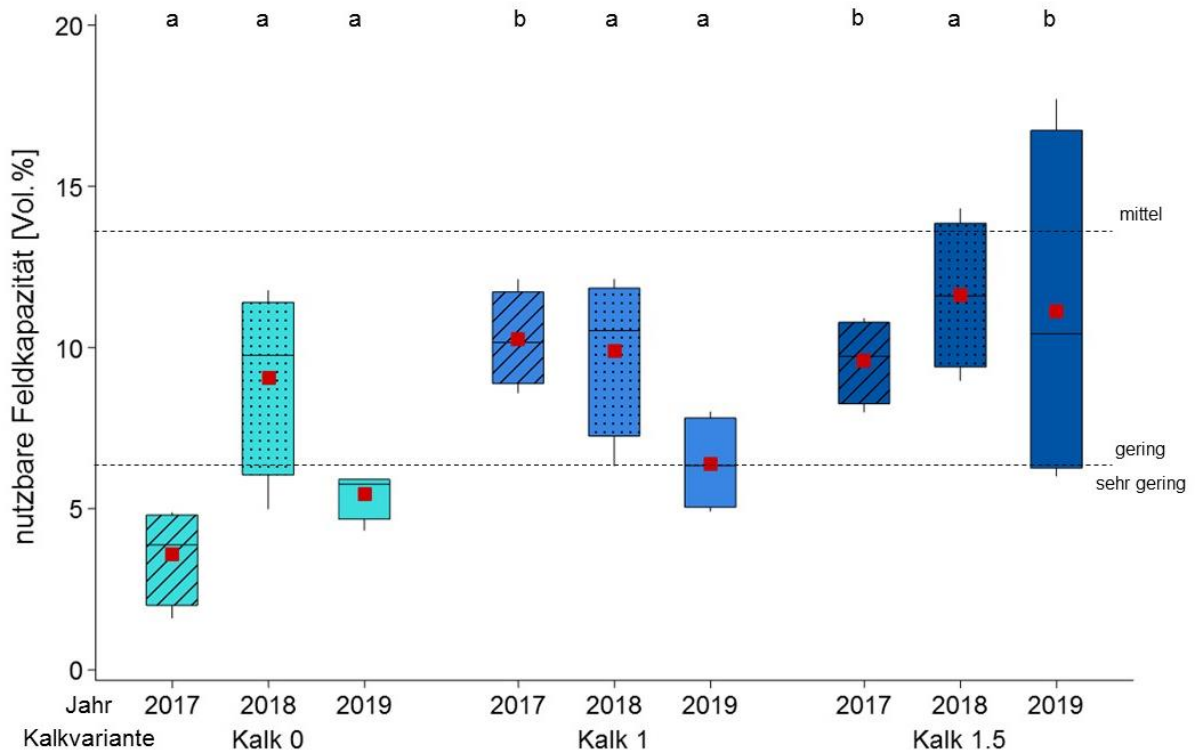


Abbildung 37: Nutzbare Feldkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Der Totwassergehalt (TW) im Oberboden des Standortes Hergarten sinkt signifikant auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1) im ersten Untersuchungsjahr (2017) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) (Abbildung 38). Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ (Kalk 0 und Kalk 1.5) bis „mittel“ (Kalk 1) einzuordnen. In den Untersuchungsjahren 2018 und 2019 sind keine signifikanten Unterschiede des TW-Anteils auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) zu erkennen. Im Allgemeinen liegen die TW-Werte im zweiten Untersuchungsjahr auf allen Parzellen „sehr hoch“ (Ad-hoc-AG Boden 2005) und können 2019 wieder als „hoch“ eingestuft werden.

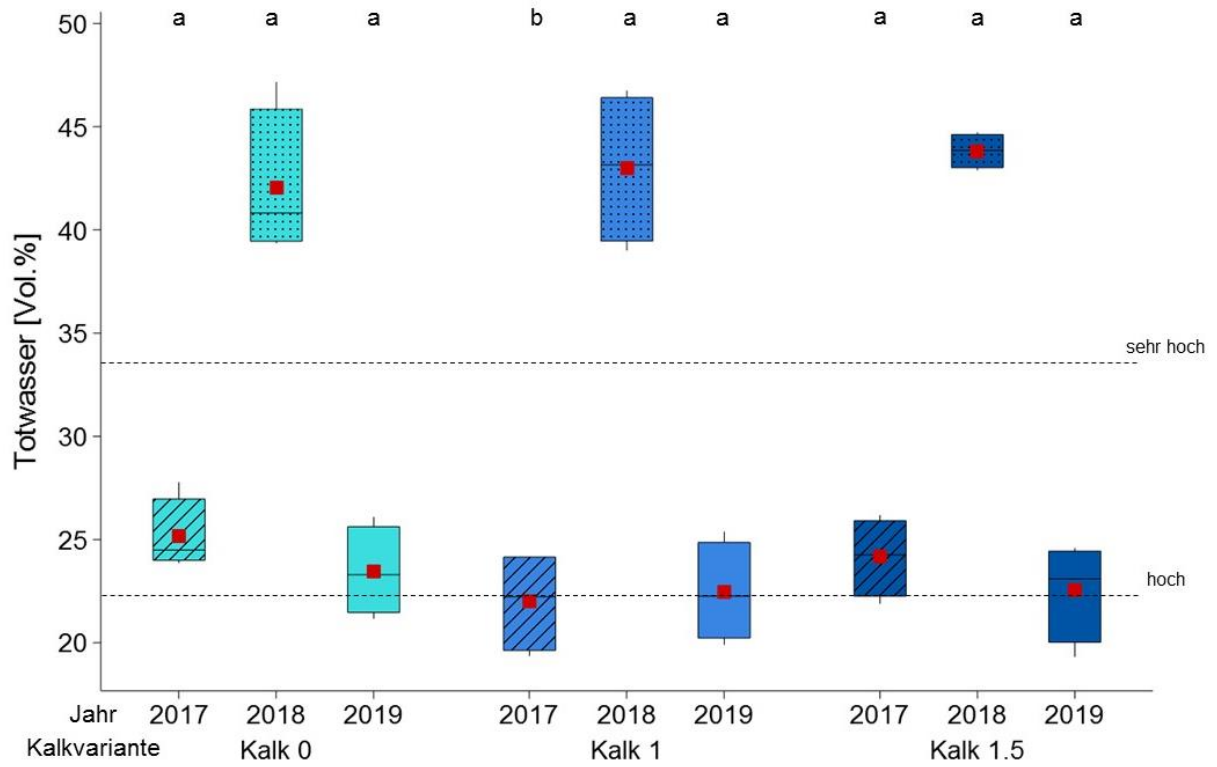


Abbildung 38: Totwassergehalte [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten für die Untersuchungsjahre 2017-2019 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.4.3 Scherparameter und Vorbelastungswerte

Die Kohäsion (c) steigt im ersten Untersuchungsjahr 2017 (nicht signifikant) auf den Kalkvarianten Kalk 1 und Kalk 1.5 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 am Standort Hergarten (Tabelle 15). Gleichzeitig steigt leicht (nicht signifikant) der Winkel der Inneren Reibung (φ) auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Es sind erhöhte Werte des φ auch in den beiden folgenden Jahren auf Kalk 1 und Kalk 1.5 zu erkennen. Gleichzeitig sinkt jedoch c auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0).

Tabelle 15: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten für die Jahre 2017-2019 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk-variante | c [kPa] | φ [°] |
|------|---------------|---------|---------------|
| 2017 | Kalk 0 | 17 | 33 |
| | Kalk 1 | 24 | 34 |
| | Kalk 1.5 | 20 | 34 |
| 2018 | Kalk 0 | 31 | 35 |
| | Kalk 1 | 24 | 40 |
| | Kalk 1.5 | 30 | 36 |
| 2019 | Kalk 0 | 38 | 30 |
| | Kalk 1 | 36 | 31 |
| | Kalk 1.5 | 28 | 36 |

Der maximale Scherwiderstand, gemessen als Funktion der Normalspannung, war im Oberboden am Standort Hergarten auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) in den ersten beiden Untersuchungsjahren (2017 und 2018), vor allem bei hohen Auflasten (> 100 kPa), höher (Abbildung 39). Im Untersuchungsjahr 2018 (30 Monate nach der Kalkung) liegt der maximale Scherwiderstand der Kalk 0 Variante deutlich über dem Scherwiderstand auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) (vor allem für Auflasten > 100 kPa).

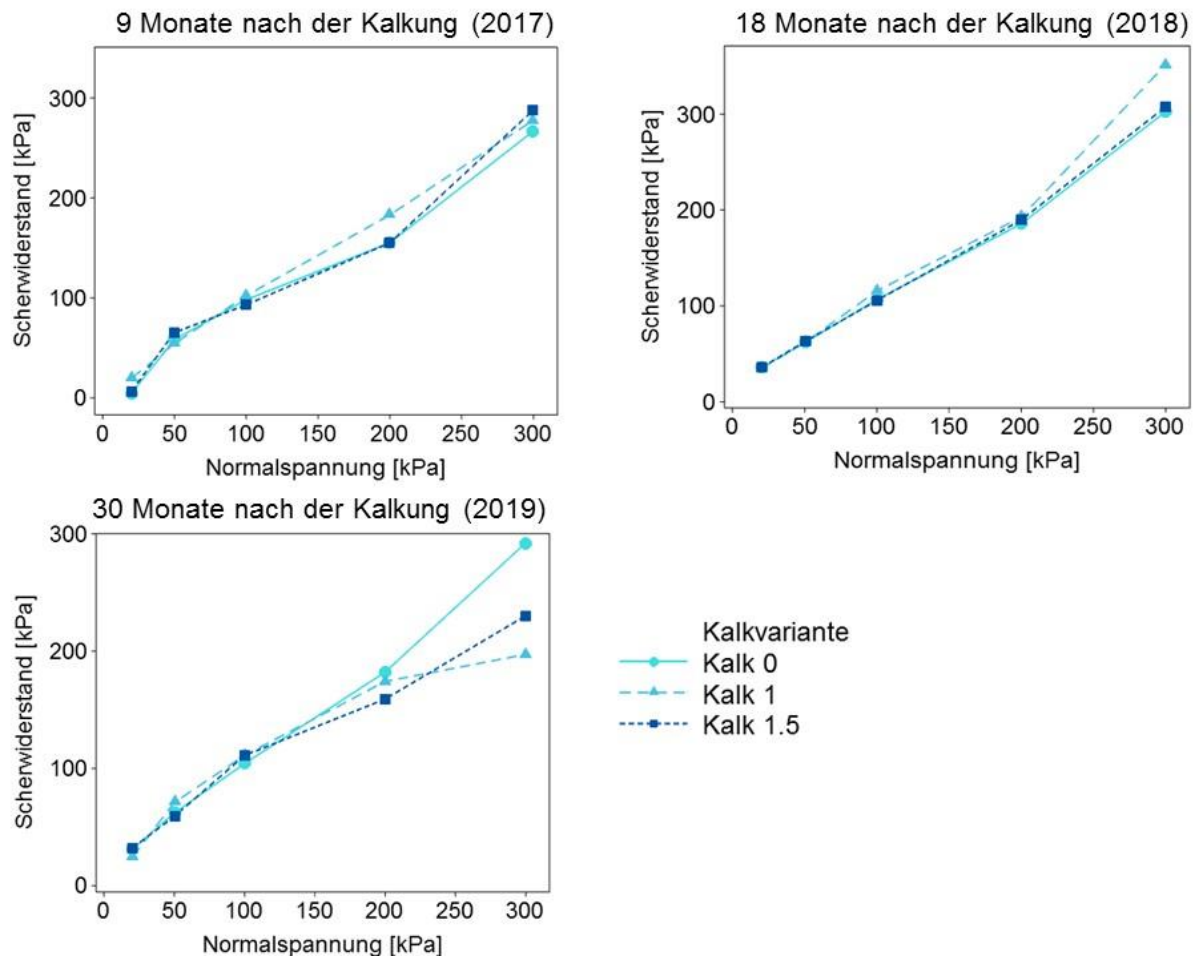


Abbildung 39: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Hergarten für die Jahre 2017-2019 (n = 4).

Es sind keine signifikanten Unterschiede der Vorbelastungswerte auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort Hergarten in den Jahren 2017 bis 2019 zu erkennen (Abbildung 40). Alle (Mittel-)Werte sind laut DVWK (1997) als „gering“ bis „mittel“ einzustufen. Im zweiten Untersuchungsjahr (2018) steigt die Vorbelastung auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu der ungekalkten Variante tendenziell an.

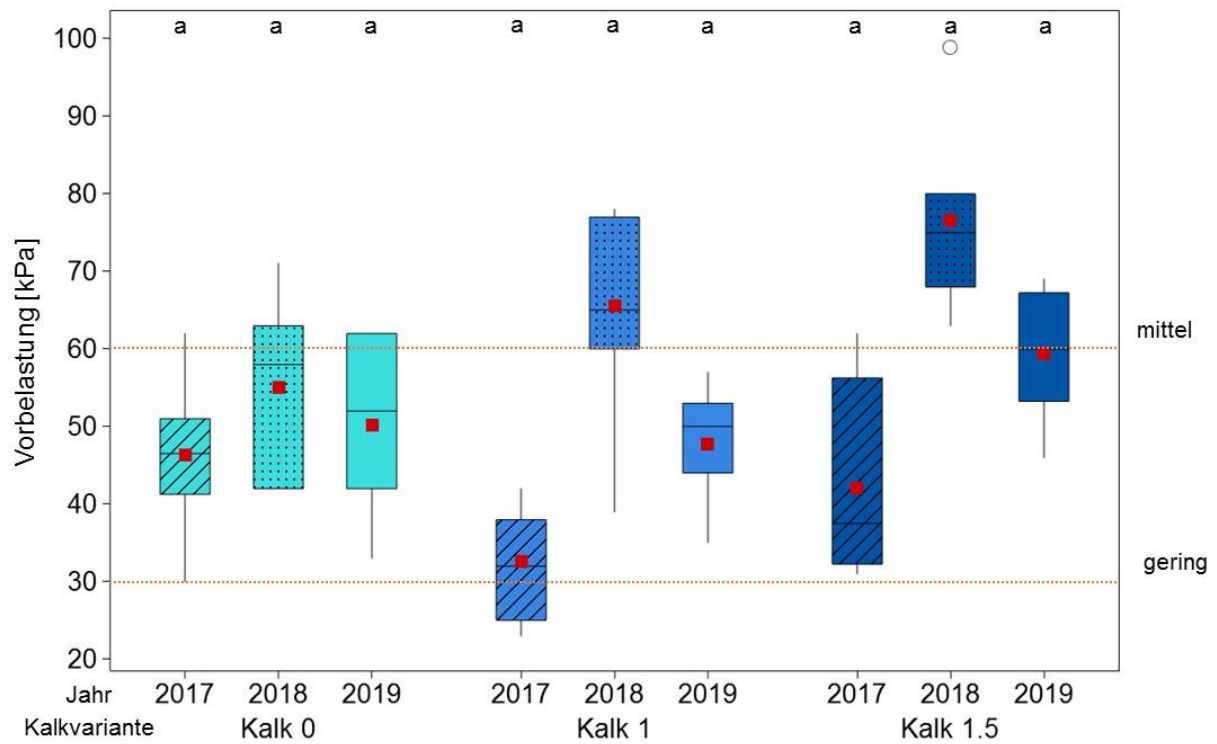


Abbildung 40: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Hergarten für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 8$) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.4.4 Zugspannung

Am Standort Hergarten wurde für die luftgetrockneten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) keine signifikanten Unterschiede der Zugspannung (Y) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) festgestellt (Abbildung 41). Die Y ist auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5), 18 Monate (2019) nach der Kalkung, geringer als auf den Kontrollparzellen (Kalk 0). 30 Monate nach der Kalkung (2019) wurde die Y für die auf $\psi_m = -30$ kPa entwässerten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) gemessen. Es sind keine signifikanten Unterschiede der Zugspannung (Y) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) festgestellt wurden.

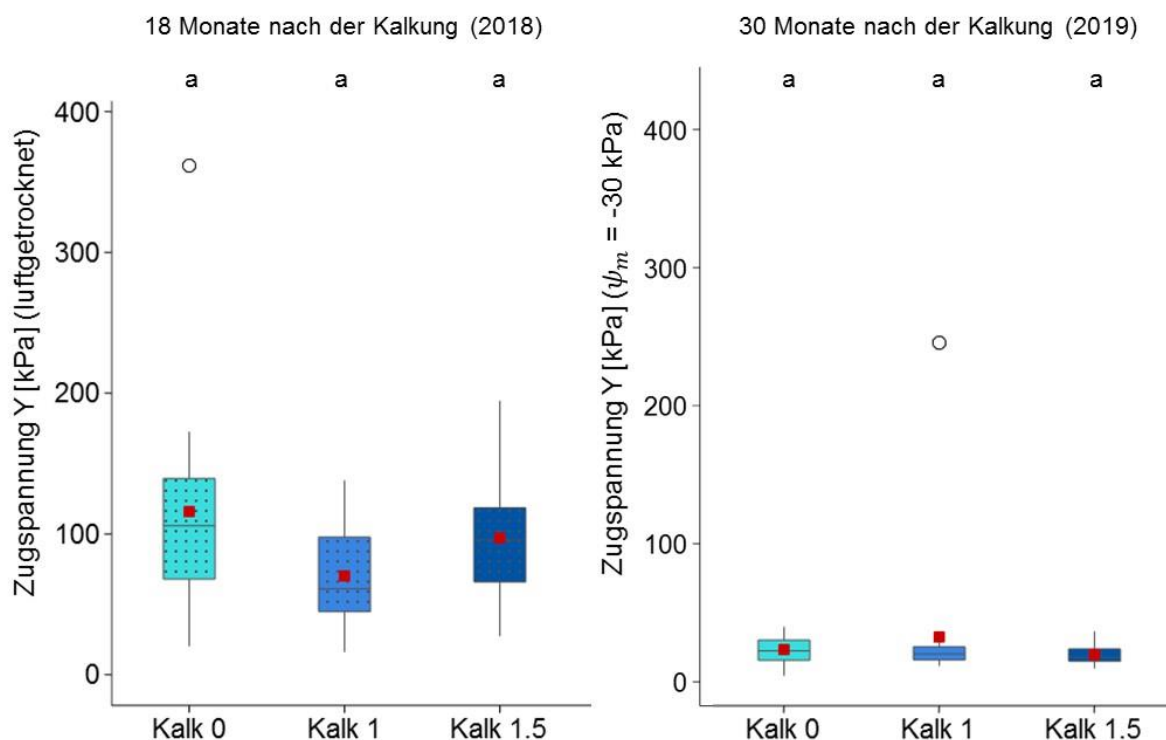


Abbildung 41: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019) aus dem Oberboden des Standortes Hergarten für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.5 Puch

3.5.1 Kationenaustauschkapazität und pH

Am Standort Puch ist, als typische Folge der Kalkung, Ca^{2+} das am stärksten vertretene austauschbare Kation mit $> 67 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ an der KAK_{eff} in den Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten (Tabelle 16). Im Vergleich mit den anderen austauschbaren Kationen hat Ca^{2+} auch ohne eine Kalkung Ca^{2+} den größten Anteil an der KAK_{eff} . Der Mg^{2+} Gehalt sinkt in den Untersuchungsjahren 2017-2019 von $9,8 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 0) auf $9,2 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 1) und $8,9 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 1.5) (2017) und von $11,1 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 0) auf $10,4 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 1) und $10,6 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 1.5) (2018) und von $12,6 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 0) auf $10,5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 1) und $10,5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Kalk 1.5) (2019). Die Anteile an K^+ bleiben auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 in allen Untersuchungsjahren nahezu unverändert und die Anteile an Na^+ sinken im letzten Untersuchungsjahr 2019 auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kalk 0 Variante. Für H^+ und Al^{3+} ergaben sich aufgrund des geringen Gehaltes kaum messbare Werte.

Am Standort Puch liegt der empfohlene pH-Wert nach VDLUFA (2000a) zwischen 6,3 und 7,0. Die pH-Werte auf den Kalk 0 Parzellen sind 5,3 (2017), 5,6 (2018) und 5,3 (2019) (Tabelle 16). Der angestrebte Zielbereich konnte nach der Kalkgabe auf den Kalk 1 und Kalk 1,5 Parzellen erreicht werden, mit Ausnahme von Kalk 1.5 mit einem pH von 6,1 (2018). Die auf den Kalk 1 Parzellen gemessenen Werte liegen bei 6,8 (2017), 6,3 (2018) und 6,3 (2019). Die Einzelwerte der Kalk 1 Parzellen zeigen im Jahr 2018, dass der pH-Wert noch vereinzelt unter dem empfohlenen Zielwertbereich lag. Auf den Kalk 1,5 Parzellen liegen die pH-Werte bei 7,0 (2017), 6,1 (2018) und 6,4 (2019). Einige Parzellen scheinen somit immer noch mit Kalk unterversorgt zu sein.

Tabelle 16: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$mmol_c kg^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$mmol_c kg^{-1}$] ergeben und der pH Wert [$CaCl_2$] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Puch für die Jahre 2017-2019 ($n = 2$).

| Jahr | Kalk-variante | K^+ | Na^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} [$mmol_c kg^{-1}$] | H^+ | Al^{3+} | KAK_{eff} | pH [$CaCl_2$] |
|------|---------------|-------|--------|-----------|-----------------------------------|-------|-----------|-------------|--------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 2,8 | 0,2 | 9,8 | 53,9 | 0,6 | 0,7 | 68 | 5,3 |
| | Kalk 1 | 2,8 | 0,1 | 9,2 | 78,8 | - | - | 91 | 6,8 |
| | Kalk 1.5 | 2,8 | 0,2 | 8,9 | 88,6 | - | - | 100 | 7,0 |
| 2018 | Kalk 0 | 3,7 | 0,6 | 11,1 | 57,7 | 0,3 | - | 73 | 5,6 |
| | Kalk 1 | 3,6 | 0,6 | 10,4 | 67,2 | - | - | 82 | 6,3 |
| | Kalk 1.5 | 3,6 | 0,8 | 10,6 | 66,5 | - | - | 81 | 6,1 |
| 2019 | Kalk 0 | 3,4 | 0,5 | 12,6 | 61,6 | - | - | 78 | 5,3 |
| | Kalk 1 | 2,9 | 0,3 | 10,5 | 76,3 | - | - | 90 | 6,3 |
| | Kalk 1.5 | 3,3 | 0,4 | 10,4 | 79,7 | - | - | 94 | 6,4 |

3.5.2 Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter

Im ersten Untersuchungsjahr (2017) steigt die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) signifikant auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Parzellen (Kalk 0) am Standort Puch (Abbildung 42). Die k_f (Mittel-)Werte steigen laut Ad-hoc-AG Boden (2005) von „gering“ (Kalk 0) zu „hoch“ (Kalk 1.5). In den beiden folgenden Untersuchungsjahren 2018 und 2019 scheinen die Werte für die k_f kaum sich von den gekalkten Parzellen und ungekalkten Parzellen unterscheiden. Die k_f (Mittel-)Werte liegen auf allen untersuchten Parzellen bei „hoch“ (2018) bzw. „extrem hoch“ (2019).

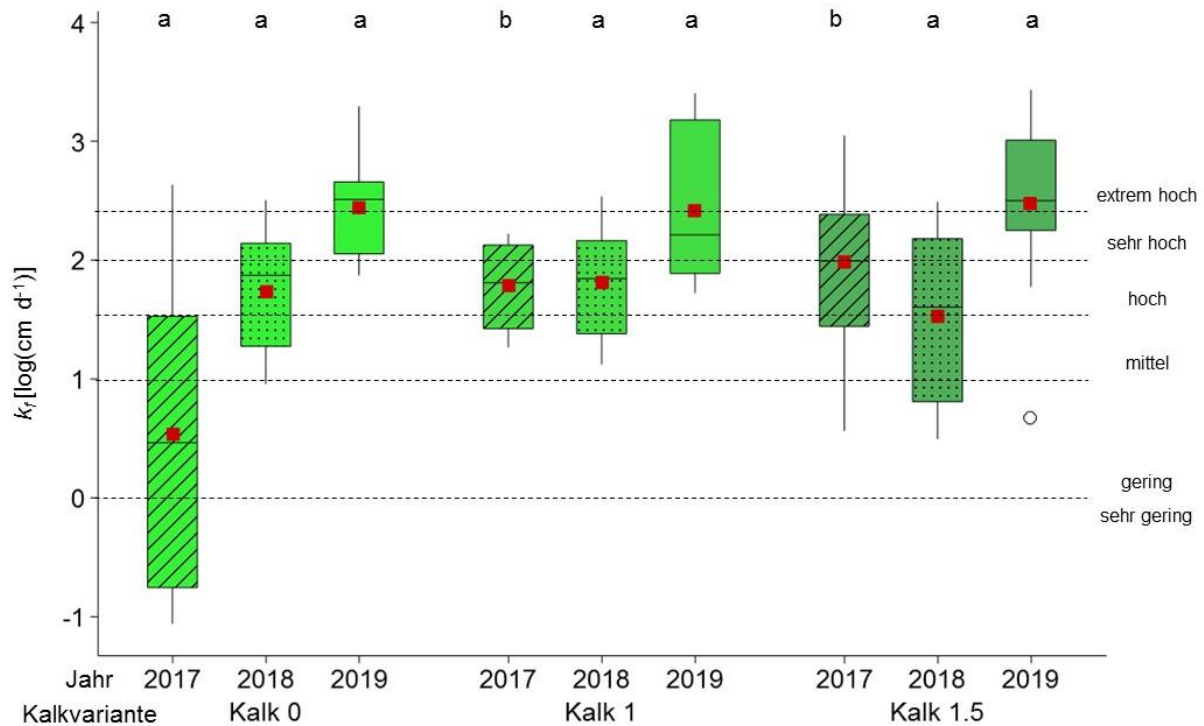


Abbildung 42: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d⁻¹] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Puch für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017-2019 (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Im ersten Untersuchungsjahr (2017) und damit 9 Monate nach der Kalkung liegt die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) in der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante deutlich über der Kalk 0 Variante am Standort Puch (Abbildung 43). Ab einem pF zwischen 1,8 und 2,6 ist der k_u Verlauf von der Kalk 1 Variante am höchsten und darunter liegt der Kalk 1.5 und Kalk 0 Verlauf. Im Untersuchungsjahr 2018 liegt die k_u von Kalk 0 bis zu einem pF von 2,7 über denen von Kalk 1 und Kalk 1.5. Danach liegt die k_u der gekalkten Varianten (Kalk 1) etwas über denen der Kalk 0 Variante.

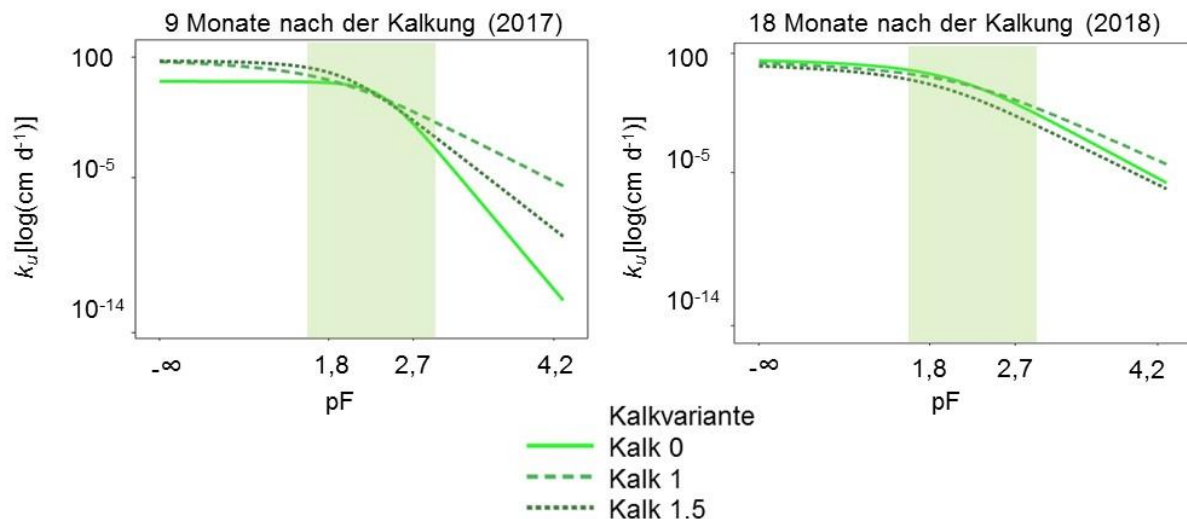


Abbildung 43: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Puch für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) in den Untersuchungsjahren 2017 und 2018. Die grüne Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten ($n = 4$).

Am Standort Puch sind keine signifikanten Unterschiede der Lagerungsdichten ρ_B , des Gesamtporenvolumens (GPV) und der Luftleitfähigkeit (k_l) auf den unterschiedlichen Kalkvarianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) zu erkennen (Tabelle 17). Die ρ_B ist in allen untersuchten Jahren auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) höher als auf den Kalk 0 Parzellen. Alle Werte der ρ_B sind als „mittel“ (2017 und 2018) und „gering“ (2019, Kalk 0 und Kalk 1) nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzustufen. Das GPV sinkt (nicht signifikant) im ersten Untersuchungsjahr (2017) auf den gekalkten Varianten im Vergleich zur Kalk 0 Variante. Alle Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „mittel“ einzustufen ebenso im Jahr 2018 – hier bleibt das GPV auf Kalk 1 unverändert im Vergleich zu Kalk 0 und sinkt nur leicht auf Kalk 1.5. Im letzten Untersuchungsjahr 2019 sind die Werte für das GPV auf den gekalkten Parzellen niedriger als auf den ungekalkten Parzellen (Kalk 0). Die Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ einzustufen. Die Luftleitfähigkeit (k_l) des Oberbodens am Standort Puch wurde bei $\psi_m = -6$ kPa gemessen und steigt (nicht signifikant) im ersten Untersuchungsjahr 2017 auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen. Die Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „sehr gering“ (Kalk 0) bis „gering“ (Kalk 1 und Kalk 1.5) einzustufen. Im zweiten Untersuchungsjahr (2018) liegen die Werte auf allen Parzellen im „mittleren“ Bereich auf Kalk 0 und Kalk 1.5 und steigen auf den gekalkten Parzellen von Kalk 1 und sind dann als „hoch“ einzustufen. 2019 zeigt sich, dass die k_l auf den gekalkten Parzellen der Kalk 1.5 Variante die k_l im Vergleich zur Kalk 0 Variante am höchsten sind und nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „sehr hoch“ eingestuft werden können.

Tabelle 17: Lagerungsdichte ρ_B in g cm^{-3} und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_l) bei $\psi_m = -6 \text{ kPa}$ in cm d^{-1} sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch für die Jahre 2017-2019 ($n = 8$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk- variante | Lagerungs- dichte (ρ_B) [g cm^{-3}] | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | GPV Vol.% | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | k_l bei $\psi_m =$ -6 kPa cm d^{-1} | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) |
|------|-------------------|---|--|------------------|--|---|--|
| 2017 | Kalk 0 | 1,47 | mittel | 44 | mittel | 30 | sehr gering |
| | Kalk 1 | 1,52 | mittel | 42 | mittel | 88 | gering |
| | Kalk 1.5 | 1,54 | mittel | 41 | mittel | 65 | gering |
| 2018 | Kalk 0 | 1,49 | mittel | 43 | mittel | 156 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,49 | mittel | 43 | mittel | 309 | hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,53 | mittel | 42 | mittel | 122 | mittel |
| 2019 | Kalk 0 | 1,37 | gering | 48 | hoch | 324 | sehr hoch |
| | Kalk 1 | 1,38 | gering | 47 | hoch | 274 | hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,42 | mittel | 46 | hoch | 374 | sehr hoch |

Die Luftkapazität (LK) sinkt (nicht signifikant) im Oberboden der gekalkten Parzellen der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) in den drei Untersuchungsjahren 2017 bis 2019 am Standort Puch (Abbildung 44). Die Werte der LK sind hier nach Ad-hoc-AG Boden (2005) im „mittleren“ bis teilweise „hohem“ Bereich einzustufen.

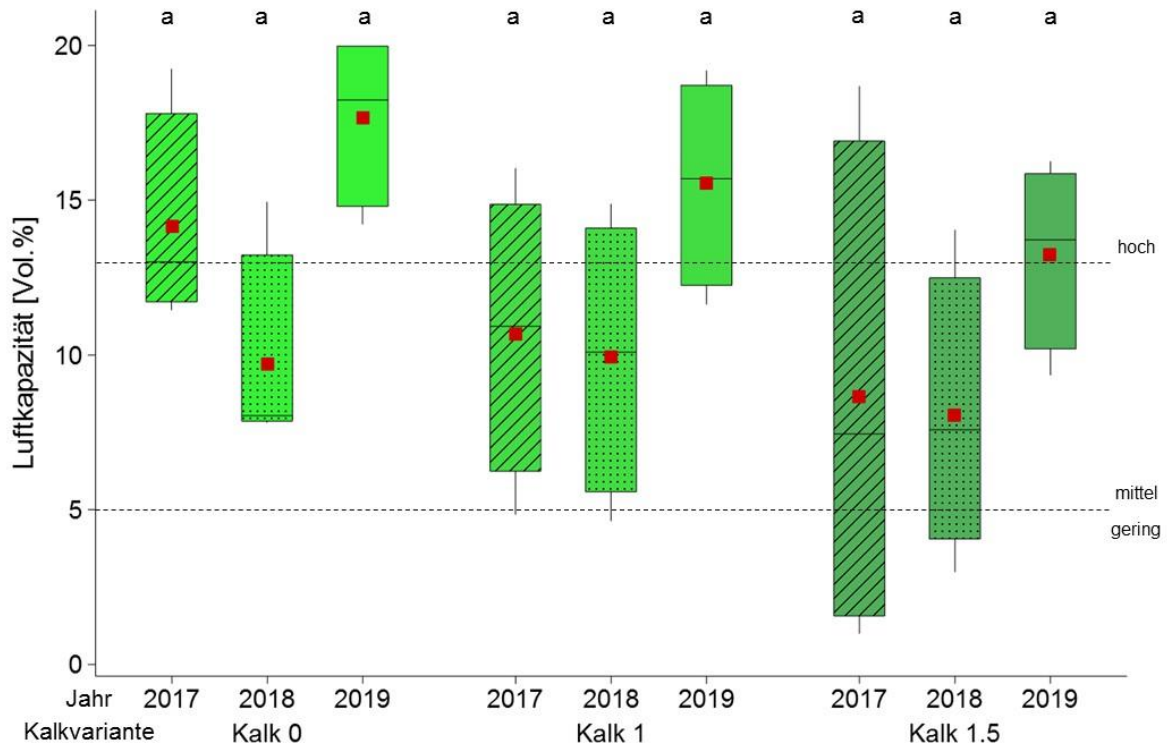


Abbildung 44: Luftkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) zeigt innerhalb der beprobten Varianten große Schwankungen in den Untersuchungsjahren 2017-2019 am Standort Puch (Abbildung 45). Im ersten Untersuchungsjahr 2017 steigen die Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten signifikant an im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich damit von „sehr gering“ auf den Kalk 0 Parzellen zu „gering“ auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen. Auch im zweiten Untersuchungsjahr (2018) steigt die nFK signifikant auf den Kalk 1.5 Parzellen. Zusätzlich steigt die nFK (nicht signifikant) auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollvarianten (Kalk 0). Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich nicht und ist auf allen Parzellen als „mittel“ einzustufen. Im Untersuchungsjahr 2019 steigen die Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten signifikant an im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich damit von „sehr gering“ auf den Kalk 0 Parzellen zu „gering“ auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen.

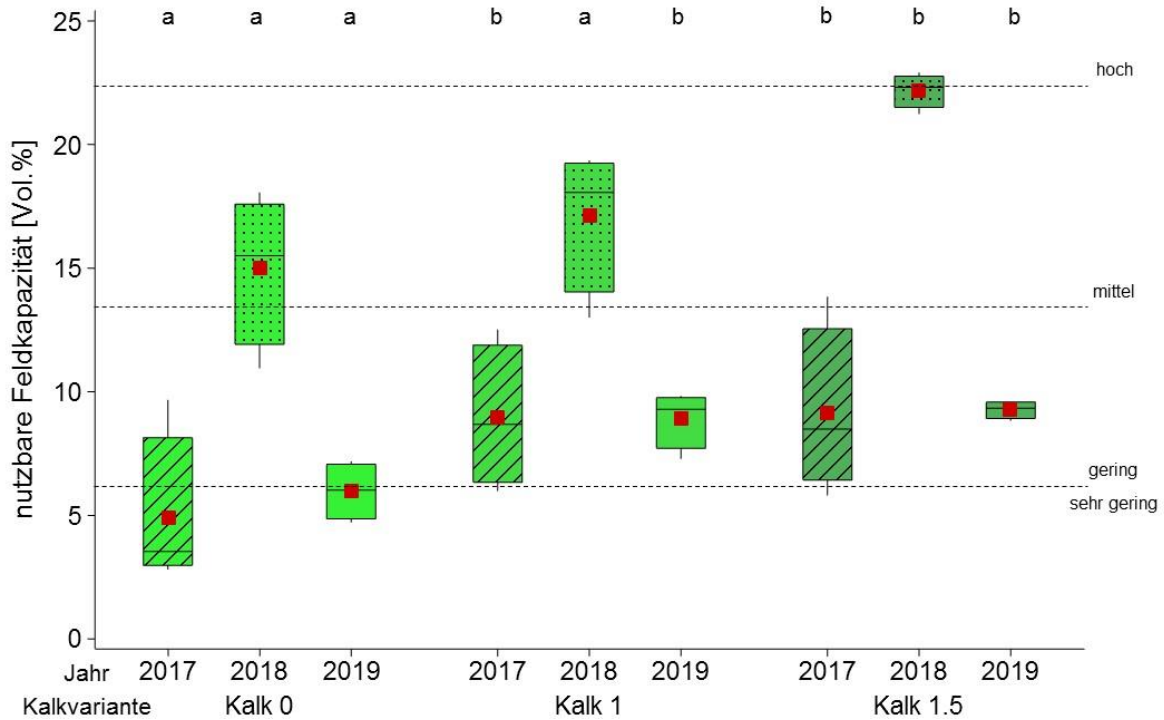


Abbildung 45: Nutzbare Feldkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Der Totwassergehalt (TW) im Oberboden des Standortes Puch sinkt (nicht signifikant) bereits im ersten Untersuchungsjahr (2017) auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) (Abbildung 46). Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ einzuordnen. Im Untersuchungsjahr 2018 sinkt der TW-Anteil signifikant auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) und hier sind die Werte als „mittel“ einzustufen. Auch im Untersuchungsjahr 2019 sinkt der TW-Anteil (nicht signifikant) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ einzuordnen.

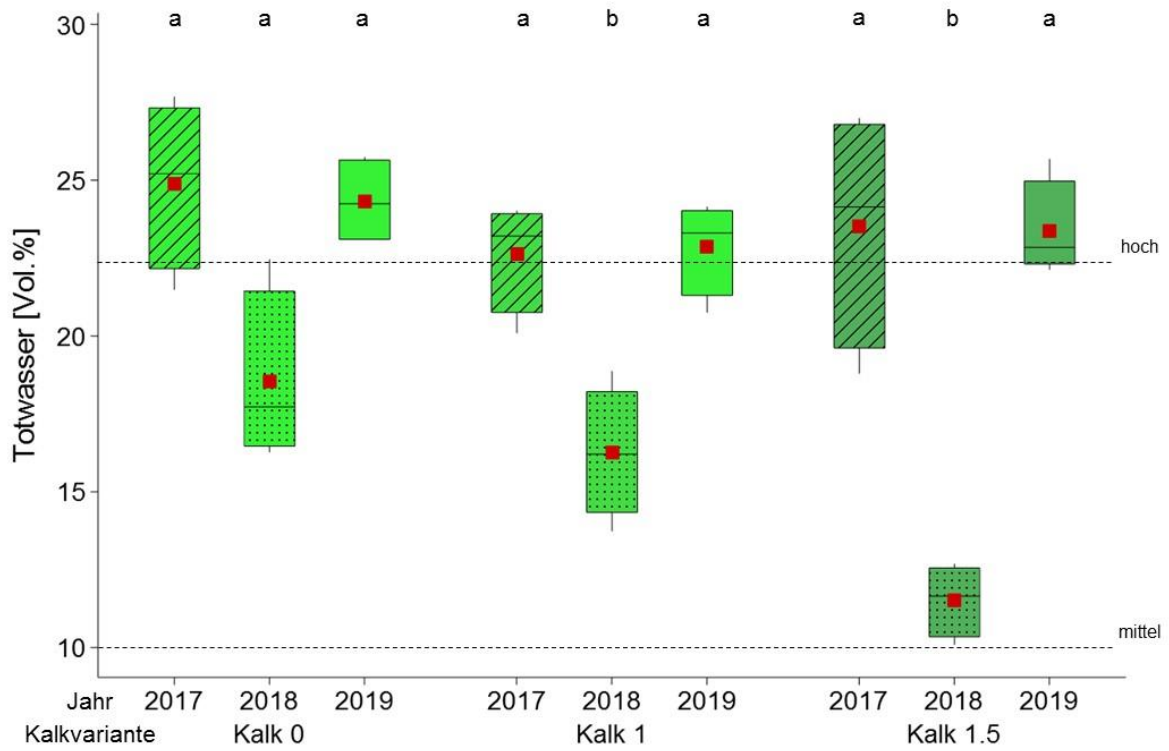


Abbildung 46: Totwassergehalte [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch für die Untersuchungsjahre 2017-2019 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.5.3 Scherparameter und Vorbelastungswerte

Die Kohäsion (c) sinkt im ersten Untersuchungsjahr 2017 (nicht signifikant) auf der Kalkvariante Kalk 1 und steigt im Gegensatz dazu auf den Parzellen von Kalk 1.5 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 am Standort Puch (Tabelle 18). Gleichzeitig steigt der Winkel der Inneren Reibung (φ) (nicht signifikant) auf den Parzellen von Kalk 1 und sinkt auf den Parzellen von Kalk 1.5 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. In den folgenden Jahren zeigt sich dasselbe Bild mit sinkenden c Werten für Kalk 1, steigenden c Werten für Kalk 1.5 und gleichzeitig steigendem φ für Kalk 1 und sinkendem φ für Kalk 1.5.

Tabelle 18: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch für die Jahre 2017-2019 ($n = 2$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt.

| Jahr | Kalk-variante | c [kPa] | φ [°] |
|------|---------------|--------------|------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 25 | 34 |
| | Kalk 1 | 14 | 37 |
| | Kalk 1.5 | 24 | 31 |
| 2018 | Kalk 0 | 21 | 33 |
| | Kalk 1 | 18 | 36 |
| | Kalk 1.5 | 24 | 34 |
| 2019 | Kalk 0 | 22 | 34 |
| | Kalk 1 | 11 | 39 |
| | Kalk 1.5 | 25 | 33 |

Der maximale Scherwiderstand, gemessen als Funktion der Normalspannung, war im Oberboden am Standort Puch auf den dort gekalkten Parzellen (Kalk 1) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr (2017), vor allem bei hohen Auflasten, höher bzw. gleich für eine Normalspannung von 300 kPa (Abbildung 47). Im darauffolgenden Untersuchungsjahr 2018 (18 Monate nach der Kalkung) ist der maximale Scherwiderstand auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) höher als auf den Kontrollparzellen. 2019 liegt dann nur noch der Scherwiderstand der Kalk 1 Variante über dem Verlauf der Kalk 0 Variante.

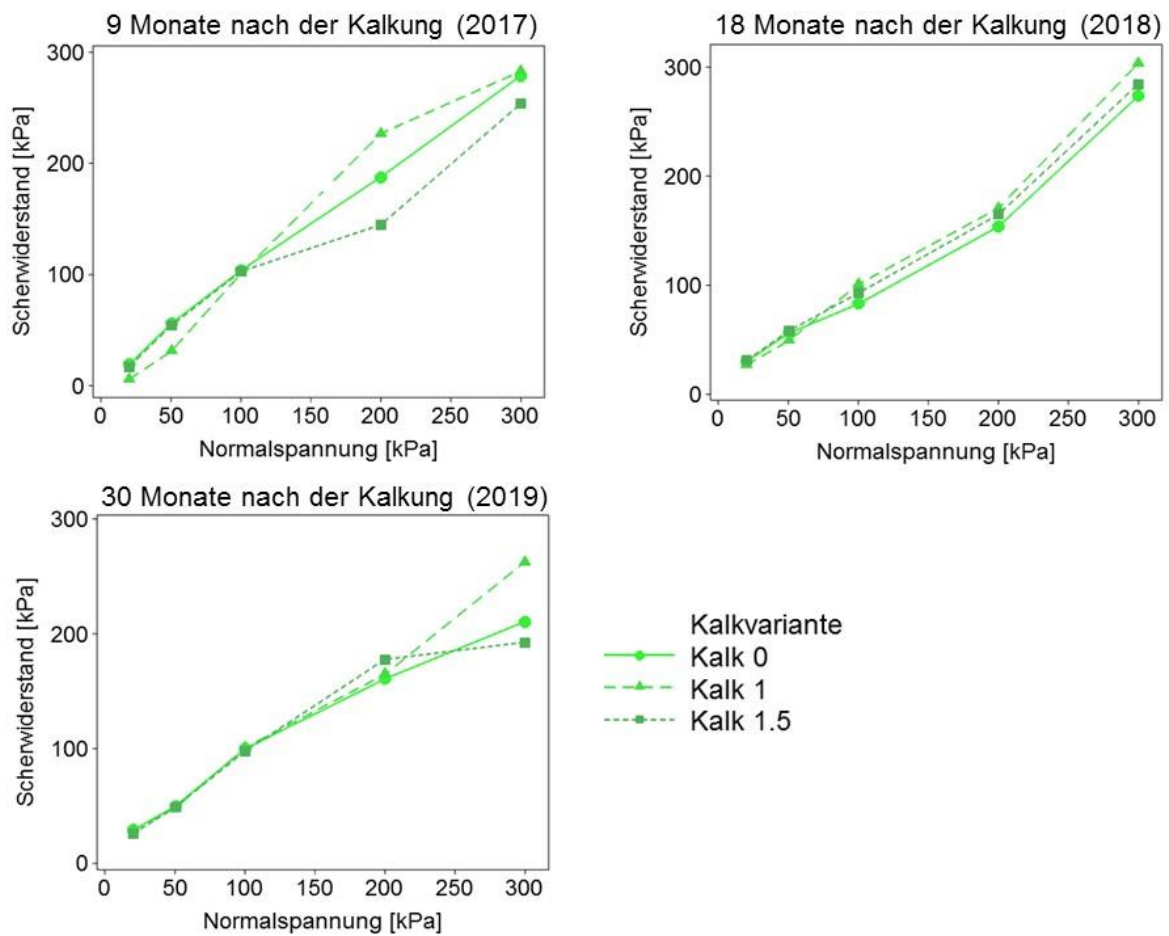


Abbildung 47: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Puch für die Jahre 2017-2019 (n = 4).

Es sind keine signifikanten Unterschiede der Vorbelastungswerte auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort Puch in den Jahren 2017 bis 2019 zu erkennen (Abbildung 48). Alle (Mittel-)Werte sind laut DVWK (1997) als „gering“ einzustufen.

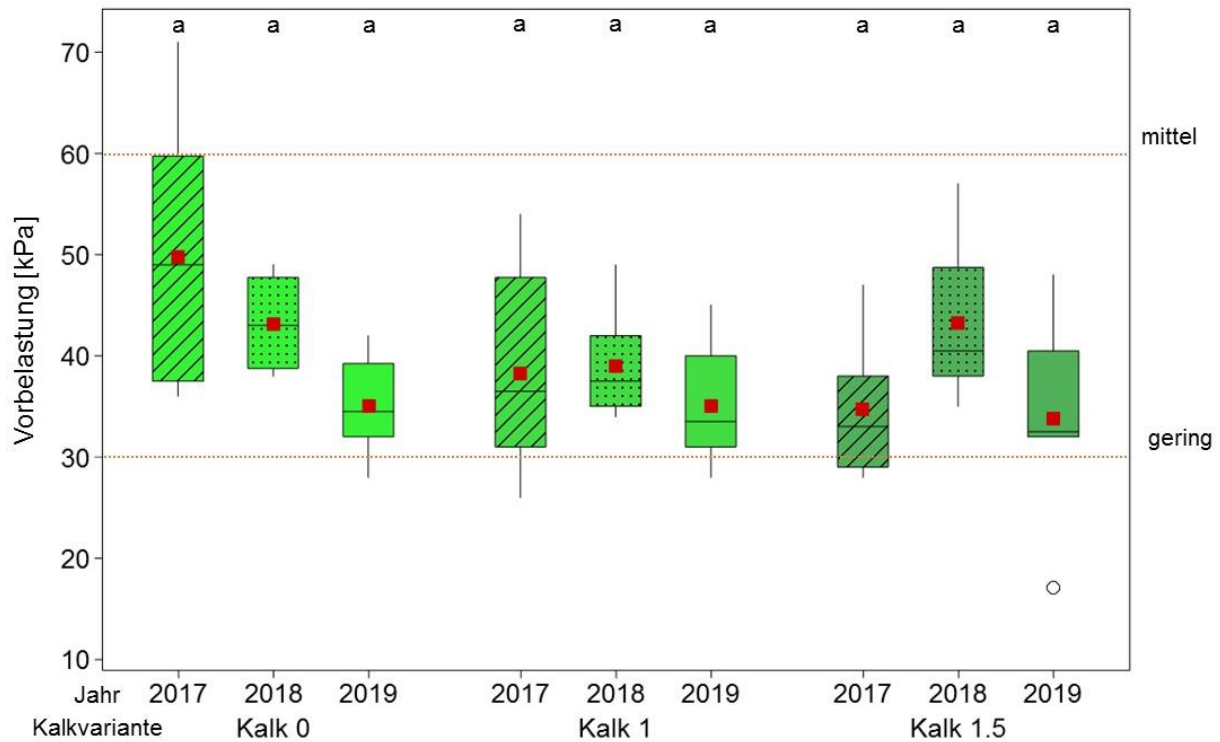


Abbildung 48: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Puch für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 8$) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.5.4 Zugspannung

Am Feldstandort Puch wurden für die luftgetrockneten Aggregate ($\emptyset \sim 16$ mm) keine signifikanten Unterschiede der Zugspannung (Y) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) festgestellt (Abbildung 49). Dennoch zeigt sich, dass Y auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1.5), 18 Monate nach der Kalkung, höher ist als die Y auf den Kontrollparzellen (Kalk 0). 30 Monate nach der Kalkung (2019) wurde die Y für die auf $\psi_m = -30$ kPa entwässerten Aggregate ($\emptyset \sim 16$ mm) gemessen. Die gekalkten Varianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) zeigen keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0).

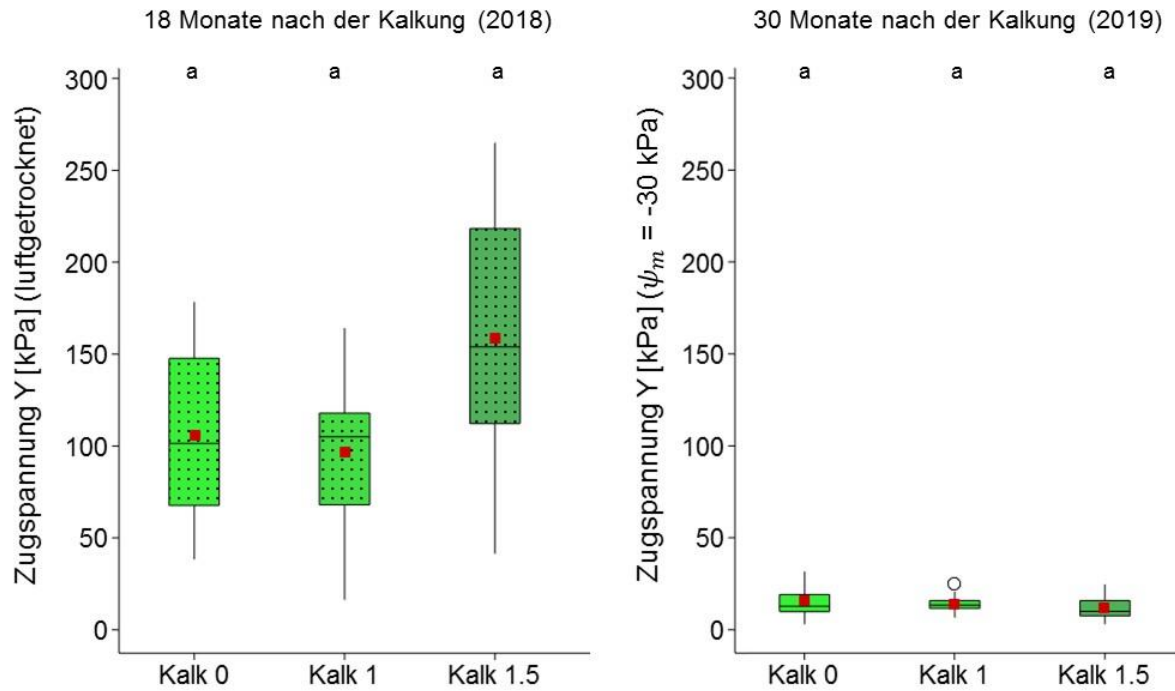


Abbildung 49: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019) aus dem Oberboden des Standortes Puch für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.6 Neubrandenburg

3.6.1 Kationenaustauschkapazität und pH

Als typische Folge der Kalkung ist Ca^{2+} am Standort Neubrandenburg in der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante das am stärksten vertretene austauschbare Kation mit $> 47 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ an der KAK_{eff} (Tabelle 19). Im Vergleich mit den anderen austauschbaren Kationen hat Ca^{2+} auch ohne eine Kalkung den größten Anteil an der KAK_{eff} . Erkennbar wird, dass durch die Kalkung auch die anderen austauschbaren Kationen und die KAK_{eff} beeinflusst werden. Besonders der Mg^{2+} Gehalt sinkt auf den gekalkten Varianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) in den Untersuchungsjahren 2017-2020. Auch die Anteile an K^+ und Na^+ verringern sich auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 in allen Untersuchungsjahren.

Die Kalkzugabe erhöht auf allen untersuchten Parzellen die pH-Werte (Tabelle 19). In Neubrandenburg liegt der nach VDLUFA (2000a) empfohlene pH Wert zwischen 6,3 und 7,0. Die pH-Werte auf den Kalk 0 Parzellen sind 5,9 (2017), 6,2 (2018), 6,2 (2019) und 5,7 (2020). Der angestrebte Zielbereich konnte auf allen gekalkten Parzellen erreicht werden. Die auf den Kalk 1 Parzellen gemessenen Werte liegen bei 6,8 (2017), 6,8 (2018), 6,6 (2019) und 6,6 (2020). Die pH-Werte liegen auf den Kalk 1.5 Parzellen bei 6,9 (2017), 6,9 (2018), 6,7 (2019) und 6,7 (2020).

Tabelle 19: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$mmol_c kg^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$mmol_c kg^{-1}$] ergeben und der pH Wert [$CaCl_2$] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 ($n = 2$).

| Jahr | Kalk-variante | K^+ | Na^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} [$mmol_c kg^{-1}$] | H^+ | Al^{3+} | KAK_{eff} | pH [$CaCl_2$] |
|------|---------------|-------|--------|-----------|-----------------------------------|-------|-----------|-------------|--------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 2,5 | 0,4 | 5,4 | 39,2 | 0,2 | 0,1 | 48 | 5,9 |
| | Kalk 1 | 2,4 | 0,4 | 5,4 | 49,5 | - | - | 58 | 6,8 |
| | Kalk 1.5 | 2,3 | 0,3 | 5,1 | 51,0 | - | - | 59 | 6,9 |
| 2018 | Kalk 0 | 2,5 | 3,1 | 7,4 | 43,7 | - | - | 57 | 6,2 |
| | Kalk 1 | 2,5 | 0,9 | 6,8 | 48,9 | - | - | 59 | 6,8 |
| | Kalk 1.5 | 2,3 | 0,7 | 6,5 | 47,0 | - | - | 57 | 6,9 |
| 2019 | Kalk 0 | 2,2 | 0,4 | 6,1 | 48,3 | 0,4 | 0,4 | 58 | 6,2 |
| | Kalk 1 | 2,3 | 0,4 | 5,9 | 53,2 | 0,7 | 0,5 | 63 | 6,6 |
| | Kalk 1.5 | 2,1 | 0,4 | 5,8 | 52,5 | 0,4 | 0,2 | 61 | 6,7 |
| 2020 | Kalk 0 | 2,3 | 0,3 | 5,7 | 41,2 | - | - | 50 | 5,7 |
| | Kalk 1 | 2,2 | 0,2 | 4,9 | 51,7 | - | - | 59 | 6,6 |
| | Kalk 1.5 | 2,1 | 0,2 | 5,0 | 49,7 | - | - | 57 | 6,7 |

3.6.1 Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter

Im ersten Untersuchungsjahr 2017 steigt die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) in den gekalkten Parzellen signifikant an im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) am Untersuchungsstandort in Neubrandenburg (Abbildung 50). Die k_f (Mittel-)Werte steigen nach der Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) „mittel“ (Kalk 0) auf „sehr hoch“ (Kalk 1 und Kalk 1.5). Im Jahr ist die k_f auf den Kalk 1 Parzellen unverändert zur Kontrollvariante (Kalk 0). Die k_f der Kalk 1.5 Variante steigen signifikant an im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Die k_f (Mittel-)Werte liegen laut Ad-hoc-AG Boden (2005) im „geringen“ Bereich auf Kalk 0 und Kalk 1 (2018) und steigen auf „mittlere“ Bereiche (Kalk 1.5) (2018). Im Untersuchungsjahr 2019 liegen die Werte dann für alle Varianten „hohen“ Bereich und es sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Im Jahr 2020 sind für Kalk 1.5 leicht (nicht signifikant) höhere k_f Werte im Vergleich zu Kalk 0 zu erkennen.

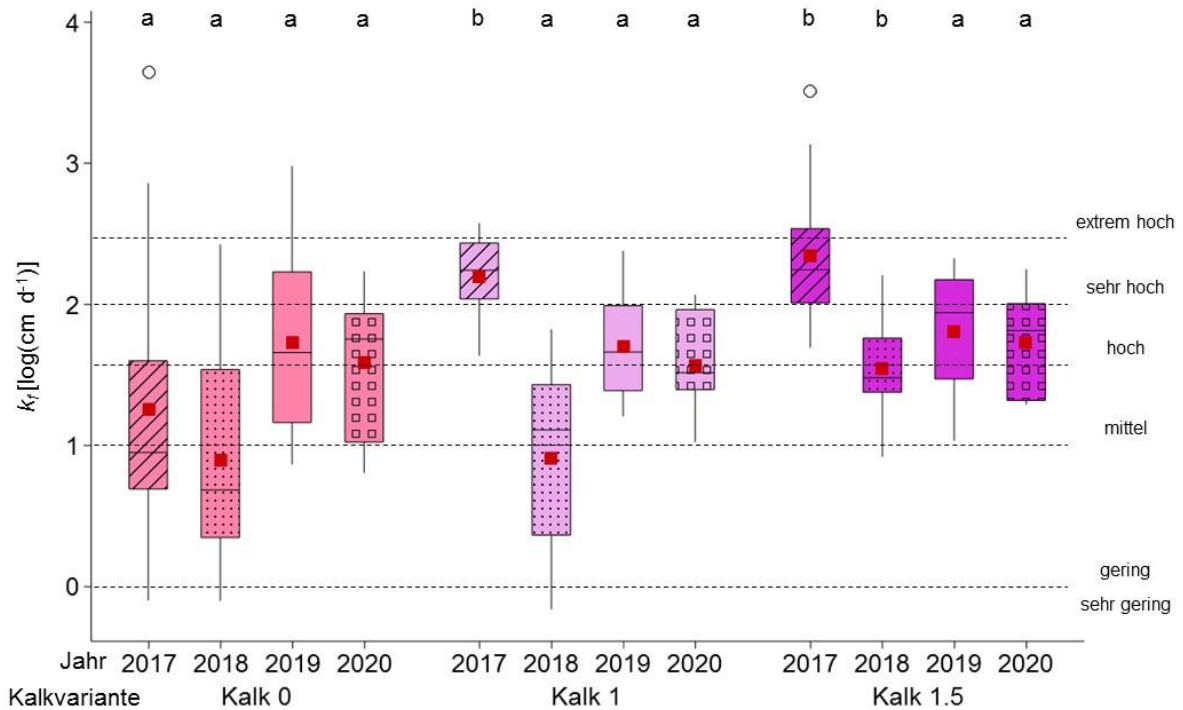


Abbildung 50: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_r) [cm d⁻¹] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 12). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Im ersten Untersuchungsjahr (2017) und damit 6 Monate nach der Kalkung liegt die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) in den gekalkten Varianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) bis zu einem pF von 1,8 deutlich über jener der Kalk 0 am Standort Neubrandenburg (Abbildung 51). Danach fällt die k_u stark ab und zeigt in den gemessenen Bereichen ähnliche Verläufe für alle Varianten. Im Gegensatz ist die k_u von Kalk 0 im gesamten gemessenen Bereich höher als in den Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten im Untersuchungsjahr 2018. Ab einem pF > 2,7 ist die k_u von Kalk 0 geringer als in Kalk 1.5. 24 Monate nach der Kalkung (2019) liegen die k_u -Verläufe der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante bis zu einem pF 2,7 über dem k_u -Verlauf von Kalk 0. Ab diesem Wendepunkt ist die k_u in der Kalk 0 Variante höher.

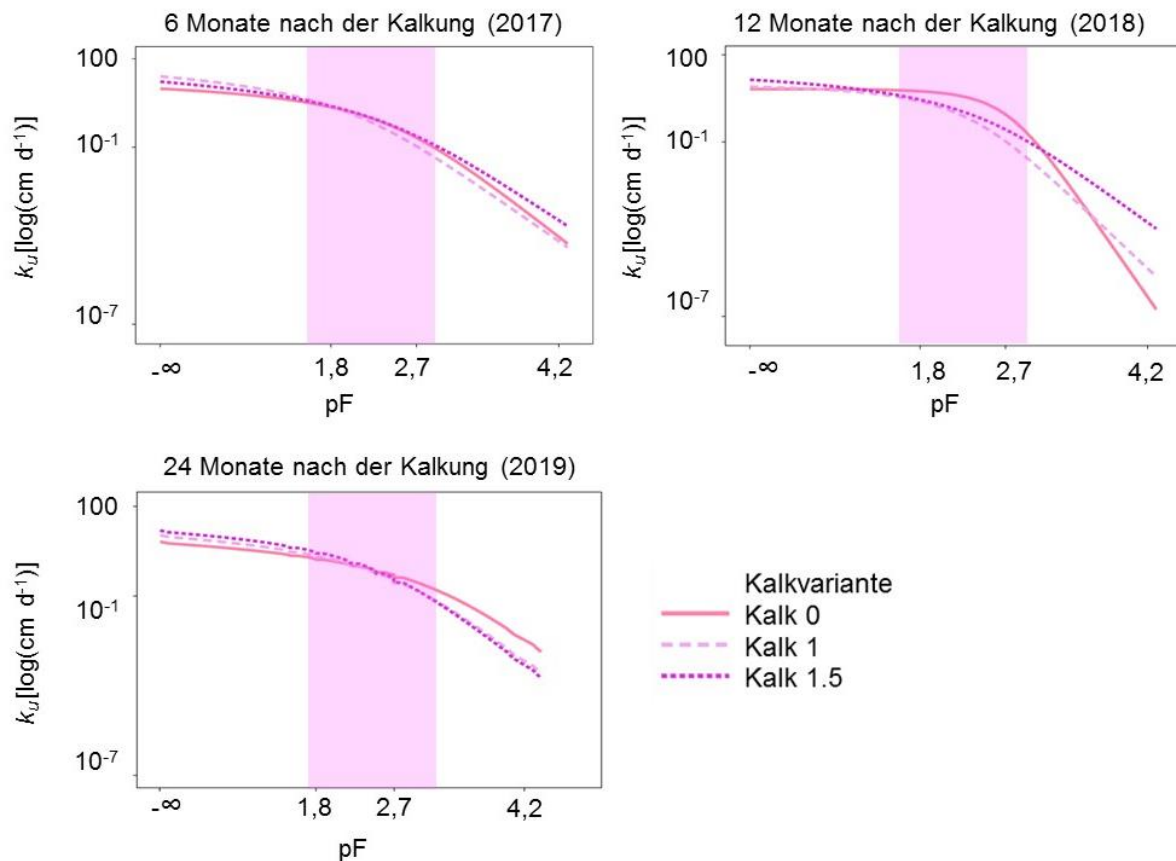


Abbildung 51: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF -Wert des Oberbodens am Standort Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA $\times 1,5$), in den Untersuchungsjahren 2017-2019. Die graue Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten ($n = 4$).

Am Standort Neubrandenburg sind (signifikante) Unterschiede der Lagerungsdichten ρ_B , des Gesamtporenvolumens (GPV) und der Luftleitfähigkeit (k_l) auf den unterschiedlichen Kalkvarianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) zu erkennen (Tabelle 20). Die ρ_B ist auf den Kalk 1 Parzellen signifikant geringer als auf den Kalk 0 Parzellen im ersten Untersuchungsjahr 2017. Auch die Kalk 1.5 Variante zeigt (nicht signifikant) geringere Werte für die ρ_B im Vergleich zu Kalk 0. Die Werte sinken nach Ad-hoc-AG Boden (2005) von „hoch“ (Kalk 0) zu „mittel“ (Kalk 1 und Kalk 1.5). In den Untersuchungsjahren 2018-2020 steigt die ρ_B leicht an (Kalk 1) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Die Einstufung liegt hier bei „hoch“ auf allen Parzellen im Jahr 2018 und in den Jahren 2019 und 2020 bei „mittel“ auf allen Parzellen. Das GPV steigt im ersten Untersuchungsjahr (2017) auf den Kalk 1 Varianten signifikant an im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Auch die Kalk 1.5 Variante zeigt (nicht signifikant) höhere Werte für das GPV im Vergleich zu Kalk 0. Die Werte steigen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) von „gering“ (Kalk 0) zu „mittel“ (Kalk 1 und Kalk 1.5). Im Jahr steigt das GPV (nicht signifikant) von „gering“ (Kalk 0) zu „mittel“ (Kalk 1.5). In den Jahren 2019 und 2020 zeigen sich keine Unterschiede zwischen der Kontrolle und den gekalkten Varianten. Alle

Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „mittel“ einzustufen. Die Luftleitfähigkeit (k_l) des Oberbodens am Standort Neubrandenburg wurde bei $\psi_m = -6$ kPa gemessen und zeigt leichte Schwankungen über die Jahre. Im ersten Untersuchungsjahr 2017 steigt die k_l signifikant auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen. Die Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „gering“ (Kalk 0), „hoch“ (Kalk 1) und „sehr hoch“ (Kalk 1.5) einzustufen. Im zweiten Untersuchungsjahr (2018) liegen die Werte im „hohem“ (Kalk 0 und Kalk 1) bis „sehr hohem“ Bereich (Kalk 1.5). 2019 und 2020 zeigt sich, dass die k_l auf den ungekalkten Parzellen (Kalk 0) im Vergleich zu Kalk 1.5 am höchsten sind. Die Werte für k_l auf Kalk 1 liegen 2020 über denen der Kalk 0 Variante und sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ auf Kalk 0 und Kalk 1 und „mittel“ auf Kalk 1.5 (2020) einzustufen.

Tabelle 20: Lagerungsdichte ρ_B in g cm^{-3} und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_l) bei $\psi_m = -6$ kPa in cm d^{-1} sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 ($n = 8$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk-variante | Lagerungsdichte (ρ_B) [g cm ⁻³] | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | GPV Vol. % | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | k_l bei $\psi_m = -6$ kPa cm d ⁻¹ | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) |
|------|---------------|---|--|---------------|--|---|--|
| 2017 | Kalk 0 | 1,67 | hoch | 37 | gering | 9 | gering |
| | Kalk 1 | 1,56* | mittel | 41* | mittel | 76* | hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,59 | mittel | 40 | mittel | 105* | sehr hoch |
| 2018 | Kalk 0 | 1,65 | hoch | 37 | gering | 97 | hoch |
| | Kalk 1 | 1,68 | hoch | 36 | gering | 43 | hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,63 | hoch | 38 | mittel | 131 | sehr hoch |
| 2019 | Kalk 0 | 1,50 | mittel | 43 | mittel | 276 | sehr hoch |
| | Kalk 1 | 1,52 | mittel | 42 | mittel | 89 | hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,50 | mittel | 43 | mittel | 102 | sehr hoch |
| 2020 | Kalk 0 | 1,54 | mittel | 42 | mittel | 41 | hoch |
| | Kalk 1 | 1,57 | mittel | 41 | mittel | 71 | hoch |
| | Kalk 1.5 | 1,56 | mittel | 41 | mittel | 30 | mittel |

Die Luftkapazität (LK) steigt (nicht signifikant) im Oberboden der gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) in den ersten beiden Untersuchungsjahren (2017 und 2018) am Standort Neubrandenburg (Abbildung 52). Die Werte der LK sind hier „mittleren“ bis teilweise „hohem“ Bereich einzustufen. Die gekalkten Varianten zeigen keine Veränderung zu Kalk 0 in den Jahren 2019 und 2020.

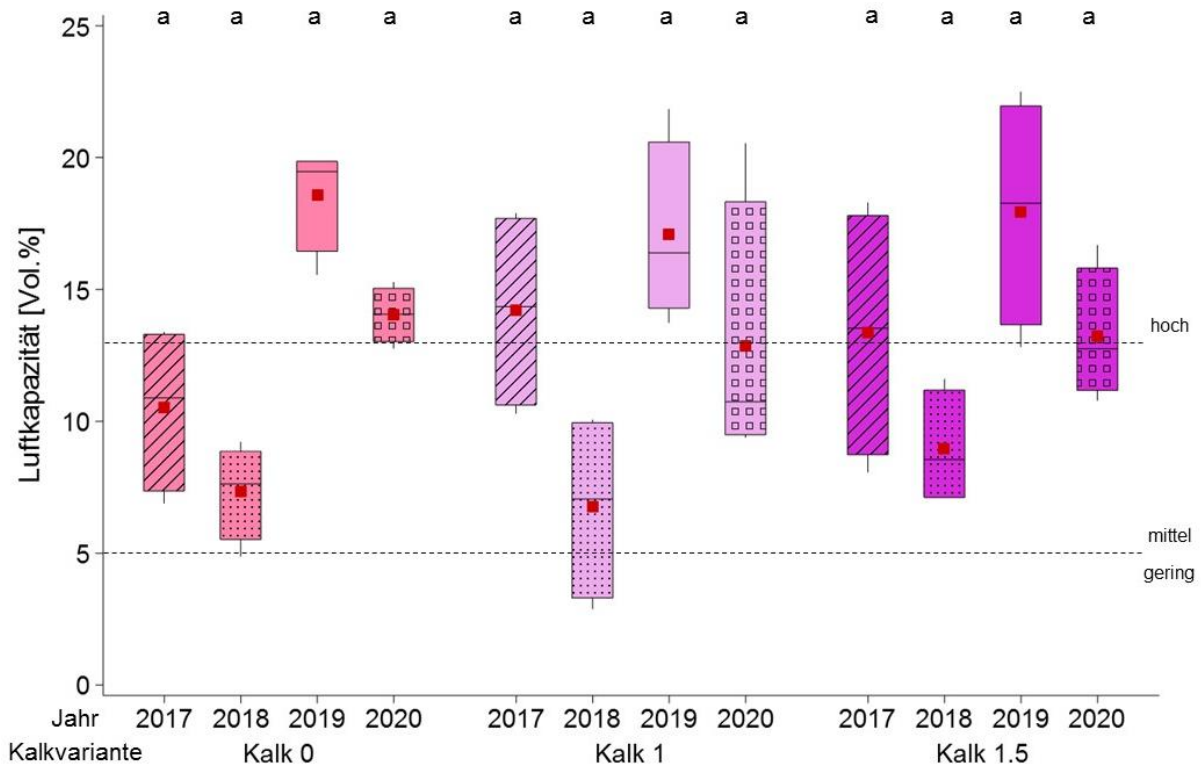


Abbildung 52: Luftkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) am Standort Neubrandenburg steigt im ersten Untersuchungsjahr (2017) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 signifikant an (Abbildung 53). Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich damit von „gering“ zu „mittel“. Im darauffolgenden Jahr (2018) liegen die Werte der nFK auf den gekalkten Parzellen unter denen der Kalk 0 Parzellen. Die eingestufteten Werte sinken von „mittel“ (Kalk 0) zu „gering“ (Kalk 1 und Kalk 1.5). 2019 scheinen die Werte für die nFK wieder leicht (nicht signifikant) zu steigen auf den gekalkten Parzellen und sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „gering“ (Kalk 0 und Kalk 1) und „mittel“ (Kalk 1.5) einzustufen. Auch 2020 sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen – die nFK in Kalk 1 steigt leicht an, wohingegen die in Kalk 1.5 leicht sinkt. Alle Werte der nFK liegen im „geringen“ Bereich.

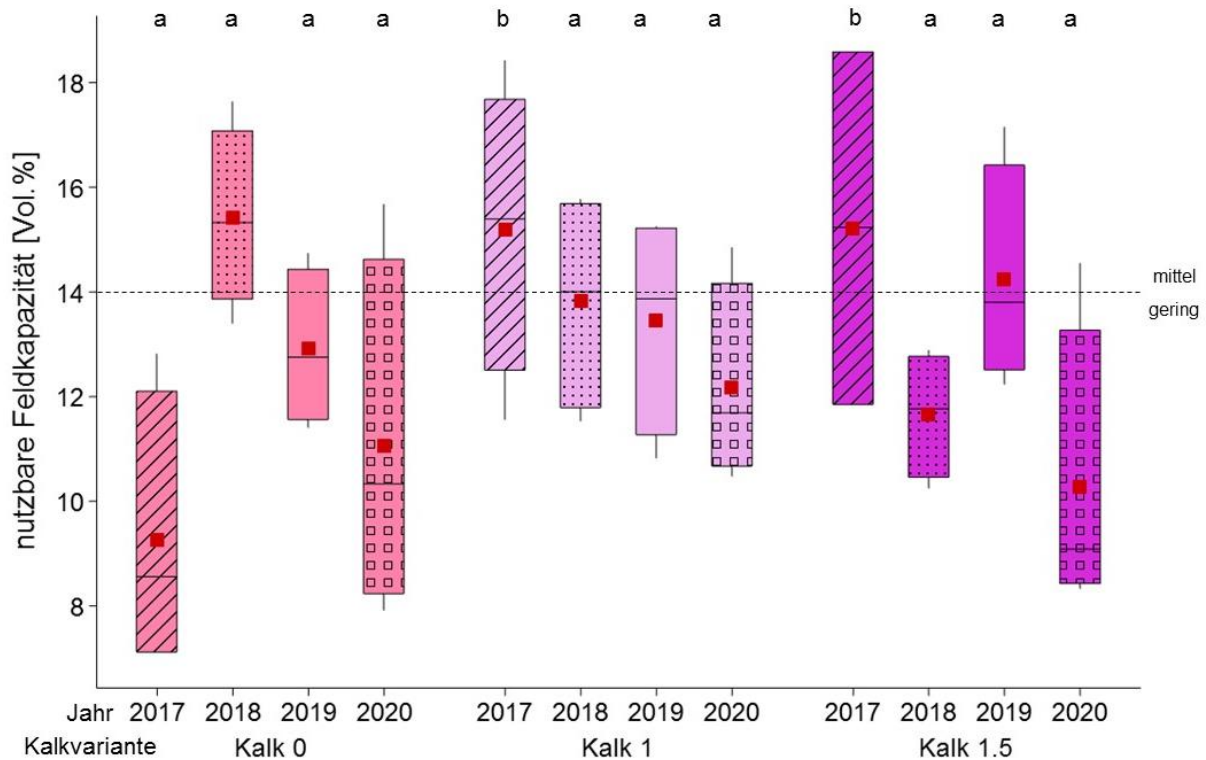


Abbildung 53: Nutzbare Feldkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg (n = 8) für die Jahre 2017-2020. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Der Totwassergehalt (TW) im Oberboden des Standortes Neubrandenburg verringert sich signifikant auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr (2017) (Abbildung 54). Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „mittel“ einzuordnen. In den darauffolgenden Untersuchungsjahren (2018 – 2020) sind kaum Unterschiede der TW-Gehalte zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen zu erkennen. Auch hier befinden sich die TW-Gehalte nach Ad-hoc-AG Boden (2005) im „mittleren“ Bereich (2018 und 2019) und im „sehr hohen“ Bereich (2020).

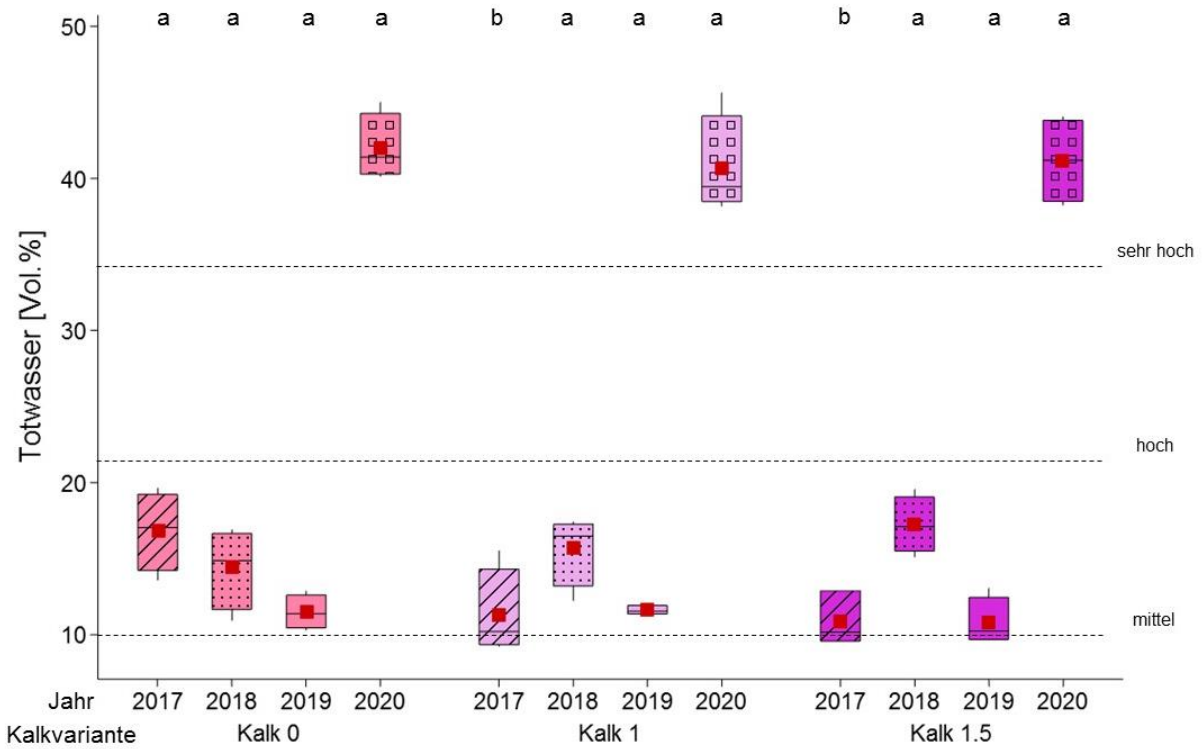


Abbildung 54: Totwassergehalte [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg in den Jahren 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.6.2 Scherparameter und Vorbelastungswerte

Die Kohäsion (c) steigt im ersten Untersuchungsjahr 2017 (nicht signifikant) auf der Kalkvariante Kalk 1 und Kalk 1.5 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 am Standort Neubrandenburg (Tabelle 21). Gleichzeitig sinkt der Winkel der Inneren Reibung (φ) (nicht signifikant) auf den Parzellen von Kalk 1 und bleibt unverändert auf den Parzellen von Kalk 1.5 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Auch im Jahr 2018 steigt die c auf den gekalkten Parzellen mit abnehmendem φ im Vergleich zur Kalk 0 Variante. In den darauffolgenden Jahren zeigt sich, dass c signifikant (2020, Kalk 1) sinkt mit nahezu unverändertem φ im Vergleich zu Kalk 0.

Tabelle 21: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 (n = 2). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk-variante | c [kPa] | φ [°] |
|------|---------------|---------|---------------|
| 2017 | Kalk 0 | 11 | 39 |
| | Kalk 1 | 24 | 31 |
| | Kalk 1.5 | 13 | 39 |
| 2018 | Kalk 0 | 19 | 37 |
| | Kalk 1 | 22 | 34 |
| | Kalk 1.5 | 23 | 35 |
| 2019 | Kalk 0 | 17 | 34 |
| | Kalk 1 | 13 | 38 |
| | Kalk 1.5 | 15 | 34 |
| 2020 | Kalk 0 | 33 | 33 |
| | Kalk 1 | 19* | 32 |
| | Kalk 1.5 | 23 | 34 |

Der maximale Scherwiderstand, gemessen als Funktion der Normalspannung, war im Oberboden des Standortes Neubrandenburg in der Kalk 1.5 Variante im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr 2017 höher (Abbildung 55). Nachdem sich 2018 (12 Monate nach der Kalkung) die maximalen Scherwiderstände nicht unterscheiden, sind 2019 (24 Monate nach der Kalkung) die Scherwiderstände auf den gekalkten Parzellen deutlich höher. 2020 (37 Monate nach der Kalkung) liegen die maximalen

Scherwiderstände auf allen Varianten unter 200 kPa und damit am niedrigsten im Vergleich zu den Jahren davor.

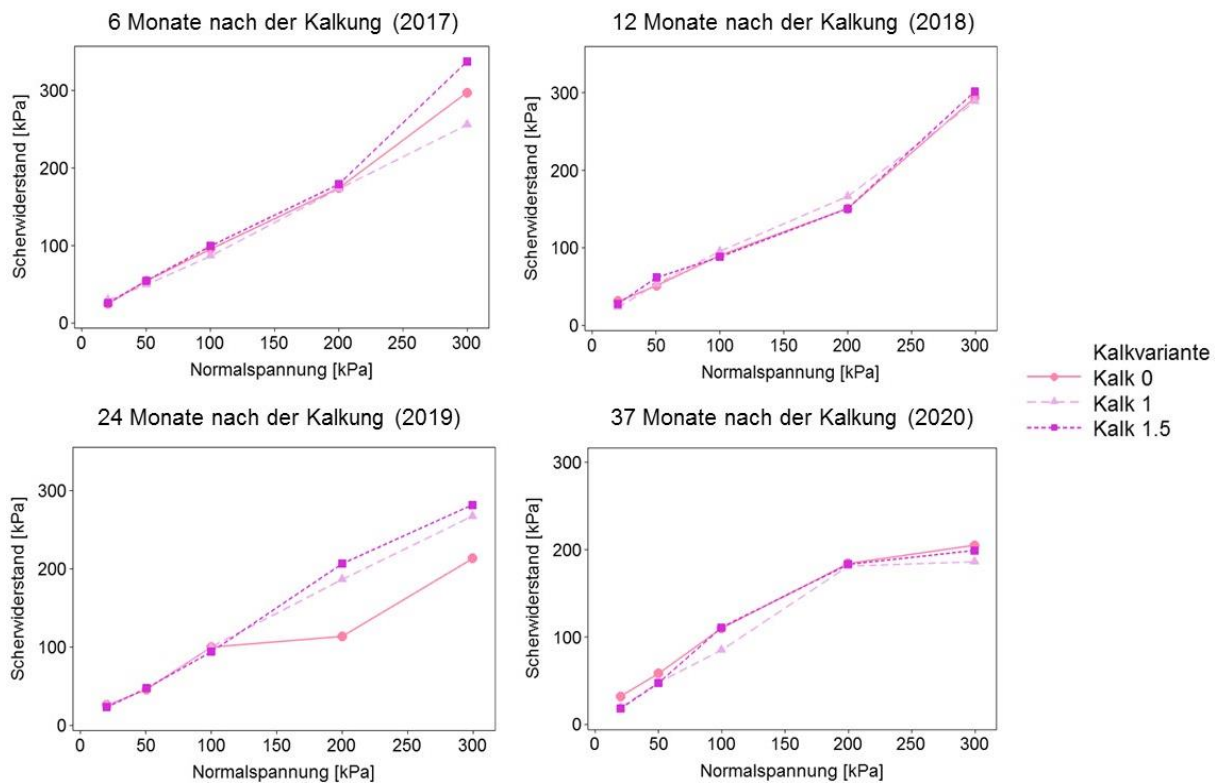


Abbildung 55: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Neubrandenburg für die Jahre 2017-2020 (n = 4).

Es sind keine signifikanten Unterschiede der Vorbelastungswerte auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort Neubrandenburg in den Jahren 2017 bis 2019 zu erkennen (Abbildung 56). Die Vorbelastung sinkt auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante von 2017 bis 2019. Alle (Mittel-)Werte sind laut DVWK (1997) als gering einzustufen.

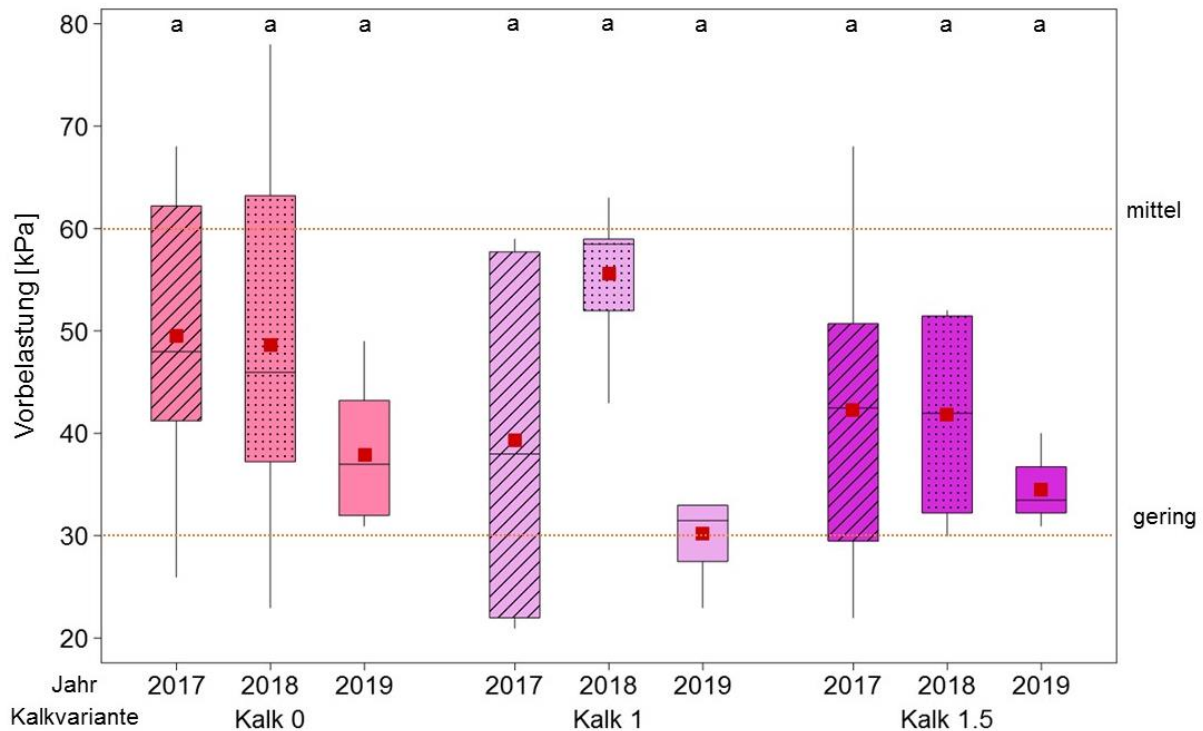


Abbildung 56: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.6.3 Zugspannung

Am Feldstandort Neubrandenburg wurden für die luftgetrockneten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) signifikanten Unterschiede der Zugspannung (Y) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr 2017 (6 Monate nach der Kalkung) festgestellt (Abbildung 57). In den darauffolgenden Jahren (2018 und 2019) zeigt sich, dass Y auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu den Kalk 0 Parzellen tendenziell etwas niedriger ist.

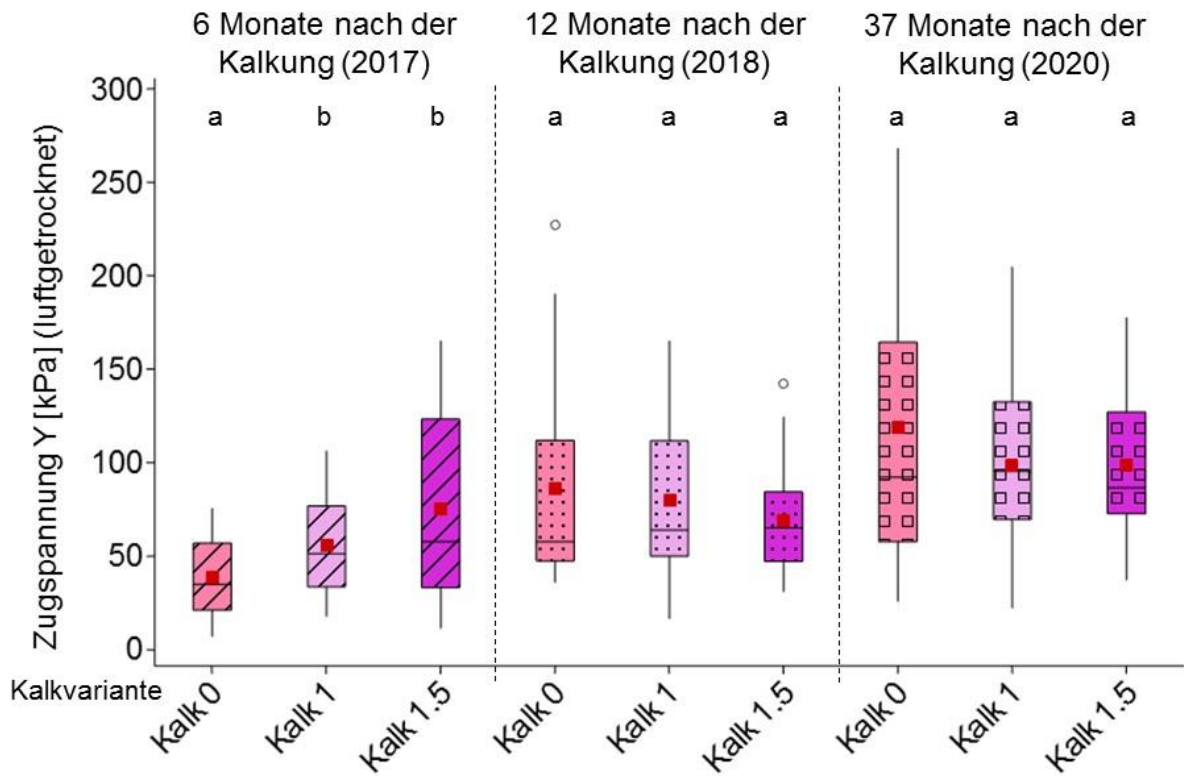


Abbildung 57: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2017, 2018 und 2020) aus dem Oberboden des Standortes Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 20$). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Am Untersuchungsstandort Neubrandenburg zeigen sich keine signifikanten Unterschiede für die Zugspannung (Y) der auf $\psi_m = -30$ kPa entwässerten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) in den Untersuchungsjahren 2019 und 2020 auf den gekalkten Varianten (Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) (Abbildung 58). Die Kalk 1 Variante weist im Jahr 2020 signifikant geringerer Y als die Kontrollvariante Kalk 0 auf.

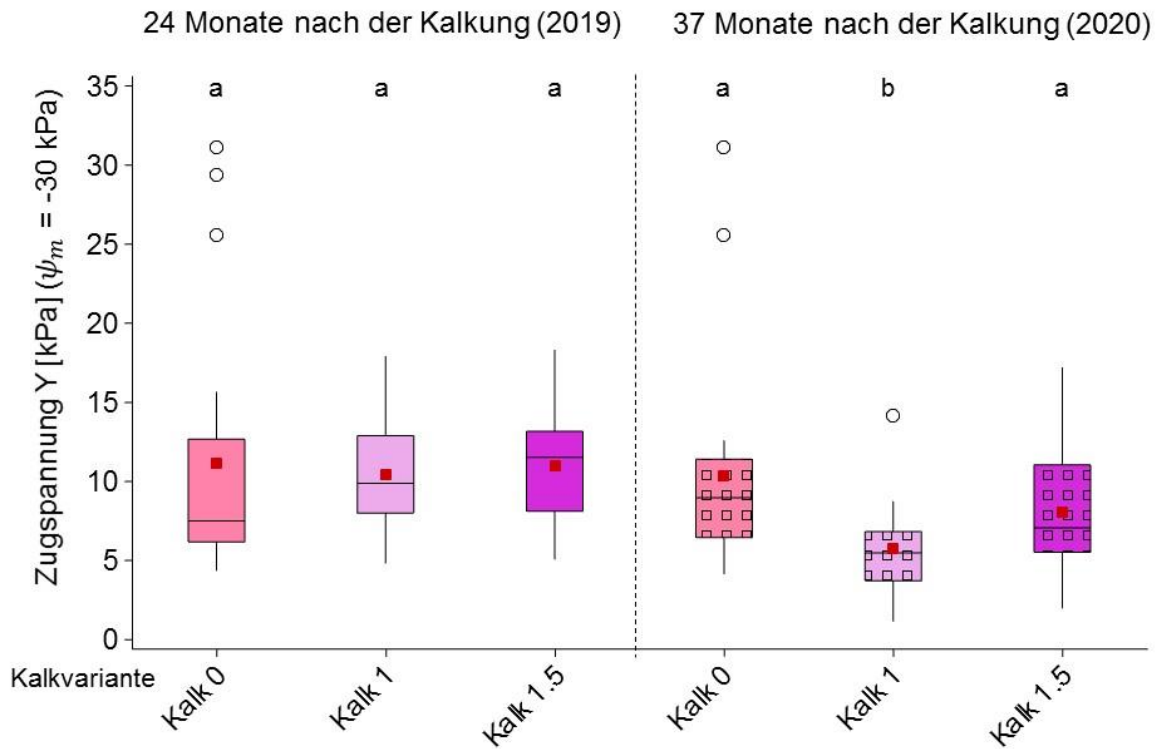


Abbildung 58: Zugspannung Y [kPa] auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\emptyset \sim 16$ mm) (2019 - 2020) aus dem Oberboden des Standortes Neubrandenburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.7 Magdeburg

3.7.1 Kationenaustauschkapazität und pH

Am Standort Magdeburg nimmt der Anteil austauschbar gebundener Ca^{2+} -Kationen in den Parzellen der Kalk 1 und vor allem der Kalk 1.5 Variante im Vergleich zur Kalk 0 Variante zu (Tabelle 22). Erkennbar wird, dass durch die Kalkung auch die anderen austauschbaren Kationen und die KAK_{eff} beeinflusst werden. Besonders der Mg^{2+} Gehalt sinkt auf der gekalkten Variante (Kalk 1) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) in den Untersuchungsjahren 2017-2020. Auch die Anteile an K^+ steigen auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 in allen Untersuchungsjahren.

Die Kalkzugabe erhöht auf allen untersuchten Parzellen die pH-Werte (Tabelle 22). In Magdeburg liegt der nach VDLUFA (2000a) empfohlene pH Wert zwischen 6,4 und 7,2. Die pH-Werte auf den Kalk 0 Parzellen sind 6,1 (2017), 6,4 (2018), 6,4 (2019) und 6,1 (2020). Der angestrebte Zielbereich konnte auf allen gekalkten Parzellen erreicht werden. Die auf den Kalk 1 Parzellen gemessenen Werte liegen bei 7,1 (2017), 6,7 (2018), 6,7 (2019) und 6,5 (2020). Die pH-Werte liegen auf den Kalk 1.5 Parzellen bei 7,1 (2017), 6,7 (2018), 6,8 (2019) und 6,6 (2020).

Tabelle 22: Austauschbare Kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ und Al^{3+} [$\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$], welche insgesamt die KAK_{eff} [$\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$] ergeben und der pH Wert [CaCl_2] der Varianten: Kalk 0, Kalk 1 und Kalk 1.5 angeben. Proben aus dem Oberboden [0-30 cm] des Standortes Magdeburg für die Jahre 2017-2020 ($n = 2$).

| Jahr | Kalk-variante | K^+ | Na^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} [$\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$] | H^+ | Al^{3+} | KAK_{eff} | pH [CaCl_2] |
|------|---------------|--------------|---------------|------------------|--|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 4,8 | 3,6 | 13,5 | 158,2 | 0,3 | - | 180 | 6,1 |
| | Kalk 1 | 5,3 | 3,9 | 13,0 | 188,0 | - | - | 210 | 7,1 |
| | Kalk 1.5 | 5,5 | 4,1 | 13,5 | 197,0 | - | - | 220 | 7,1 |
| 2018 | Kalk 0 | 3,3 | 2,3 | 116,4 | 165,9 | - | - | 288 | 6,4 |
| | Kalk 1 | 3,7 | 2,3 | 98,3 | 163,5 | - | - | 268 | 6,7 |
| | Kalk 1.5 | 3,6 | 2,8 | 117,1 | 175,4 | - | - | 299 | 6,7 |
| 2019 | Kalk 0 | 3,6 | 2,1 | 15,5 | 170,3 | 0,6 | 0,1 | 192 | 6,4 |
| | Kalk 1 | 3,9 | 1,9 | 14,1 | 167,0 | - | - | 187 | 6,7 |
| | Kalk 1.5 | 3,9 | 2,0 | 15,2 | 179,0 | - | - | 200 | 6,8 |
| 2020 | Kalk 0 | 3,1 | 1,8 | 2,1 | 169,6 | - | - | 177 | 6,1 |
| | Kalk 1 | 3,2 | 1,4 | 1,5 | 162,6 | - | - | 169 | 6,5 |
| | Kalk 1.5 | 3,4 | 1,9 | 2,1 | 188,6 | - | - | 196 | 6,6 |

3.7.2 Leitfähigkeiten, Lagerungsdichten und Wasserretentionsparameter

Im ersten Untersuchungsjahr 2017 steigen die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f) in den gekalkten Parzellen signifikant an im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort in Magdeburg (Abbildung 59). Die k_f (Mittel-)Werte steigen nach der Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) „gering“ (Kalk 0) auf „sehr hoch“ (Kalk 1 und Kalk 1.5). Auch Im Jahr 2018 ist die k_f signifikant höher auf den Kalk 1 Parzelle im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Die k_f der Kalk 1.5 Variante steigen (nicht signifikant) an im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0. Die k_f (Mittel-)Werte liegen laut Ad-hoc-AG Boden (2005) bei „sehr gering“ auf Kalk 0 und Kalk 1.5 (2018) und steigen auf „gering“ in den Kalk 1 Parzellen (2018). Im Untersuchungsjahr 2019 steigen (nicht signifikant) die k_f -Werte dann auf den gekalkten Varianten von „sehr gering“ (Kalk 0) auf „gering“ (Kalk 1) und „mittel“ (Kalk 1.5). Im Jahr 2020 sind auf den gekalkten Varianten keine signifikanten k_f Werte im Vergleich zu Kalk 0 zu erkennen.

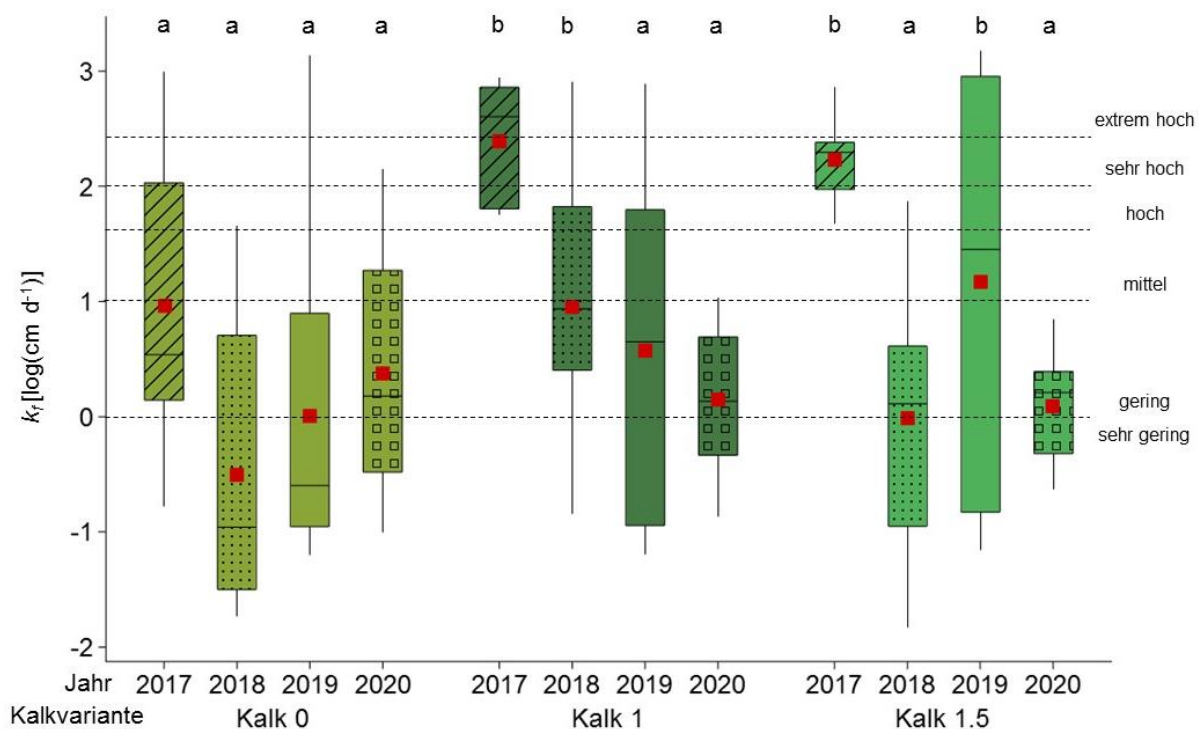


Abbildung 59: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [cm d^{-1}] sowie die Einstufungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) des Oberbodens am Standort Magdeburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) ($n = 12$). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Im ersten Untersuchungsjahr (2017) und damit 6 Monate nach der Kalkung liegt die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) in der gekalkten Varianten (Kalk 1.5) bis zu einem pF von 1,8 deutlich über jener der Kalk 0 am Standort Magdeburg (Abbildung 60). Danach fällt die k_u stark ab und zeigt in den gemessenen Bereichen ähnliche Verläufe für beide Varianten.

Ähnliche Verläufe der k_u von Kalk 1 und Kalk 1.5 sind auch im Untersuchungsjahr 2018 (12 Monate nach der Kalkung) zu erkennen. Diese liegen im gesamten gemessenen und modellierten Bereich über dem k_u -Verlauf der Kalk 0 Variante. Die k_u von Kalk 1 liegt über der von Kalk 1.5. Ab einem pF 1,8 sind die Verläufe von Kalk 1 und Kalk 1.5 identisch.

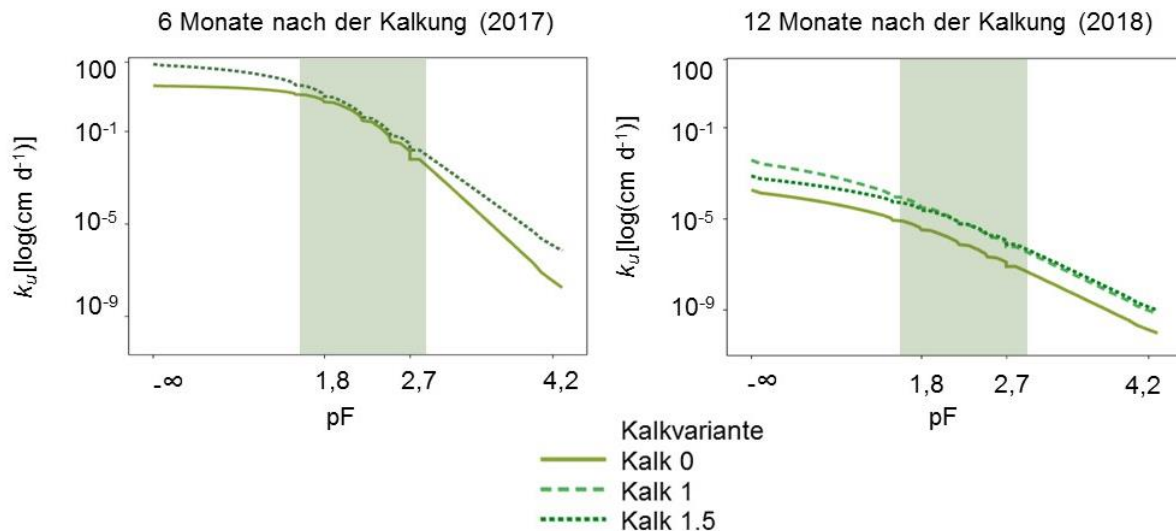


Abbildung 60: Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten (k_u) [$\log(\text{cm d}^{-1})$] in Abhängigkeit vom pF-Wert des Oberbodens am Standort Magdeburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA $\times 1,5$), in den Untersuchungsjahren 2017-2018. Die grüne Fläche markiert den Bereich der gemessenen k_u -Daten ($n = 4$).

Am Standort Magdeburg sind (signifikante) Unterschiede der Lagerungsdichten ρ_B , des Gesamtporenvolumens (GPV) und der Luftleitfähigkeit (k_i) auf den unterschiedlichen Kalkvarianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) zu erkennen (Tabelle 23). Es zeigt sich, dass ρ_B auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen signifikant geringer ist als auf den Kalk 0 Parzellen im ersten Untersuchungsjahr 2017. Die Werte sinken nach Ad-hoc-AG Boden (2005) von „mittel“ (Kalk 0) auf „gering“ (Kalk 1 und Kalk 1.5). In den Untersuchungsjahren 2018-2019 steigt die ρ_B leicht (Kalk 1) im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Die Einstufung liegt hier bei „mittel“ auf allen Parzellen im Jahr 2018 und 2019. Das GPV steigt im ersten Untersuchungsjahr (2017) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Varianten signifikant an im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0). Die Werte steigen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) von „mittel“ (Kalk 0) auf „hoch“ (Kalk 1 und Kalk 1.5). In den darauffolgenden Jahren (2018 und 2019) bleibt das GPV auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0) unverändert. Die Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „mittel“ einzustufen. Die Luftleitfähigkeit (k_i) des Oberbodens am Standort Magdeburg wurde bei $\psi_m = -6$ kPa gemessen und zeigt leichte Schwankungen über die Jahre. Im ersten Untersuchungsjahr 2017 steigt die k_i signifikant auf den gekalkten Parzellen im Vergleich zu

den Kontrollparzellen. Die Werte sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „gering“ (Kalk 0) und „mittel“ (Kalk 1 und Kalk 1.5) einzustufen. Im zweiten Untersuchungsjahr (2018) liegen die Werte im „sehr geringen“ Bereich auf allen Varianten. 2019 zeigt sich, dass die k_i auf den ungekalkten Parzellen (Kalk 0) im Vergleich zu Kalk 1.5 am höchsten sind. Die Werte für k_i auf Kalk 1 liegen 2019 über denen der Kalk 0 Variante und sind nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als „mittel“ auf Kalk 0 und Kalk 1 und „gering“ auf Kalk 1.5 einzustufen.

Tabelle 23: Lagerungsdichte ρ_B in g cm^{-3} und Gesamtporenvolumen (GPV) in Vol.% und Luftleitfähigkeit (k_i) bei $\psi_m = -6 \text{ kPa}$ in cm d^{-1} sowie die jeweilige Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg für die Jahre 2017-2019 (n = 8). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk-variante | Lagerungsdichte (ρ_B) [g cm^{-3}] | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | GPV Vol.% | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) | k_i bei $\psi_m = -6 \text{ kPa}$ cm d^{-1} | Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) |
|------|---------------|--|--|--------------|--|---|--|
| 2017 | Kalk 0 | 1,46 | mittel | 45 | mittel | 89 | gering |
| | Kalk 1 | 1,25* | gering | 53* | hoch | 179* | mittel |
| | Kalk 1.5 | 1,28* | gering | 51* | hoch | 150 | mittel |
| 2018 | Kalk 0 | 1,53 | mittel | 42 | mittel | 30 | sehr gering |
| | Kalk 1 | 1,56 | mittel | 41 | mittel | 20 | sehr gering |
| | Kalk 1.5 | 1,55 | mittel | 41 | mittel | 42 | sehr gering |
| 2019 | Kalk 0 | 1,42 | mittel | 46 | mittel | 112 | mittel |
| | Kalk 1 | 1,45 | mittel | 45 | mittel | 177 | mittel |
| | Kalk 1.5 | 1,41 | mittel | 46 | mittel | 61 | gering |

Die Luftkapazität (LK) steigt signifikant im Oberboden der gekalkten Parzellen (Kalk 1) im Vergleich zur Kontrolle (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr 2017 am Standort Magdeburg (Abbildung 61). Auch die Werte für die LK auf den Kalk 1.5 Parzellen steigen (nicht signifikant) im Vergleich zur Kontrolle. Die Werte der LK sind als „mittel“ (Kalk 0) und „hoch“ (Kalk 1 und Kalk 1.5) nach Ad-hoc-AG Boden (2005) einzustufen. Die gekalkten Varianten zeigen keine Veränderung zu Kalk 0 in den Jahren 2018 („gering“) und 2019 („mittel“).

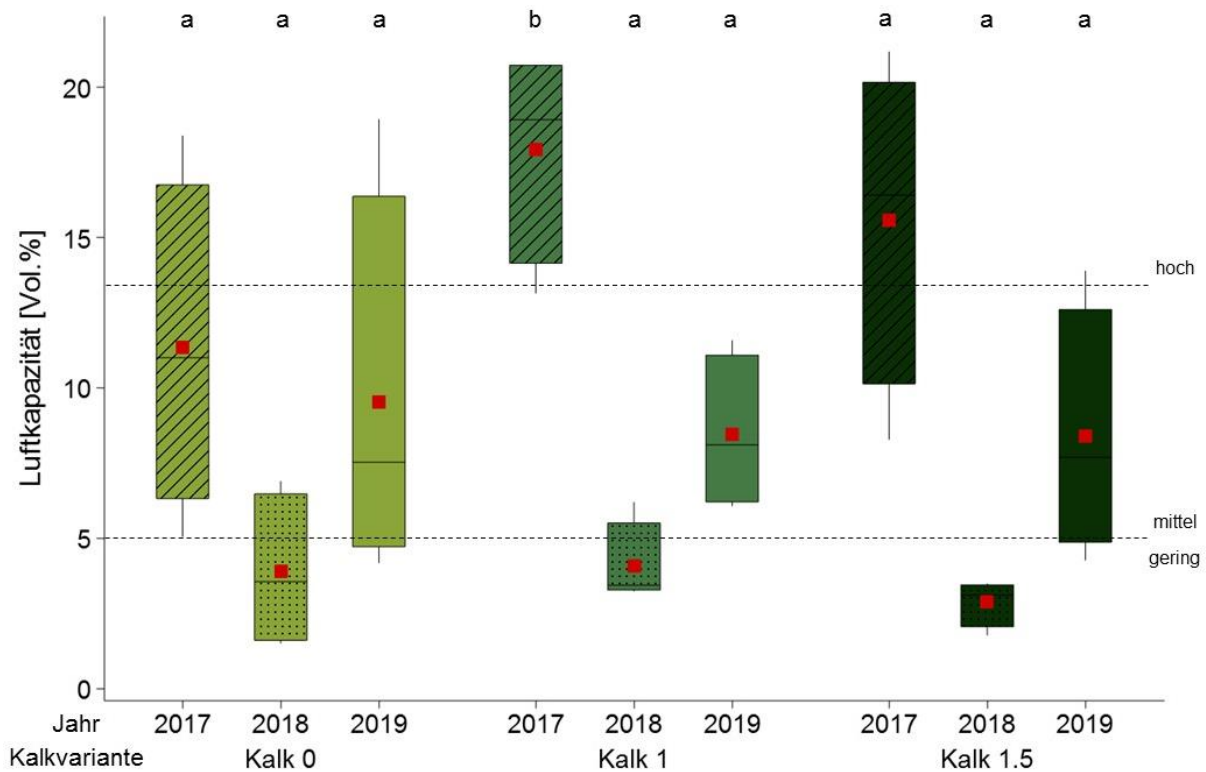


Abbildung 61: Luftkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg für die Jahre 2017-2019 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) steigt im ersten Untersuchungsjahr (2017) auf den Kalk 1 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 signifikant an (Abbildung 62). Auch die Werte für die nFK auf den Kalk 1.5 Parzellen steigen (nicht signifikant) im Vergleich zur Kontrolle. Die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) ändert sich damit von „sehr gering“ zu „gering“. Im darauffolgenden Jahr (2018) sind die Werte der nFK auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1) signifikant höher im Vergleich zu den Kalk 0 Parzellen. Die eingestufteten Werte sind auf allen Parzellen als „sehr gering“ einzustufen. 2019 sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Alle Werte der nFK liegen im „geringen“ Bereich.

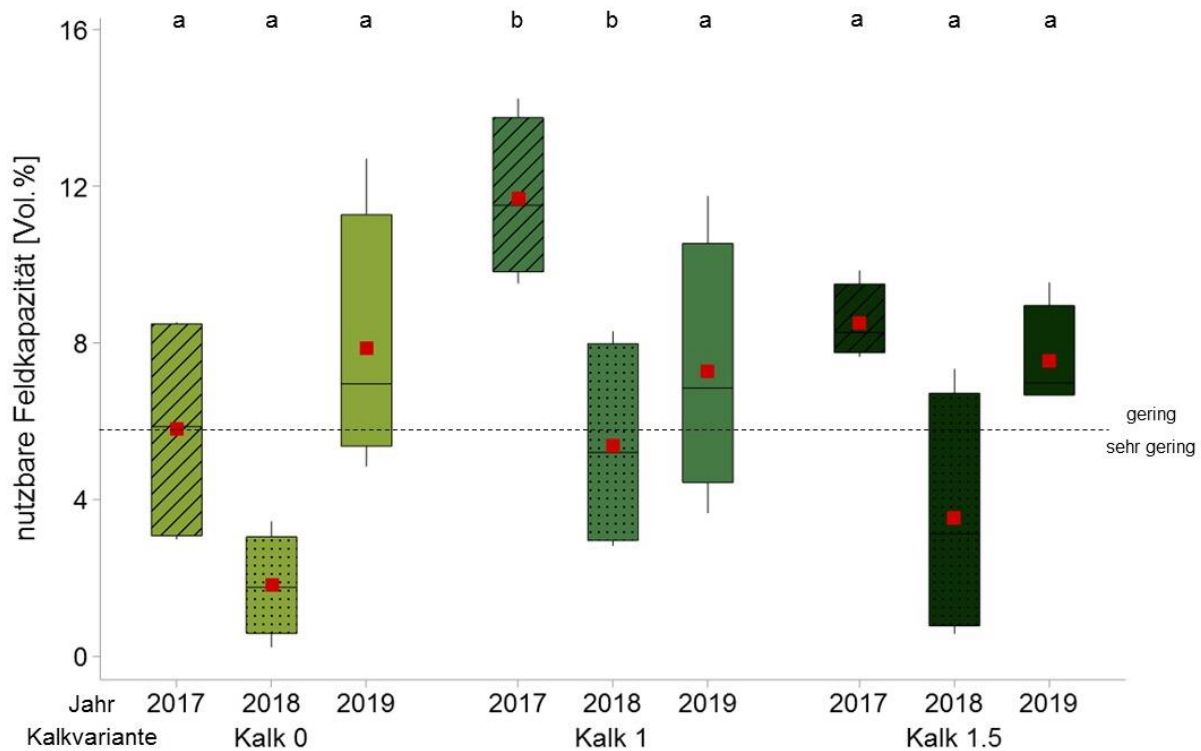


Abbildung 62: Nutzbare Feldkapazität [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg (n = 8) für die Jahre 2017-2019. Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

Der Totwassergehalt (TW) im Oberboden des Standortes Magdeburg verringert sich signifikant auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1) im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) im ersten Untersuchungsjahr (2017) (Abbildung 63). Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „hoch“ einzuordnen. Auch 2018 scheint der TW Anteil auf den gekalkten Parzellen geringer (nicht signifikant) zu sein als auf den ungekalkten Parzellen (Kalk 0). Die Werte sind laut Ad-hoc-AG Boden (2005) als „sehr hoch“ (Kalk 0 und Kalk 1.5) und „hoch“ (Kalk 1) einzuordnen. Im Jahr 2019 sind kaum Unterschiede der TW-Gehalte zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen zu erkennen. Auch hier befinden sich die TW-Gehalte nach Ad-hoc-AG Boden (2005) im „hohem“ Bereich.

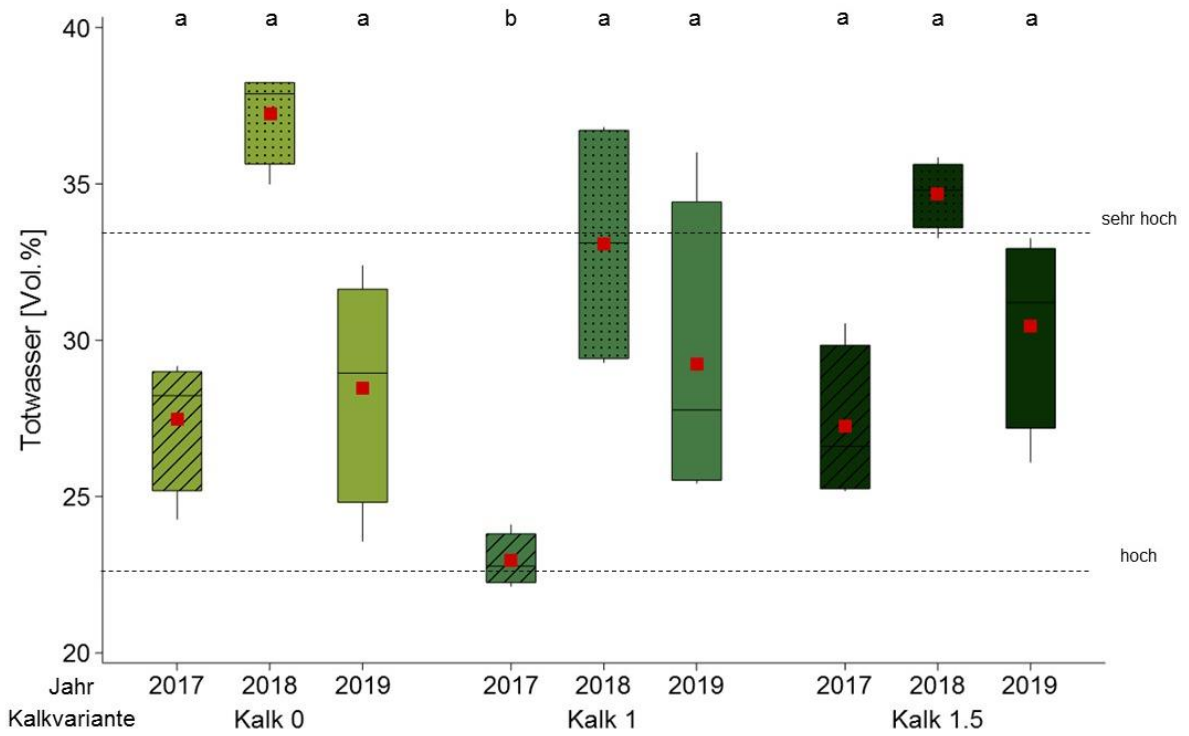


Abbildung 63: Totwassergehalte [Vol. %] sowie die Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg in den Jahren 2017-2020 (n = 8). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.7.3 Scherparameter und Vorbelastungswerte

Die Kohäsion (c) sinkt im ersten Untersuchungsjahr 2017 (nicht signifikant) auf der Kalkvariante Kalk 1 im Vergleich zur Kontrollvariante Kalk 0 am Standort Magdeburg (Tabelle 24). Auf den Kalk 1.5 Parzellen zeigt c keine Veränderungen. Gleichzeitig gibt es keine Veränderungen des Winkels der Inneren Reibung (φ). Im Jahr 2018 steigt die c auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1) mit abnehmendem φ im Vergleich zur Kalk 0 Variante. Im Gegensatz dazu sinkt c auf den Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 mit abnehmendem φ . In dem darauffolgenden Jahr (2019) zeigt sich, dass c nicht signifikant abnimmt auf den gekalkten Parzellen mit steigendem φ im Vergleich zu Kalk 0. Im Jahr 2020 steigt die c auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1) mit abnehmendem φ im Vergleich zur Kalk 0 Variante. Im Gegensatz dazu sinkt c auf den Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu Kalk 0 mit unverändertem φ .

Tabelle 24: Kohäsion (c) in kPa und Winkel der Inneren Reibung (φ) in ° (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg für die Jahre 2017-2020 ($n = 2$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt. Die Sternchen zeigen die signifikanten Unterschiede zur Kontrolle an ($p < 0,05$).

| Jahr | Kalk- variante | c [kPa] | φ [°] |
|------|-------------------|--------------|------------------|
| 2017 | Kalk 0 | 16 | 34 |
| | Kalk 1 | 11 | 33 |
| | Kalk 1.5 | 16 | 34 |
| 2018 | Kalk 0 | 24 | 35 |
| | Kalk 1 | 32 | 32 |
| | Kalk 1.5 | 19 | 33 |
| 2019 | Kalk 0 | 40 | 26 |
| | Kalk 1 | 35 | 32 |
| | Kalk 1.5 | 38 | 28 |
| 2020 | Kalk 0 | 25 | 34 |
| | Kalk 1 | 30 | 28 |
| | Kalk 1.5 | 23 | 34 |

Der maximale Scherwiderstand, gemessen als Funktion der Normalspannung, war im Oberboden des Standortes Magdeburg, auf den Kalk 0 Parzellen im Vergleich zu den gekalkten Parzellen im ersten Untersuchungsjahr 2017 höher (bis 200 kPa) (Abbildung 64). Nachdem 2018 (12 Monate nach der Kalkung) sich die maximalen Scherwiderstände ähnlich verhalten wie 2017 – bei einer Auflast von 300 kPa liegt die Kalk 1.5 Variante höher als Kalk 1 und Kalk 0. 2019 (23 Monate nach der Kalkung) sind die Scherwiderstände auf allen Parzellen deutlich geringer als in den Vorjahren. Die Scherwiderstände der Kalk 1 und Kalk 1.5 Variante liegen über denen von Kalk 0. 2020 (37 Monate nach der Kalkung) liegen die Scherwiderstände von Kalk 0 dann wieder höher bis 200 kPa und bei einer Auflast von 300 kPa liegt der Scherwiderstand von Kalk 1.5 höher als die Scherwiderstände von Kalk 0 und Kalk 1.

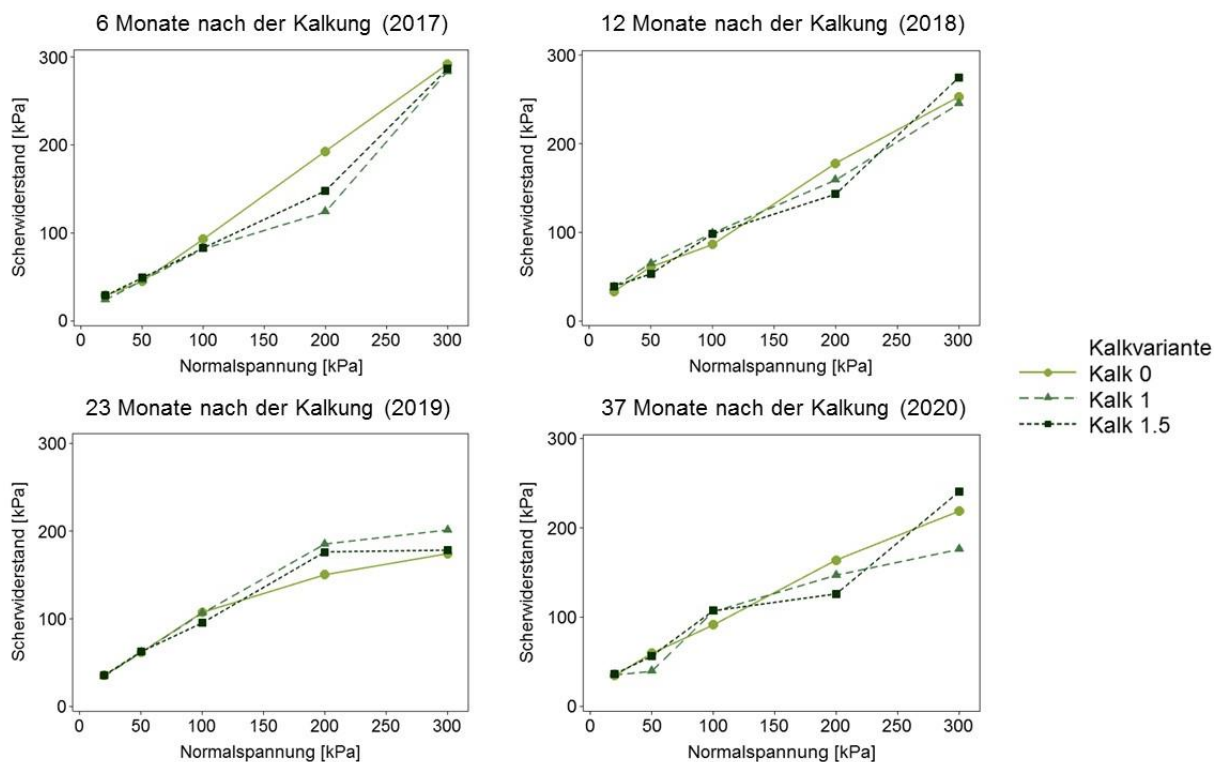


Abbildung 64: Maximaler Scherwiderstand [kPa] in Abhängigkeit von der Normalspannung (20, 50, 100, 200 und 300 kPa) aus dem Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) am Standort Magdeburg für die Jahre 2017-2020 (n = 4).

Es sind keine signifikanten Unterschiede der Vorbelastungswerte auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1 und Kalk 1.5) im Vergleich zu den ungekalkten Kontrollparzellen (Kalk 0) am Standort Magdeburg in den Jahren 2017 bis 2019 zu erkennen (Abbildung 65). Die Vorbelastung steigt auf allen Parzellen im Jahresvergleich. Die Vorbelastungswerte der gekalkten Parzellen liegen leicht unter denen der Kontrollvariante von 2017 bis 2019. Alle (Mittel-)Werte sind laut DVWK (1997) als „sehr gering“ (2017 und Kalk 1.5, 2018) und „gering“ einzustufen.

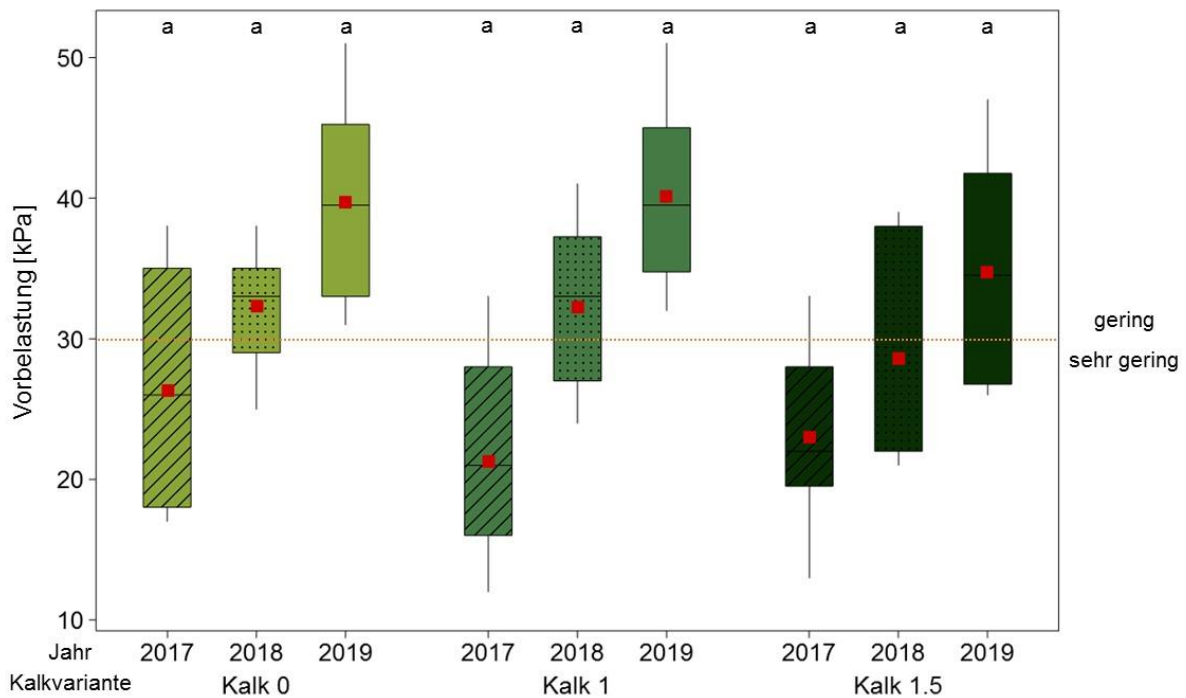


Abbildung 65: Vorbelastungswerte [kPa] (entwässert $\psi_m = -6$ kPa) des Oberbodens am Standort Magdeburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 8) in den Jahren 2017-2019, die gestrichelte rote Linie zeigt die Einstufung nach DVWK (1997). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle ($p < 0,05$).

3.7.4 Zugspannung

Am Standort Magdeburg wurden für die luftgetrockneten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) keine signifikanten Unterschiede der Zugspannung (Y) auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Kontrollparzellen (Kalk 0) festgestellt (Abbildung 66). Dennoch zeigt sich, dass Y auf den gekalkten Parzellen (Kalk 1.5), 12 Monate nach der Kalkung, höher ist als die Y auf den Kontrollparzellen (Kalk 0). 30 Monate nach der Kalkung (2019) wurde die Y für die auf $\psi_m = -30$ kPa entwässerten Aggregate ($\varnothing \sim 16$ mm) gemessen. Die gekalkten Varianten (Kalk 1 und Kalk 1.5) zeigen keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zur Kontrollvariante (Kalk 0).

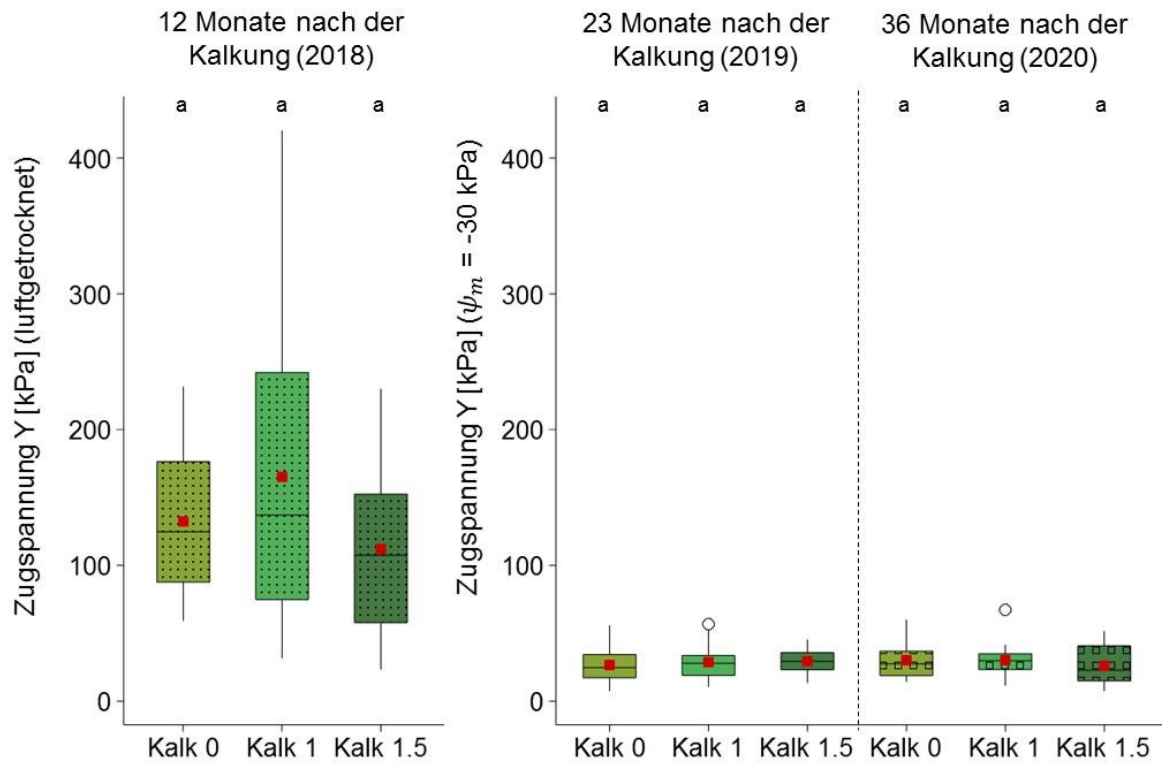


Abbildung 66: Zugspannung Y [kPa] von luftgetrockneten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2018) und von auf $\psi_m = -30$ kPa vorentwässerten Aggregaten ($\varnothing \sim 16$ mm) (2019 und 2020) aus dem Oberboden des Standortes Magdeburg für die Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) (n = 20). Die Vierecke markieren den Mittelwert. b (a) zeigt den (nicht) signifikanten Unterschied zur Kontrolle (p < 0,05).

4. Diskussion

In der Landwirtschaft ist die Kalkung eine weitverbreitete Praxis, und obwohl die positiven Einflüsse der Kalkung auf Veränderungen der Bodenstruktur, die Verbesserung der Aggregatstabilität und Porosität bekannt sind, werden diese Veränderungen der physikalische Bodenparameter nicht in den aktuellen Empfehlungen nach VDLUFA (2000a) für eine Kalkausbringung berücksichtigt. Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit war deshalb, die strukturellen Effekte nach einer Kalkausbringung zu dokumentieren und zu belegen, dass diese in zukünftigen Empfehlungen eine wichtige Rolle spielen sollten. In diesem Zusammenhang sollen in diesem Kapitel die Ergebnisse von den sieben Untersuchungsstandorten diskutiert und bewertet werden.

4.1 Die Effekte einer Kalkung auf chemische und physikalische Bodeneigenschaften

Die durchgeführte Kalkung erhöhte den Boden-pH-Wert an allen Feldversuchsstandorten. Die vom VDLUFA (2000a) vorgeschlagenen Ziel-pH-Werte wurden jedoch nicht auf allen Parzellen erreicht. Insbesondere an den Standorten Hergarten und Struckum reichte die ausgebrachte Kalkmenge nicht aus, um den empfohlenen pH-Bereich zu erreichen, da die maximalen jährlichen Kalkausbringungsmengen in Nordrhein-Westfalen und in Schleswig-Holstein begrenzt sind, und die zum Erreichen des Ziel pH-Wertes mit nur einer Kalkung erforderlichen Mengen diese Grenzwerte überschritten hätten. An einigen anderen Untersuchungsstandorten sank der pH-Wert in beiden Kalkvarianten im Laufe der Untersuchungsjahre wieder ab, die pH-Werte blieben jedoch im empfohlenen Bereich (außer bei der Kalk 1.5 Variante in Puch, hier sank der pH-Wert, 20 Monate nach der Kalkung, auf 6,1 und damit unter den empfohlenen pH-Bereich (6,3-7,0)). Die Ursachen für dieses leichte Absinken des pH-Wertes im Laufe der Zeit können eine hohe Basen-Neutralisationskapazität der Böden, sowie natürliche und anthropogene Säureeinträge (Niederschläge, Bodenatmung, Düngung) sein.

Die Bodenstruktur ist der Schlüssel für eine nachhaltige landwirtschaftliche Produktion und gibt Auskunft über die Bodengesundheit und -fruchtbarkeit. Es ist vielfach bewiesen, dass eine Ausbringung und Einarbeitung von Kalk die Acidität im Boden reduziert und die Verfügbarkeit von essentiellen Pflanzennährstoffen (N, S, Fe, Mg) verbessert (Auler et al. 2017; Paradelo et al. 2015). Die Auswirkungen einer Kalkung auf strukturelle Veränderungen sind im Gegensatz dazu bisher kaum berücksichtigt. Die hier vorliegenden Ergebnisse weisen einen deutlichen Einfluss von Kalkausbringungen auf bodenphysikalische Parameter und Funktionen in Böden mit unterschiedlicher Textur nach. Die zugrundeliegenden Prozesse werden im Folgenden diskutiert.

Bei der Ausbringung von Kalk und dessen sofortiger Einarbeitung in den Boden wird zunächst Ca^{2+} freigesetzt. Die Folge sind Tonflockung und Agglomeration im Boden. Ca^{2+} wirkt hierbei als Brücke zwischen organischen Komponenten und (Ton)mineralpartikeln. Im Laufe der Zeit können zudem sekundäre Karbonate entstehen, die Brücken zwischen den Mineralpartikeln aufbauen und eine Zementierung hervorrufen. Eine Verschiebung der Porengrößenverteilung und Änderung der Porenfunktionen im Boden ist die Folge. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Kirkham et al. (2007), die den Anstieg von k_f nach einer Kalkung durch eine Verschiebung der Porengrößenverteilung zu mehr Mittel- und Grobporen erklärten, konnten wir 6-12 Monate nach der Kalkung eine Verschiebung der Porengrößenverteilung von Feinporen zu den weiten Grobporen, und 24 Monate nach der Kalkung eine Verschiebung zu einem höheren Anteil enger Grobporen auf den gekalkten Parzellen u.a. am Untersuchungsstandort in Neubrandenburg feststellen. In den engen Grobporen ist ein Teil des pflanzenverfügbaren Wassers gespeichert und somit kann die Kalkung an diesem Standort die Wasserversorgung und damit das Pflanzenwachstum verbessern. In Barlt ist ein höherer Anteil an weiten Grobporen und ein geringerer Anteil an Mittelporen feststellbar, was zu einer Erhöhung des Gas- und Wasserflusses im Boden führt. Auch die verbesserte Belüftung des Bodens führt auf ackerbaulich genutzten Standorten zu einer Steigerung des Pflanzenwachstums. Es sollte allerdings darauf geachtet werden, dass die weiten Grobporen nicht überwiegen, da das Wasser sonst zu schnell abfließt und nicht mehr pflanzenverfügbar ist.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass Kalkapplikationen die durch mechanische Beanspruchung hervorgerufene Degradation der Bodenstruktur nicht verringerten, was aus einer insgesamt gleichbleibenden Beeinträchtigung der Wasserretentionsparameter sowie hohen Schwankungen der Vorbelastungswerte abgeleitet werden kann. Die Kompressibilität des Bodens hängt neben der Textur, dem Aggregierungsgrad, dem Gehalt an organischer Substanz und der Vorentwässerung auch von der räumlichen Anordnung der Aggregate und damit der Morphologie des Porenraumes ab, die durch die Intensität der Bodenbearbeitung bestimmt wird (Wiermann et al. 2000). Abbau und Umverteilung positiver Porenwasserdrücke sind eine Funktion der hydraulischen Leitfähigkeit, der Porenkontinuität sowie des hydraulischen Gradienten, und stehen in engem Zusammenhang mit der Textur und (Mikro-)Aggregation der Böden: Bei kurzen Fließwegen und hoher Leitfähigkeit können Porenwasserdrücke schneller abgebaut werden. Auf den Untersuchungsstandorten dieser Arbeit führte die Kalkung an den Oberflächen der Bodenkolloide zur Substitution anderer austauschbarer Kationen durch Ca^{2+} . Infolgedessen wird der Porenwasserdruck während der Belastung in den Böden reduziert, was die Knetung und Homogenisierung des Bodens vermindert.

Die konventionelle Bodenbearbeitung, die zur Einarbeitung des Kalkes durchgeführt und jährlich zur Saatbettbereitung wiederholt wurde, hatte an den in dieser Arbeit einbezogenen Untersuchungsstandorten einen erheblichen Einfluss auf die Reduzierung der Lagerungsdichte: Das freigesetzte Kalzium sowie die entstandenen Sekundärkarbonate stabilisieren das gelockerte Bodengefüge, indem sie die Flockung und Aggregation der Partikel fördern, was sich u.a. positiv auf die Durchwurzelbarkeit des Bodens auswirkt (Anikwe et al. 2016), die Sauerstoffverfügbarkeit erhöht (Uteau-Puschmann 2013) sowie zu einer Verbesserung der gesättigten Wasserleitfähigkeit und damit auch der Wasserverfügbarkeit führt (Kirkham et al. 2007; Horn und Smucker 2005). Eine gesteigerte gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) auf den gekalkten Parzellen konnte auf den Untersuchungsstandorten mit einem höherem Tongehalt (Struckum, Barlt, Schrecksbach, Hergarten) im zweiten Untersuchungsjahr, auf den sandigeren Standorten (Puch, Neubrandenburg) bereits im ersten Untersuchungsjahr festgestellt werden. Die jährliche Bodenbearbeitung (mit dem Pflug) hat offensichtlich einen erheblichen Einfluss auf diesen Parameter. Es ist auf einigen Standorten deutlich zu erkennen, dass, nach erfolgter Bodenbearbeitung, im zweiten und/oder dritten und auch vierten Untersuchungsjahr keine Unterschiede der k_f zwischen gekalkten und ungekalkten Parzellen mehr festgestellt werden kann. Auch im Hinblick auf die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) ist an den Standorten Magdeburg, Hergarten, Barlt, Neubrandenburg und Puch vor allem in den ersten beiden Untersuchungsjahren (6 bis 24 Monate nach der Kalkung) ein eindeutiger Effekt der Kalkung zu erkennen. Die in den gekalkten Varianten im trockeneren Bereich (bei höheren pF-Werten) erhöhte k_u bedeutet eine verbesserte Wassernachlieferung in die Rhizosphäre (Dörner 2005). Besonders auf ackerbaulich genutzten Flächen ist dies ein wichtiger Faktor im Hinblick auf Ernteerträge. Des Weiteren konnte durch die Kalkung auf den Untersuchungsstandorten eine signifikante Verschiebung der Porengrößenverteilung von Feinporen (hier dargestellt als Totwasser(TW)-Anteil) und weiter Grobporen (Luftkapazität) in Richtung enger Grobporen und Mittelporen, in denen das pflanzenverfügbare Wasser (nutzbare Feldkapazität, nFK) gespeichert wird, in den ersten zwei Untersuchungsjahren (2017-2018) erreicht werden. Vergleichbare Verschiebungen der Porengrößenverteilung aufgrund einer Kalkzugabe ermittelten auch Haynes und Naidu (1998), welche diese mit der Flockung von Tonpartikeln begründeten. Gleichzeitig wurde eine leichte Abnahme des Feinporenanteils auf den Kalk 1 und Kalk 1.5 Parzellen im Vergleich zu den Kalk 0 Parzellen an den Standorten Hergarten, Struckum, Puch, Neubrandenburg und Magdeburg erzielt. An den Standorten Schrecksbach und Barlt führt die Kalkung zu einer Abnahme von engen Grobporen und Mittelporen, sowie zu einem erhöhten Anteil an weiten Grobporen (Luftkapazität), und somit kann auf eine verbesserte Belüftung auf diesen Untersuchungsstandorten geschlossen werden. Anhand der bei Feldkapazität ($\psi_m = -6$ kPa) gemessenen Luftleitfähigkeit (k_l) konnte auf den Standorten während der ersten beiden

Untersuchungsjahre eine Verbesserung der Porenkontinuität und Funktionalität in den gekalkten Varianten nachgewiesen werden (Horn et al. 2014; Dörner 2005).

Der Wasserfluss und die Verfügbarkeit im Boden sind zunehmend durch die Erwärmung der Atmosphäre beeinflusst. Diese Veränderungen führen zu einer zunehmenden Anzahl von Starkregenereignissen unter feuchten Klimabedingungen, während die Gesamtzahl der Regenereignisse tendenziell abnimmt (Olsson et al. 2020). Folglich wird eine stabile Bodenstruktur mit kontinuierlichen Poren in Zukunft noch wichtiger sein, um Wasser aus Starkregenereignissen abzuleiten (LAWA 2017). Extreme Klimabedingungen beeinflussen direkt den Nährstoffkreislauf und das pflanzenverfügbare Wasser und damit indirekt auch den Boden-pH-Wert (Reth et al. 2005). Die Feldversuche dieser Arbeit waren in den vier Versuchsjahren teilweise extremen Wetterbedingungen ausgesetzt. Hohe Niederschläge im Herbst des ersten Versuchsjahres (2017) führten vermutlich zu einer steigenden H^+ -Konzentration in der Bodenlösung und einer verstärkten Auswaschung basischer Kationen, was zum einen die Bodenversauerung und zum anderen einen Kollaps der Struktur (Hartmann et al. 1998) sowie die Erosion (Finch et al. 2014) begünstigen kann.

Um einen genaueren Einblick in die mechanischen Auswirkungen der oben diskutierten chemischen und physikalischen Prozesse zu erhalten, werden sowohl Vorbelastungswerte, die Scherparameter der strukturierten Böden und auch die Zugspannung einzelner Aggregate hinzugezogen. Die Ergebnisse zur Erfassung der Strukturfunktionalität geben Auskunft über die Reformierung der Aggregate und deren Reaktion auf mechanische Belastung. Die Eigenstabilität des Bodens ist anhand der Vorbelastungswerte an den Untersuchungsstandorten für alle (Kalk)varianten als „sehr gering“ bis „mittel“ einzustufen (DVWK 1995). Diese geringen Werte sind in Pflughorizonten von Ackerböden erwartungsgemäß, da es durch das Pflügen zu einer Lockerung und Störung des Bodengefüges kommt.

Auch die Auswirkungen der Kalkapplikation auf die Scherparameter Kohäsion (c) und Winkel der Inneren Reibung (ϕ), sowie auf den maximalen Scherwiderstand unter verschiedenen Auflasten werden in dieser Arbeit berücksichtigt. Die Scherparameter ϕ und c des Bodens werden wesentlich durch Interaktionen zwischen Aggregaten bestimmt (Horn und Dexter 1989; Kay und Dexter 1992). Fattet et al. (2011) zeigten die Beziehung zwischen Bodenkohäsion und Aggregatstabilität und kamen zu dem Schluss, dass die Aggregation Bindungsmechanismen beinhaltet, die jenen ähneln, die die Strukturen zwischen den Aggregaten stärken. Eine erhöhte Konzentration mehrwertiger Kationen (z. B. Ca^{2+}) in der Bodenlösung fördert die Bildung kationischer Brücken, die Tonpartikel untereinander sowie Tonpartikel und organische Bodensubstanz miteinander verbinden (Bronick und Lal 2005; Muneer und Oades 1989), und fördert dadurch die Bildung und Stabilisierung von Aggregaten,

erhöht c und verbessert folglich die Bodenfestigkeit (Hartge et al. 2014), so dass der Boden bei der Bearbeitung induzierten Spannungen besser standhalten kann. Dies ist einer der wesentlichen Mechanismen in der bodenstrukturverbessernden Wirkung der Kalkung. Die Schergerade stellt hierbei die Umhüllende aller möglichen Mohr'schen Spannungskreise dar (Hartge et al. 2014).

Die Kalkapplikation in unseren Untersuchungen erhöhte, in Übereinstimmung mit Ergebnissen von Bohne (1983), an Standorten mit unterschiedlicher Textur die c , oftmals einhergehend mit einem abnehmendem ϕ . Vor allem an den ton- und schluffreichen Standorten Struckum, Barlt und Magdeburg bewirkt die Kalkung erst im dritten und vierten Untersuchungsjahr eine Erhöhung der Scherwiderstände. Veränderungen sind allerdings schon früher anhand der c zu erkennen (Abbildung 67) – insbesondere am tonreichsten Standort Barlt sind steigende c Werte nach der Kalkzugabe zu sehen. Auch der schluffreiche Standort Schrecksbach und der sandige Standort Hergarten (Kalk 1) zeigen steigende c mit der Kalkgabe bereits zur ersten Probenahme im Jahr 2017. Am sandigeren Standort Neubrandenburg kann die erhöhte c nur in den ersten beiden Untersuchungsjahren gehalten werden. Eine weitere Kalkzugabe könnte diesen Effekt der c verstärken und somit zu einer langfristigeren Erhöhung der Scherwiderstände beitragen.

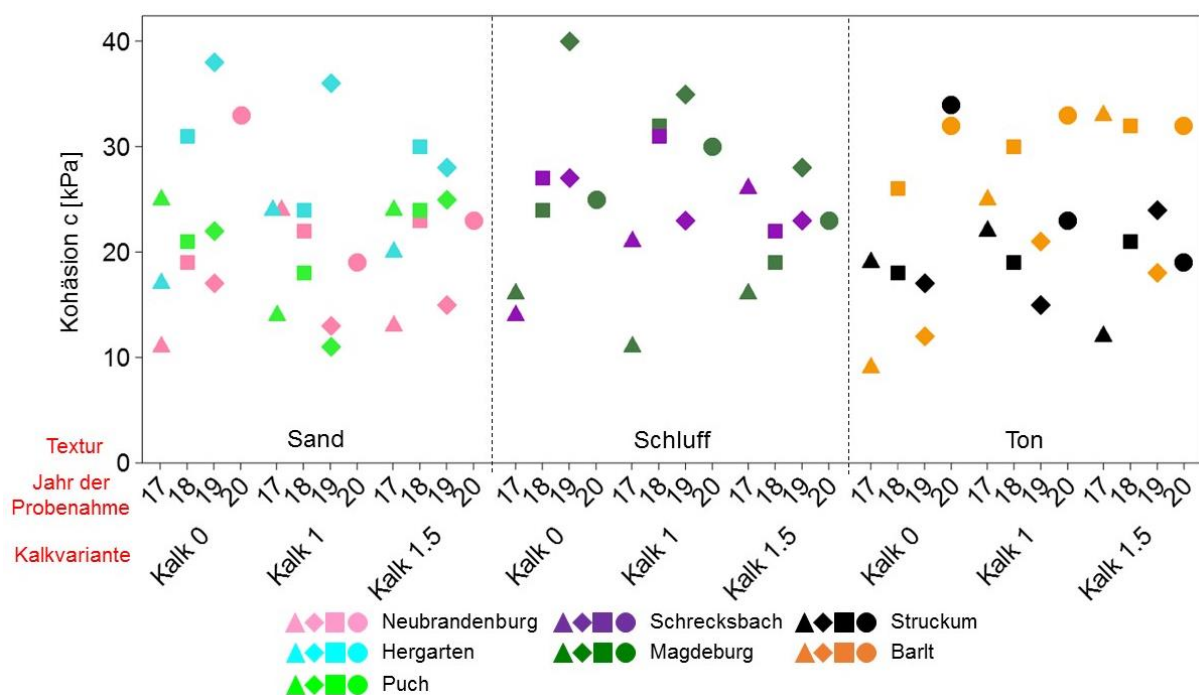


Abbildung 67: Kohäsion (c) in kPa (Vorentwässerung: $\psi_m = -6$ kPa) im Oberboden der Kalkvarianten: Kalk 0 (= Kontrolle), Kalk 1 (Empfehlung nach VDLUFA) und Kalk 1.5 (Empfehlung nach VDLUFA x 1,5) zusammenfassend dargestellt an allen Standorten für die Jahre 2017-2020 ($n = 2$). Die Werte sind als arithmetische Mittelwerte dargestellt.

Wie bereits erwähnt, verstärken polyvalente Kationen, wie Ca^{2+} , die Aggregation und die Ausbildung der Bodenstruktur, wodurch sich die Porengrößenverteilung und die Porenkontinuität verändern. Die Ausflockung und Agglomeration von (Ton-)Partikeln, wie sie durch die Kalkung induziert wird, bewirkt eine Erhöhung der Intraaggregat- und Interaggregatporosität. Tonpartikel können sich durch die Zugabe von Ca^{2+} stärker annähern und bilden Flocken. Dieser Effekt wurde bereits von Beese et al. (1979) festgestellt, die in einem Lössboden durch Kalkzugabe eine Verstärkung der neu gebildeten Aggregate fanden; bei der folgenden Bodenbearbeitung wurden diese Aggregate jedoch wieder zerstört. Allerdings ist diese Homogenisierung weniger vollständig, da die Kalkapplikation zu einer höheren Aggregatstabilität führt (Aye et al. 2016) und damit die Ausbildung einer stabileren Struktur fördert, die dazu beiträgt, eine vollständige Homogenisierung und die Bildung von großen Schollen durch Verschmieren und Kneten beim Pflügen zu vermeiden.

Die Zugfestigkeit der Aggregate (Y) wurde bestimmt, um den Einfluss der Kalkung auf die mechanische Aggregatstabilität zu messen. Y ist ein empfindlicher Indikator für die Stabilität der Bodenstruktur (Munkholm und Kay 2002) und für den Widerstand gegen mechanische Bodenverformung in den schwächsten Bruchzonen (Braunack et al. 1979). Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass der Tongehalt und die Kalkung in Abhängigkeit von der Zeit einen erheblichen Einfluss auf Y in Ackerböden haben. Y stieg generell mit abnehmendem Matrixpotential (lufttrocken $> \psi_m = -30$ kPa) und mit zunehmendem Tongehalt (Untersuchungsstandorte Schrecksbach, Barlt, Magdeburg). Der Effekt der Kalkung auf Y ist bei steigendem Tongehalt größer, aber auch an den sandigeren Standorten z.B. Neubrandenburg ist, insbesondere im ersten Jahr, Y auf den gekalkten Parzellen erhöht. In Puch (stark lehmiger Sand) ist Y auf der Kalk 1.5 Variante im zweiten Untersuchungsjahr (2018) erhöht. Die Ergebnisse der Erosionsfestigkeit am Standort Barlt zeigen, dass die meisten Aggregate in den äußeren Schichten eine geringere Dichte aufweisen als im Kern, ähnlich den Ergebnissen von Urbanek et al. (2014). Die Dichte ist in den Aggregaten der gekalkten Parzellen am geringsten. Dies ist eine Folge der Umlagerung der Partikel in einer porösen "Kartenhausstruktur" während des Flockungs- und Agglomerationsprozesses nach der Kalkapplikation, was auch zu einer verbesserten Zugänglichkeit der Poren innerhalb der Aggregate führt (Park und Smucker 2005b; Smucker et al. 2007). In solch weniger dichten Aggregaten mit einem größeren Porensystem laufen Austauschprozesse schneller ab (Becher 1991). Dies erhöht die Diffusion von mobilen organischen Bestandteilen in das Aggregatinnere (Park et al. 2007), wo die Bildung von organo-mineralischen Komplexen gefördert und die Aggregatstabilität über längere Zeiträume weiter erhöht wird (Smucker et al. 2007). Bei trocknenden Aggregaten erzeugt die Spannung in den zurückweichenden Wassermensken genügend Kraft, um erhöhte Interpartikelkontakte zu erzeugen, was zu einer sehr hohen

Festigkeit der luftgetrockneten Aggregaten führt (Dexter 1988). Zusammenfassend kann die mechanische Stabilisierung der Aggregate nicht nur durch eine Zugabe von Kalk verstärkt werden, sondern auch durch Meniskenkräfte (Fazekas 2005), Tonmineralogie (Barzegar et al. 1995), mikrobielle Aktivität (Tisdall und Oades 1982) und organische Bodensubstanz (Zhang 1994) (Zaher et al. 2005), wobei insbesondere hydrophoben C-H-Gruppen eine stabilisierende Wirkung für die Bodenstruktur zugeschrieben wird (Abiven et al. 2009), da die organische Beschichtung die Benetzung von Aggregaten reduzieren kann. Entsprechend weist der Untersuchungsstandort Barlt, mit dem höchsten Gehalt an organischer Substanz, hohe Y auf.

4.2 Beeinflussung der Ergebnisse durch die Bodenbearbeitung

Die Bodenbearbeitung wirkt den bodenstrukturbildenden Effekten der Kalkung entgegen. Die verbesserte Porenkontinuität, sichtbar in den Werten der (un)gesättigten Wasserleitfähigkeiten in den gekalkten Parzellen, wurde durch die Bodenbearbeitung weitestgehend zerstört. Trotzdem wird sichtbar, dass die Verringerung der Wasserretentionsparameter in den gekalkten Parzellen weniger stark ist als in den Kontrollparzellen, insbesondere in Böden mit einer tonigen Textur, was auf eine höhere Festigkeit der Bodenstruktur gegenüber mechanischer Beanspruchung hindeutet. Das Kneten und Homogenisieren bei der Pflugbearbeitung erhöht die Lagerungsdichte des Oberbodens und beeinflusst die Kohäsion, verbunden mit einem gleichzeitigen Verlust an Eigenstabilität, was durch den Winkel der inneren Reibung verdeutlicht wird. Eine besonders wichtige Rolle bei der Bindung der Aggregate bzw. Bodenpartikel untereinander haben die Meniskenkräfte, die je nach Beanspruchung stabilisierend oder destabilisierend wirken können. Die Form der Wassermensiken verändert sich von konkav zu einer konvexen Form. Scherbruch führt zur vollständigen Blockade ehemals verbundener Transportwege und hemmt damit Wasser- und Gasflüsse (Horn 2003). Dies hat zur Folge, dass bei einem nicht intakten Porensystem überschüssiges Porenwasser bei Belastung nicht entsprechend abgeführt werden kann, was zu einer Mobilisierung der Bodenpartikel und damit zu einer Destabilisierung der Struktur führt (Larson et al. 1989). Bodenaggregate werden durch mechanische Beanspruchung wie konventionelle Bodenbearbeitung empfindlich in ihren Funktionen gestört (Bronick und Lal 2005) und die Porosität und Porenkontinuität negativ beeinflusst (Dörner et al. 2012), wie es u.a. für den Untersuchungsstandort in Struckum gezeigt werden konnte.

Eine Lösung wären Bewirtschaftungsweisen wie die Direktsaat (in tropischen und subtropischen Böden bereits weit verbreitet) in Kombination mit einer Kalkung zur Erhöhung des pH-Wertes und zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz für Pflanzen (Briedis et al. 2012a; Briedis et al. 2012b; Caires et al. 2006; Joris et al. 2016; Vazquez et al. 2019). Nur wenige Untersuchungen haben sich in den letzten Jahren mit „alternativen“ Formen der Bodenbearbeitung in Kombination mit einer Kalkung in Mittel- und Nordeuropa unter feuchten

Klimabedingungen beschäftigt. Stenberg et al. (2000) stellten eine erhöhte Aggregatstabilität und eine verbesserte mikrobielle Aktivität nach Verringerung der Bodenbearbeitungstiefe und Kalkapplikation in einem schluffig-lehmigen Tonboden in Schweden fest. Die Landwirte stehen jedoch vor dem Problem, dass einerseits die Vermeidung einer Pflugbearbeitung erforderlich ist, um die Zeit zur Stärkung der Partikelbindung zu erhöhen (ohne Störung durch mechanische Belastung), während andererseits die Einarbeitung des Kalkes durch Pflügen hilfreich ist, um eine optimale Wirkung hinsichtlich der Verteilung des Kalks im Boden zu erzielen und die Wechselwirkungen der Kalkkomponenten mit den Partikeloberflächen zu unterstützen. Für zukünftige Anwendungsempfehlungen für die Kalkung ist daher die Einarbeitung des Kalkes direkt nach der Applikation ratsam (Caires et al. 2008; Joris et al. 2016), während die anschließende wiederholte Störung des sich entwickelnden Bodengefüges als schädigend für die Bodenfestigkeit bekannt ist (Peth et al. 2008) und daher reduziert werden sollte (z. B. konservierende Bodenbearbeitung).

Insgesamt konnte vor allem innerhalb der ersten zwei Untersuchungsjahre gezeigt werden, dass es durch die Kalkung möglich ist eine bodenartspezifische optimale Bodenstruktur zu erreichen. Diese zeigt sich insbesondere in den verbesserten Eigenschaften zur Wasserspeicherung und Wasserinfiltration. Auch die verbesserte Durchlüftung spricht für ein stabiles und kontinuierliches Porensystem auf den gekalkten Varianten. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen aber auch, dass die Auswirkungen der Kalkung auf die Stabilität der Bodenstruktur durch die jährliche Pflugbearbeitung überlagert werden. Es wird nicht ausreichen, sich auf bestehende Empfehlungen zu verlassen, sondern es sind angepasste Strategien in nachhaltigen Bewirtschaftungssystemen notwendig, um die Bodenfruchtbarkeit und damit die Ernteerträge unter unseren Klimabedingungen stabil zu halten.

5. Handlungsempfehlungen

Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich schließen, dass Kalkanwendungen auf Ackerland ein gut vernetztes Porensystem mit erhöhten hydraulischen- und Luftleitfähigkeiten aufgrund einer Verschiebung der Porengrößenverteilung von Feinporen zu Mittelporen erzeugt haben. Insbesondere die Standorte mit hohen Ton- und Schluffgehalten (z.B. Struckum, Barlt und Magdeburg) werden durch die Behandlung mit Kalk begünstigt, die dann durch Tonflockung und der Ausbildung einer typischen "Kartenhaus"-Struktur gekennzeichnet sind. Tonteilchen ziehen elektrostatisch positiv geladene Ionen wie Ca^{2+} an, diese bilden Brücken, welche die Teilchen zusammenhalten. Die Umlagerung, Vernetzung und Verbindung von Bodenteilchen verbessert die mechanische Stabilität von Bodenaggregaten, die Scherfestigkeit und die Stabilität des Porensystems.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit in Kombination mit der besprochenen Literatur können folgende Empfehlungen für zukünftige Kalkanwendungen gegeben werden:

- Eine generelle Empfehlung für Landwirte sollte beinhalten, dass Kalk bei geeigneten Witterungs- und Bodenbedingungen (die Bodenfeuchte bestimmt die Befahrbarkeit) ausgebracht werden muss (im Sinne einer nachhaltigen Bodenbewirtschaftung = „gute fachliche Praxis“) und dass der Kalk zeitnah in den Boden eingearbeitet werden sollte, um den Kontakt zwischen Kalk und Mineralpartikeln zu erhöhen. Insbesondere an den sandigen Standorten (Neubrandenburg, Puch) konnte aufgezeigt werden, dass es dadurch bereits in den ersten Monaten nach einer Kalkung zu einer Verschiebung der Porengrößenverteilung kommt.
- Die jährliche Bodenbearbeitung unterbricht den Prozess der Strukturentwicklung und kehrt ihn sogar teilweise um. Daher wird ein mehrjähriger Ansatz zur pfluglosen, reduzierenden Bodenbearbeitung nach der Kalkeinbringung empfohlen.
- Für Böden, bei denen eine Gesundungskalkung notwendig ist, sollten höhere Kalkungsraten als bisher von der VDLUFA (2000a) empfohlen, genutzt werden, um ein gut vernetztes Porensystem mit höherer Bodenfestigkeit zu erzeugen. Hierbei sollte es auch möglich sein, die Beschränkungen der einzelnen Bundesländer hinsichtlich der Höchstmengen bei der Kalkausbringung zu umgehen.
- Alternativ könnten wiederholte Kalkanwendungen in z.B. zwei aufeinanderfolgenden Jahren realisiert werden, mit anschließender pflugloser, reduzierender Bodenbearbeitung, um eine dauerhafte, heterogene und nachhaltige Wirkung im Boden zu erzielen (vor allem an den sandigeren Standorten notwendig) und eine erfolgreiche Ausbildung der Bodenstruktur nach einer Kalkung zu ermöglichen.

6. Öffentlichkeitsarbeit

Durchgeführte Tagungen und Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit:

- DHG Fachberatertagung, Mai 2018, Augsburg
- ISTRO 2018 Paris: Vortrag Tina Frank: The need for lime in dependence on clay content in arable crop production in Germany.
- DBG Tagung 2019 Bern: Vortrag Tina Frank: Optimierung der Struktur landwirtschaftlicher Böden mittels Kalkung zur Minderung von Stickstoffdüngungsverlusten.
- Publikation 2019: Frank, Tina; Zimmermann, Iris; Horn, Rainer (2019): The need for lime in dependence on clay content in arable crop production in Germany. In: Soil and Tillage Research 191, S. 11–17. DOI: 10.1016/j.still.2019.03.013.
- Publikation 2020: Frank, Tina; Zimmermann, Iris; Horn, Rainer (2020): Lime application in marshlands of Northern Germany—Influence of liming on the physicochemical and hydraulic properties of clayey soils. In: Soil and Tillage Research 204, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104730>
- Publikation 2021:
 - Frank, Tina; Zimmermann, Iris; Horn, Rainer (2021): Effect of CaCO₃ application on mechanical strength and hydraulic properties in arable soils, submitted to Soil Use and Management
 - Frank, Tina; Zimmermann, Iris; Horn, Rainer (2021): Impact of lime application on erosive strength and bulk density of aggregates, submitted to International Agrophysics
 - Optimization of the soil structure in arable crop production by means of lime (CaCO₃) application (Tina Frank, Kumulative Dissertation)

7. Literaturverzeichnis

Abiven, Samuel; Menasseri, Safya; Chenu, Claire (2009): The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. In: *Soil Biology and Biochemistry* 41 (1), S. 1–12. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.09.015.

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 103 Tabellen und 31 Listen. Unter Mitarbeit von Herbert Sponagel. 5., verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller).

Anikwe, M.A.N.; Eze, J. C.; Ibudialo, A. N. (2016): Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. In: *Soil and Tillage Research* 158, S. 32–38. DOI: 10.1016/j.still.2015.10.011.

Auler, A. C.; Pires, L. F.; dos Santos, J. A. B.; Caires, E. F.; Borges, J. A. R.; Giarola, N. F. B. (2017): Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a Dystrudept soil. In: *Soil use and management* 33 (1), S. 129–140. DOI: 10.1111/sum.12330.

Aye, Nang Seng; Sale, Peter W. G.; Tang, Caixian (2016): The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils. In: *Biol Fertil Soils* 52 (5), S. 697–709. DOI: 10.1007/s00374-016-1111-y.

Barzegar, A. R.; Oades, J. M.; Rengasamy, P.; Murray, R. S. (1995): Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. In: *Geoderma* 65, S. 93–108.

Becher, Hans H. (1991): Über die Aggregatdichte und deren mögliche Auswirkung auf den Bodenlösungstransport. In: *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 154 (1), S. 3–8. DOI: 10.1002/jpln.19911540103.

Beese, F.; Meyer, B.; Pollehn, J. (1979): Veränderung des Scher- und Kompressionsverhaltens von Ap-Horizont-Material aus Löß-Parabraunerden durch Kalkung. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 142 (2), S. 245–257. DOI: 10.1002/jpln.19791420212.

Beetham, Paul (2015): Enhancing the understanding of lime stabilisation processes. In: *Loughborough University Institutional Repository*, S. 1–232.

Bell, F. G. (1996): Lime stabilization of clay minerals and soils. In: *Engineering Geology* 42 (4), S. 223–237. DOI: 10.1016/0013-7952(96)00028-2.

Bohne, H. (1983): Mechanismen bei der Stabilisierung von Aggregaten aus Tonen mit Calciumoxid. Dissertation. Universität Hannover.

- Bolan, Nanthi S.; Adriano, Domy C.; Curtin, Denis (2015): Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. In: *Advances in Agronomy* 78, S. 215–272. DOI: 10.1016/S0065-2113(02)78006-1.
- Braunack, M.; Hewitt, J.; Dexter, A. R. (1979): Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. In: *Journal of Soil Science* 30 (4), S. 653–667. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1979.tb01015.x.
- Briedis, Clever; Moraes Sá, João Carlos de; Caires, Eduardo Fávero; Fátima Navarro, Jaqueline de; Inagaki, Thiago Massao; Boer, Adriane et al. (2012a): Changes in Organic Matter Pools and Increases in Carbon Sequestration in Response to Surface Liming in an Oxisol under Long-Term No-Till. In: *Soil Science Society of America Journal* 76 (1), S. 151. DOI: 10.2136/sssaj2011.0128.
- Briedis, Clever; Sá, João Carlos de Moraes; Caires, Eduardo Fávero; Navarro, Jaqueline de Fátima; Inagaki, Thiago Massao; Boer, Adriane et al. (2012b): Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. In: *Geoderma* 170, S. 80–88. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.10.011.
- Bronick, C. J.; Lal, R. (2005): Soil structure and management. A review. In: *Geoderma* 124 (1-2), S. 3–22. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.
- Caires, E. F.; Garbuio, F. J.; Churka, S.; Barth, G.; Correa, J.C.L. (2008): Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. In: *European Journal of Agronomy* 28 (1), S. 57–64. DOI: 10.1016/j.eja.2007.05.002.
- Caires, Eduardo Fávero; Corrêa, José Cristovão Leal; Churka, Susana; Barth, Gabriel; Garbuio, Fernando José (2006): Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. In: *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)* 63 (5), S. 502–509. DOI: 10.1590/S0103-90162006000500013.
- Casagrande, A. (1936): The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics, Harvard* 3, S. 60–64.
- Chan, K. Y.; Heenan, D. P. (1999): Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. In: *Soil Science Society of America Journal* 63 (6), S. 1841–1844. DOI: 10.2136/sssaj1999.6361841x.
- Dash, Sujit Kumar; Hussain, Monowar (2015): Influence of Lime on Shrinkage Behavior of Soils. In: *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (12), S. 4015041. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001301.

Deltedesco, E.; Bauer, L. M.; Unterfrauner, H. (2015): Effekt von Kalkungsmaßnahmen auf die Strukturstabilisierung und Mikrobiologie von landwirtschaftlichen Böden. In: *Mitt. der Österr. Bodenkundl. Ges.*, (82), S. 19–26. Online verfügbar unter http://www.bodenoekologie.com/wp-content/uploads/2015/07/%C3%96BG_2015_Effekt_Kalkungsmassnahmen_auf_Struktursta bilisierung_und_Mikrobiologie.pdf, zuletzt geprüft am 07.12.2017.

Dexter, A. R. (1988): Advances in characterization of soil structure. In: *Soil and Tillage Research* 11 (3-4), S. 199–238. DOI: 10.1016/0167-1987(88)90002-5.

Dexter, A. R.; Kroesbergen, B. (1985): Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* 31 (2), S. 139–147. DOI: 10.1016/0021-8634(85)90066-6.

DIN ISO 10693 (1997): Soil quality - Determination of carbonate content - Volumetric method.

DIN ISO 10694 (1995): Soil Quality–Determination of Organic and Total Carbon after Dry Combustion (elementary analysis).

DIN ISO 11260 (2018): Soil quality - Determination of effective cation exchange capacity and base saturation level using barium chloride solution.

DIN ISO 11277 (2002): Soil quality - Determination of particle size distribution in mineral soil material - Method by sieving and sedimentation.

DIN ISO 13878 (1998): Soil quality - Determination of total nitrogen content by dry combustion ("elemental analysis").

Dobermann, Achim R. (2005): Nitrogen Use Efficiency - State of the Art. In: *Agronomy & Horticulture -- Faculty Publications* (316).

Dörner, José (2005): Anisotropie von Bodenstrukturen und Porenfunktionen in Böden und deren Auswirkungen auf Transportprozesse im gesättigten und ungesättigten Zustand. Universität Kiel: Schriftenreihe.

Dörner, José; Dec, Dorota; Feest, Enrique; Vásquez, Nelson; Díaz, Mónica (2012): Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage. In: *Soil and Tillage Research* 125, S. 52–60. DOI: 10.1016/j.still.2012.05.019.

DVWK (1995): DVWK-Regel 129 Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung - Teil I: Ansprache der Böden. In: *ATV-DVWK - Deutsche Vereinigung f. Wasserwirtschaft Abwasser u. Abfall* (129), S. 1–42.

- DVWK (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil 2: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten.
- Fageria, N. K.; Baligar, V. C. (2005): Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. In: Bd. 88: Elsevier (Advances in Agronomy), S. 97–185.
- FAO; IFAD; UNICEF; WFP and WHO (2019): The State of Food Security and Nutrition in the World 2019. Safeguarding against economic slowdowns and downturns. In: *ROME, FAO*, S. 1–239. Online verfügbar unter https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjEhpTY7qPoAhXL_qQKHVK6AvAQFjABegQIAxAB&url=http%3A%2F%2Fwww.fao.org%2F3%2Fca5162en%2Fca5162en.pdf&usg=AOvVaw1Qgt5liEdcXle2-zlgXgFq.
- Fattet, M.; Ghestem, M.; Fu, Y.; Ma, W.; Foulonneau, M.; Nespoulous, J. et al. (2011): Effects of vegetation type on soil resistance to erosion. Relationship between aggregate stability and shear strength. In: *CATENA* 87 (1), S. 60–69. DOI: 10.1016/j.catena.2011.05.006.
- Fazekas, Orsolya (2005): Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat (Schriftenreihe, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 67).
- Finch, H. J. S.; Samuel, A. M.; Lane, G. P. F. (Hg.) (2014): Lockhart & Wiseman's crop husbandry including grassland. Ninth edition. Cambridge, England: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Number 227).
- Goulding, K. W. T. (2016): Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. In: *Soil use and management* 32 (3), S. 390–399. DOI: 10.1111/sum.12270.
- Haas, C. (2018): Mechanical and physico-chemical processes in Soils. Kiel: Schriftenreihe; Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (115).
- Hartge, Karl Heinrich (1993): Saturated hydraulic conductivity measurement at soil core samples and its evaluation. In: *Soil Technology* 6 (1), S. 115–121.
- Hartge, Karl Heinrich; Ellies, A. (1977): Mechanismen der Aggregatstabilisierung in einem Tonboden mittels Branntkalk. In: *Geoderma* 17 (1), S. 47–55. DOI: 10.1016/0016-7061(77)90004-0.
- Hartge, Karl Heinrich; Horn, Rainer (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. [Praxis, Messmethoden, Auswertung]. 4., vollst. überarb. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart.

- Hartge, Karl Heinrich; Horn, Rainer; Bachmann, Jörg; Peth, Stephan (2014): Einführung in die Bodenphysik. Mit 24 Tabellen. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Schweizerbart.
- Hartmann, A.; Gräsle, W.; Horn, R. (1998): Cation exchange processes in structured soils at various hydraulic properties. In: *Soil and Tillage Research* 47 (1-2), S. 67–72. DOI: 10.1016/S0167-1987(98)00074-9.
- Haynes, R. J.; Naidu, R. (1998): Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, S. 123–137. DOI: 10.1023/A:1009738307837.
- Helyar, W.; Porter, K. (1989): Soil acidification, its measurement and the processes involved. In: *Soil Acidity and Plant Growth*: Elsevier, S. 61–101.
- Holland, J. E.; Bennett, A. E.; Newton, A. C.; White, P. J.; McKenzie, B. M.; George, T. S. et al. (2018): Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK. A review. In: *The Science of the total environment* 610-611, S. 316–332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.020.
- Horn, R.; Dexter, A. R. (1989): Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. In: *Soil and Tillage Research* 13 (3), S. 253–266. DOI: 10.1016/0167-1987(89)90002-0.
- Horn, R.; Peng, X.; Fleige, H.; Dörner, J. (2014): Pore rigidity in structured soils—only a theoretical boundary condition for hydraulic properties? In: *Soil Science and Plant Nutrition* 60 (1), S. 3–14. DOI: 10.1080/00380768.2014.886159.
- Horn, R.; Smucker, A. (2005): Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. In: *Soil and Tillage Research* 82 (1), S. 5–14. DOI: 10.1016/j.still.2005.01.002.
- Horn, Rainer (2003): Stress–strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. In: *Geoderma* 116 (1-2), S. 77–88. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00095-8.
- Hoyt, P. B. (1981): Improvement in soil tilth and rape seed emergence by lime application on acid soils in the Peace River region. In: *Canadian Journal of Soil Science* 61 (1), S. 91–98. DOI: 10.4141/cjss81-010.
- Jacobs, Anna; Flessa, Heinz; Don, Axel; Heidkamp, Arne; Prietz, Roland; Dechow, René et al. (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig, Germany: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Report, 64). Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10419/189842>.

- Joris, Helio Antonio Wood; Caires, Eduardo Fávero; Scharr, Danilo Augusto; Bini, Angelo Rafael; Haliski, Adriano (2016): Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. In: *Soil and Tillage Research* 162, S. 68–77. DOI: 10.1016/j.still.2016.04.009.
- Kay, Bev D.; Dexter, A. R. (1992): The Influence of Dispersible Clay and Wetting/Drying Cycles on the Tensile Strength of a Red-Brown Earth. In: *Aust. J. Soil Res.* 30 (3), S. 297–310. DOI: 10.1071/SR9920297.
- Kerschberger, M. (2008): Kalk im Boden sichern. Pflanzenbau. In: *DLZ* (8), S. 46–49.
- Kézdi, Árpád; Rétháti, László (1988): Soil mechanics of earthworks, foundations and highway engineering. Amsterdam: Elsevier (Handbook of soil mechanics, / by Árpád Kézdi and László Rétháti ; Vol. 3).
- Kirkham, J. M.; Rowe, B. A.; Doyle, R. B. (2007): Persistent improvements in the structure and hydraulic conductivity of a Ferrosol due to liming. In: *Australian Journal of Soil Research* 45 (3), S. 218–223. DOI: 10.1071/SR06169.
- Krümmelbein, Julia; Horn, Rainer; Pagliai, Marcello (Hg.) (2013): Soil degradation. International Union of Soil Sciences. Reiskirchen: Catena Verlag GmbH (Advances in geoecology, 42).
- Kunhikrishnan, A.; Thangarajan, R.; Bolan, N. S.; Xu, Y.; Mandal, S.; Gleeson, D. B. et al. (2016): Functional Relationships of Soil Acidification, Liming, and Greenhouse Gas Flux. In: Bd. 139: Elsevier (Advances in Agronomy), S. 1–71.
- Larson, W. E.; Blake, G. R.; Allmaras, R. R.; Vorhees, W. B.; Gupta, S. (1989): Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils. In: *Series E: Applied Sciences - Vol. 172*. DOI: 10.1007/978-94-009-2421-5.
- Lausen, P. (2012): Kalkung wird oft vernachlässigt. Düngung auf Acker - und Grünlandflächen. In: *Bauernblatt*, S. 34–39.
- LAWA (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2017 (Kurztitel: LAWA Klimawandel-Bericht 2017). Unter Mitarbeit von Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Karlsruhe.
- Lfl Agrarökonomie, München (2020): Kalkdüngung zahlt sich aus. Lfl Agrarökonomie, München. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt.
- Lorenz, F.; Horn, D.; Müller, R.; Müller, T.; Münchhoff, K.; Pihl, U. et al. (2020): Hinweise zur Kalkdüngung. In: *DLG Merkblatt 1* (456), S. 1–28.

- Mallela, J.; Quintus, H. von; Smith, K. L. (2004): Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. In: *National Lime Association*.
- Maubec, N.; Deneele, D.; Ouvrard, G. (2017): Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material. In: *Applied Clay Science* 137, S. 107–114. DOI: 10.1016/j.clay.2016.11.033.
- McGill, Robert; Tukey, John W.; Larsen, Wayne A. (1978): Variations of Box Plots. In: *The American Statistician* 32 (1), S. 12. DOI: 10.2307/2683468.
- Moore, Duane Milton; Reynolds, Robert C. (1997): X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. 2. ed. Oxford: Oxford Univ. Press.
- Muneer, M.; Oades, J. M. (1989): The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability.III. Mechanisms and models. In: *Aust. J. Soil Res.* 27, S. 411–423.
- Munkholm, Lars J.; Kay, Bev D. (2002): Effect of Water Regime on Aggregate-tensile Strength, Rupture Energy, and Friability. In: *Soil Science Society of America Journal* 66 (3), S. 702. DOI: 10.2136/sssaj2002.0702.
- Olsson, L. H.; Barbosa, S.; Bhadwal A.; Cowie, K.; Delusca, D.; Flores-Renteria, K. et al. (2020): Land Degradation. 2020. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate*, Bd. 4, S. 345–436. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/07_Chapter-4.pdf, zuletzt geprüft am 2020.
- Omara, Peter; Aula, Lawrence; Oyebiyi, Fikayo; Raun, William R. (2019): World Cereal Nitrogen Use Efficiency Trends. Review and Current Knowledge. In: *age* 2 (1), S. 0. DOI: 10.2134/age2018.10.0045.
- Paradelo, R.; Virto, I.; Chenu, C. (2015): Net effect of liming on soil organic carbon stocks. A review. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202, S. 98–107. DOI: 10.1016/j.agee.2015.01.005.
- Park, Eun-Jin; Smucker, Alvin J. M. (2005a): Erosive Strengths of Concentric Regions within Soil Macroaggregates. In: *Soil Science Society of America Journal* 69 (6), S. 1912. DOI: 10.2136/sssaj2004.0400.
- Park, Eun-Jin; Smucker, Alvin J. M. (2005b): Saturated Hydraulic Conductivity and Porosity within Macroaggregates Modified by Tillage. In: *Soil Science Society of America Journal* 69 (1), S. 38. DOI: 10.2136/sssaj2005.0038.

- Park, Eun-Jin; Sul, Woo Jun; Smucker, Alvin J.M. (2007): Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability. In: *Soil Biology and Biochemistry* 39 (11), S. 2758–2768. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.06.007.
- Peth, S. (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten. In: *Schriftenreihe des Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, S. 1–160.
- Peth, S.; Horn, R.; Beckmann, F.; Donath, T.; Fischer, J.; Smucker, A. J. M. (2008): Three-Dimensional Quantification of Intra-Aggregate Pore-Space Features using Synchrotron-Radiation-Based Microtomography. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72 (4), S. 897–907. DOI: 10.2136/sssaj2007.0130.
- Plagge, R. (1991): Bestimmung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit im Boden. PhD thesis. In: *TU Berlin*.
- R Core Team (2017): R Studio version 3.5.1.
- Raun, W. R.; Johnson, G. V. (1999): Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. In: *Agronomy Journal* 91 (5), S. 357–363. Online verfügbar unter http://www.nue.okstate.edu/Index_Publications/Improving_NUE.pdf, zuletzt geprüft am 03.04.2017.
- Rechsteiner, R.; Keller, C. (2019): Die Basis für fruchtbare Böden. Kalkdüngung. In: *UFA Revue* (7-8), S. 46–47. Online verfügbar unter https://www.landor.ch/fileadmin/user_upload/Fachartikel/Kalk_nach_der_Ernte_D.pdf.
- Rengasamy, P.; Tavakkoli, E.; McDonald, G. K. (2016): Exchangeable cations and clay dispersion. Net dispersive charge, a new concept for dispersive soil. In: *Eur J Soil Science* 67 (5), S. 659–665. DOI: 10.1111/ejss.12369.
- Reth, Sascha; Reichstein, Markus; Falge, Eva (2005): The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux – A modified model. In: *Plant and Soil* 268 (1), S. 21–33. DOI: 10.1007/s11104-005-0175-5.
- Ruhberg, K. I. (2017): Mehr Nährstoffeffizienz, sichere Erträge, Grundwasserschutz. In: *Bauernblatt*, S. 47–49.
- Santos, D.; Smucker, A. J. M.; Murphy, S. L. S.; Taubner, H.; Horn, R. (1997): Uniform Separation of Concentric Surface Layers from Soil Aggregates. In: *Soil Science Society of America Journal* 61 (3), S. 720. DOI: 10.2136/sssaj1997.03615995006100030003x.

- Smucker, Alvin J.M.; Park, Eun-Jin; Dorner, Jose; Horn, Rainer (2007): Soil Micropore Development and Contributions to Soluble Carbon Transport within Macroaggregates. In: *Vadose Zone Journal* 6 (2), S. 282. DOI: 10.2136/vzj2007.0031.
- Snedecor, George W.; Cochran, William G. (1996): Statistical methods. 8th ed. Iowa: Iowa State University Press.
- Sparks, Donald L. (2003): Environmental soil chemistry. 2. ed. Amsterdam: Academic Press. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/els051/2002104258.html>.
- Stenberg, Maria; Stenberg, Bo; Rydberg, Tomas (2000): Effects of reduced tillage and liming on microbial activity and soil properties in a weakly-structured soil. In: *Applied Soil Ecology* 14 (2), S. 135–145. DOI: 10.1016/S0929-1393(00)00043-3.
- Stolpe, P.; Schimpf, H. (2017): Grundnährstoffversorgung landwirtschaftlicher Böden. in Sachsen Anhalt der Jahre 2001 bis 2015. In: *Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt*, S. 1–4. Online verfügbar unter https://llg.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LLFG/Dokumente/04_themen/pfl_ernaehr_duengung/veroeffentlichungen/17_flyer-agra_grund-boden-daten.pdf.
- Tisdall, J. M.; Oades, J. M. (1982): Organic matter and waterstable aggregates in soils. In: *Journal of Soil Science* (33), S. 141–163.
- Urbanek, Emilia; Horn, Rainer; Smucker, Alvin J.M. (2014): Tensile and erosive strength of soil macro-aggregates from soils under different management system. In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 62 (4), S. 324–333. DOI: 10.2478/johh-2014-0034.
- Uteau-Puschmann, D. (2013): Aeration as influenced by soil structure dynamics– a contribution to improve the acquisition of nutrients from the subsoil. Kiel: Schriftenreihe; Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (Schriftenreihe, 98).
- van Genuchten, M. T. (2005): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils.
- Vazquez, Eduardo; Benito, Marta; Espejo, Rafael; Teutscherova, Nikola (2019): Effects of no-tillage and liming amendment combination on soil carbon and nitrogen mineralization. In: *European Journal of Soil Biology* 93, S. 103090. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2019.103090.
- VDLUFA (2000a): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker - und Grünlandböden. In: *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs - und Forschungsanstalten*. Online verfügbar unter <http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/0-9-kalk.pdf>.

- VDLUFA (2000b): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden Anlage Richtwerte für das Rahmenschema zur Kalkbedarfsermittlung in Deutschland. In: *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs - und Forschungsanstalten*, S. 1–8.
- VDLUFA (2010): Empfehlungen zur N-Düngung nach Nmin-Methode. In: *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs - und Forschungsanstalten*.
- Vogel, Sebastian; Bönecke, Eric; Kling, Charlotte; Kramer, Eckart; Lück, Katrin; Nagel, Anne et al. (2020): Base Neutralizing Capacity of Agricultural Soils in a Quaternary Landscape of North-East Germany and Its Relationship to Best Management Practices in Lime Requirement Determination. In: *Agronomy* 10 (6), S. 877. DOI: 10.3390/agronomy10060877.
- Warkentin, Benno P. (2001): The tillage effect in sustaining soil functions. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164 (4), S. 345. DOI: 10.1002/1522-2624(200108)164:4<345::AID-JPLN345>3.0.CO;2-5.
- Wiermann, C.; Werner, D.; Horn, R.; Rostek, J.; Werner, B. (2000): Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. In: *Soil and Tillage Research* 53 (2), S. 117–128. DOI: 10.1016/S0167-1987(99)00090-2.
- Wisotzky, Frank (2011): Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung. Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-17813-9>.
- Zaher, Hafida; Caron, Jean; Ouaki, Bennaceur (2005): Modeling Aggregate Internal Pressure Evolution following Immersion to Quantify Mechanisms of Structural Stability. In: *Soil Science Society of America Journal* 69 (1), S. 1. DOI: 10.2136/sssaj2005.0001.
- Zehetner, Franz (2004): Bodenreaktion: Wiley (Handbuch der Bodenkunde).
- Zhang, Haiquan (1994): Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. In: *Soil and Tillage Research* 31 (2), S. 263–275. DOI: 10.1016/0167-1987(94)90085-X.

8. Anhang

Struckuren

Titeldaten

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------|--------------|------------------------------|-----------|--------|-----------------|--------------|-----------|----|------------|--------------|------|---|-------------|
| TK-Nr. 1 | Projekt-Nr. 2 | Profil-Nr. 3 | Datum der Aufnahme Jahr 3017 | Monat Mai | Tag 18 | Bearbeiter Tina | Rechtswert 5 | Langenrad | 6 | Hochwert 7 | Höhe über NN | 8 | Aufschlussart/Aufnahmeintensität/Probenahme | Bemerkungen |
| | | 01 | 2017 | Mai | 18 | | 8,56 | 56 | 12 | 54 | 58 | 7971 | 65 | 10 |

Aufnahmesituation

| | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|------------|------------------|--|-------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------|--------------------|-------------|
| Neigung 11 | Exposition 12 | Wölbung 13 | Relief | | Bodenabtrag | Nutzungsart / Versickerung 19 | Vegetation und Bedeckungsgrad 20 | Witterung | Bodenorganismen 23 | Bemerkungen |
| | | | Reliefformtyp 14 | metrische Angaben zum Reliefformtyp 15 | | | | | | |
| N1 | SW | | | | | A | | | | 24 |

Horizontbezogene Daten I

| Lfd. Nr. | Horizontgrenzen | | Horizont-Symbol | Bodenfarbe | Humusgehalt | Hydrromorphiemerkmale | | Pedogene Merkmale | | Bodengefüge | | Hohlräume | | Lagerungsdichte / Substanzvol./Zers. | Durchwurzelungsintensität | | |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------|------------|-------------|-----------------------|----------|-------------------|-------------|----------------------------|--------------------|-----------|-------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------|--------------|
| | Unter-/Obergrenze (cm) | Form, Schärfe u. Lage | | | | oxidativ | reduktiv | Bodenfeuchte | Kon-sistenz | sonstige pedogene Merkmale | Gef. u. Aggr.größe | Lage- art | Risse | | Poren | Röhren u. Gänge | Fein-wurzeln |
| 1 | -30 | EmAp | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | -70 | EmG0 | | | | ed, eo | | | | | pol | | | | | | |
| 3 | -90 | EmG10 | | | | ed | rb | | | | pol | | | | | | |
| 4 | -125 | EmG1 | | | | | rb | | | | pol | | | | | | |
| 5 | >125 | nHr | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | Ad-hoc-AG Boden | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Formblatt für die bodenkundliche Profilaufnahme, Seite 1 – Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 – © Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
 Em = marin (tidal - marin)

Horizontbezogene Daten II

| Lfd. Nr. | Substratart | Substratgenese | Merkmale der Substratzusammensetzung | | | | | | | | | | Stratigraphie | | Bemerkungen | | Proben | | |
|----------|-------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|---------------|-------------|-------------|--------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| | | | Gesamtbodenart | | | Kohlenstoffgehalt | Carbonatgehalt | Gesteinskennzeichnung | | | | | Stratigraphie | Bemerkungen | Entnahmeart | Entnahmetiefe (cm) | Nummern gestörter Proben | Nummern ungestörter Proben | |
| | | | Bodenart/Torfart/Muddart | Anteil am Gesamtboden | Summe Skelett (%) | | | Boden- ausgangs- gestein | perigla- ziere Lagen | Grobboden- komponenten | Substrathomogenitäten | strukturelle | | | | | | | |
| 42 | | 43 | 44a | 44b | 44c | 45 | 46 | 47a | 47b | 47c | 47d | 47e | 48 | 49 | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ad-hoc-AG Boden

Nieder-
moor

Profilkennzeichnung

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|----|-------------------------------|----|-----------|----|--------------------|-----|-------|-----|-------------------|----|---------------|----|----------------|----|--------------------|----|-------------|----|
| Bodensystematische Einheit | 50 | Substratsystematische Einheit | 51 | Humusform | 52 | Wasserstand u. GOF | 53a | Stand | 53b | Vermässhungs-grad | 54 | Erosions-grad | 55 | Bodenschätzung | 56 | weitere Unterlagen | 57 | Bemerkungen | 58 |
| Subtyp: | | Klasse: | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Varietät: | | Typ: | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Subvariетät: | | Subtyp: | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Kleimarsch
Normkleimarsch

Titeldaten

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------|-----------------|------------------------------------|--------------|-----------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|---|-------------------|
| TK-Nr. 1 | Projekt-Nr. 2 | Profil-Nr. 3 | Datum der Aufnahme Jahr 2017 | Monat Aug | Tag 08 | Bearbeiter Tina | Rechtswert Längengrad 9.087477 | Breitengrad 54.02863 | Höhe über NN 2m | Aufschlussart/Aufnahme- intensität/Probenahme 8 GS | Bemerkungen 10 |
|-------------|------------------|-----------------|------------------------------------|--------------|-----------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|---|-------------------|

Aufnahmesituation

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------|---------------|--------------------------|--|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|---|-----------------|--|-------------------------------------|-------------------|
| Neigung 11 NO | Exposition 12 | Wölbung 13 | Relief- formtyp 14 | metrische Angaben zum Reliefformtyp 15 | Mikrorelief 16 | Lage im Relief 17 | Bodenab- trag/-auf- trag 18 | Nutzungs- art /Versie- gelung 19 A | Vegetation und Bede- ckungsgrad 20 GE | Witterung 21 | anthrop. Veränd./ bautechn. Maßn. 22 | Boden- organismen 23 Luzen | Bemerkungen 24 |
|---------------------|------------------|---------------|--------------------------|--|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|---|-----------------|--|-------------------------------------|-------------------|

Horizontbezogene Daten I

| Lfd. Nr. | Horizontgrenzen | | Horizont-Symbol | Bodenfarbe | Humusgehalt | Hydromorphiemerkmale | | Bodenfeuchte | Konsistenz | sonstige pedogene Merkmale | Bodengefüge | | | Risse | Hohlräume | | Lagerungsdichte/ Substanzvol./Zers. | Durchwurzelungsintensität | | | |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------|------------|-------------|----------------------|----------|--------------|------------|----------------------------|------------------------|---------|-------|-------|-----------------|-------------|--|---------------------------|--|--|--|
| | Unter-/Obergrenze (cm) | Form, Schärfe u. Lage | | | | oxidativ | reduktiv | | | | Getform u. Aggr.-größe | Lageart | Poren | | Röhren u. Gänge | Feinwurzeln | | Grobwurzeln | | | |
| | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41a | 41b | | | |
| 1 | -27 | tmXP | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | -95 | tmGor | | | | eh | | | | | pol | | | | | | | | | | |
| 3 | -120 | tmGr | | | | | | | | rb, rg | | | | | | | | | | | |
| 4 | >120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Horizontbezogene Daten II

| Lit. Nr. | Substratart | Substratgenese | Merkmale der Substratzusammensetzung | | | | | | | | | | Proben | | | | | |
|----------|-------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|--------------|----------------|--------------|---------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| | | | Gesamtbodenart | | | Kohlenstoffgehalt | Carbo-nat-gehalt | Gesteinskennzeichnung | | | | | Strati-gra-fie | Bemer-kungen | Ent-nahme art | Ent-nahme-tiefe (cm) | Nummern gestörter Proben | Nummern ungestörter Proben |
| | | | Bodenart/ Torfart/ Muddart | Anteil am Gesamtboden | Summe Skelett (%) | | | Boden-ausgangs-gestein | perigla-zäre Lagen | Grobboden-komponenten | Substratinhomogenitäten | strukturelle | | | | | | |
| 42 | 43 | 44a | 44b | 44c | 45 | 46 | 47a | 47b | 47c | 47d | 47e | 48 | 49 | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Sandiger Lehmer
Gezeihenmediment

Profilkennzeichnung

| | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-----------|--------------------|--------------|-----------|----------------|--------------------|-------------|
| Bodenform | Substratsystematische Einheit | Humusform | Wasserstand u. GOF | Vernässungs- | Erosions- | Bodenschätzung | weitere Unterlagen | Bemerkungen |
| 50 | 51 | 52 | 53a | 53b | grad | 54 | grad | 55 |
| Klasse: Marschen | Subtyp: Marschen | | | | | | | |
| Varietät: Marschen | Subtyp: Marschen | | | | | | | |
| Subvariät: | | | | | | | | |

Titeldaten

| | | | | | | | | | |
|--------|-------------|------------|--------------------|------------|------------|-------------|--------------|---|-------------|
| TK-Nr. | Projekt-Nr. | Profil-Nr. | Datum der Aufnahme | Bearbeiter | Rechtswert | Hochwert | Höhe über NN | Aufschlussart/Aufnahmemensität/Probenahme | Bemerkungen |
| 1 | 2 | 3 | Jahr 21 | 5 | Längengrad | Breitengrad | 7 | 8 | 10 |
| | Schwarzbach | CF | April 2017 | Tina Frank | 9,24 | 85,91 | 50,82 | 37,8 | GS |

Aufnahmesituation

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------------|---------|--------------------|--|-------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------------|-------------|
| Neigung | Exposition | Wölbung | Relief- formtyp | metrische Angaben zum Reliefformtyp | Mikrorelief | Lage im Relief | Bodenab- trag- auf- trag | Nutzungs- art /Verste- ckung | Vegetation und Bede- ckungsgrad | Witterung | anthrop. Veränd./ bautechn. Maßn. | Boden- organismen | Bemerkungen |
| 11 | 12 | 13 | # | 15 | 16 | 17 | 18 | A | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| N3.1 | Nordost | G.G | # | / | / | / | / | A | GE | | / | L,rv | |

Horizontbezogene Daten I

| Lfd. Nr. | Horizontgrenzen | | Horizont-Symbol | Bodenfarbe | Humusgehalt | Hydromorphiemerkmale | | Bodenphysiologie | | sonstige pedogene Merkmale | | Bodengefüge | | Hohlräume | | Lagerungsdichte/ Substanzvol./Zers. stufe | Durchwurzelungsintensität | | |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------|------------|-------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------|-------------|----------------------------|-------------------------|----------------|-------|-----------|-----------------|---|---------------------------|--------------|--|
| | Unter-/Obergrenze (cm) | Form, Schärfe u. Lage | | | | oxidativ | reduktiv | feuchte Konsistenz | Kon-sistenz | pedogene Merkmale | Gef. form u. Aggr.größe | Lage-rungs-art | Risse | Poren | Röhren u. Gänge | | Fein-wurzeln | Grob-wurzeln | |
| | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41a | 41b | |
| 1 | -30 | W | AP | | | | | | | | | | | | | | | MF2 | |
| 2 | -80 | W | SU | | | ed, ehv | rb | | | pol | | W | | | | | | Rre | |
| 3 | >80 | | ISd | | | | im unteren der Aggregate roslich-gelb | | | | | g | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ad hoc AG Boden

Horizontbezogene Daten II

| Lfd. Nr. | Substratart | Substratgenese | Merkmale der Substratzusammensetzung | | | | | | | | | | Proben | | | | | |
|----------|-------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------|-------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|--------------|---------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|
| | | | Gesamtbodenart | | | Kohlenstoffgehalt | Carbo-nat-gehalt | Gesteinskennzeichnung | | | Strati-gra-fie | Bemer-kungen | Ent-nahme art | Ent-nahme-tiefe (cm) | Nummern gestörter Proben | Nummern ungestörter Proben | | |
| | | | Bodenart/ Torfart/ Muddart | Anteil am Gesamtboden | Summe Skelett | | | Boden- ausgangs- gestein | perigla- ziäre Lagen | Grobboden- komponenten | | | | | | | Substrathomogenitäten | strukturelle |
| 42 | | 43 | 44a | 44b | 44c | 45 | 46 | 47a | 47b | 47c | 47d | 47e | 48 | 49 | | | | |
| 1 | | | LE3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | Tu3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | Tu4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Profilkennzeichnung

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------------|--------------|-----------|----------------|--------------------|-------------|
| Bodenform | Substratgenese | Humusform | Wasserstand u. GOF | Vernässungs- | Erosions- | Bodenschätzung | weitere Unterlagen | Bemerkungen |
| Bodensystematische Einheit 50 | Substratgenese 51 | Humusform 52 | GWS 53a Stand 53b | grad 54 | grad 55 | grad 56 | grad 57 | |
| Subtyp: SSN | Klasse: Shawasserböden | | | | | | | |
| Varietät: | Typ: Pseudogley | | | | | | | |
| Subvariätät: | Subtyp: Warmepseudogley | | | | | | | |

Formblatt für die bodenkundliche Profilaufnahme, Seite 2 - Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 - © Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Primäres Pseudogley

Ad-hoc-AG Boden

Sand-Tonstein
Bunbandstein

Sulfidation
Fußerde über
Fließschutt

Sediment
20 cm

eventuell ein
weiter fossiler
Bedeutung unter-
geordnet

Titeldaten

| | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------|--------------|------------------------------|-------------|--------|-----------------|-------------------------|---------------------|----------------|--|----------------|
| TK-Nr. 1 | Projekt-Nr. 2 | Profil-Nr. 3 | Datum der Aufnahme Jahr 2017 | Monat April | Tag 20 | Bearbeiter Tina | Rechtswert Längengrad 6 | Breitengrad 50,6176 | Höhe über NN 8 | Aufschlussart/Aufnahmeintensität/Probennahme 9 | Bemerkungen 10 |
|----------|---------------|--------------|------------------------------|-------------|--------|-----------------|-------------------------|---------------------|----------------|--|----------------|

Aufnahmesituation

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|------------|------------------|--------------------------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------------------|----------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------|----------------|
| Neigung 11 | Exposition 12 | Wölbung 13 | Reliefformtyp 14 | metrische Angaben zum Reliefortyp 15 | Mikrorelief 16 | Lage im Relief 17 | Bodenabtrag 18 | Nutzungsart/Verstärkung 19 | Vegetation und Bedeckungsgrad 20 | Witterung 21 | anthrop. Veränd./bautechn. Maßn. 22 | Bodenorganismen 23 | Bemerkungen 24 |
| N2 | EE | MS2 | | | | | | A | GE | | | | |

X, G

Horizontbezogene Daten I

| Lfd. Nr. | Horizontgrenzen | | Horizont-Symbol | Bodenfarbe | Humusgehalt | Hydromorphie | | Boden-/Korn-sistenz | sonstige pedogene Merkmale | Bodengefüge | | Hohlräume | | Lagerungs-dichte/ Substanzvol./Zers. stufe | Durchwurzelungsintensität | | | | |
|----------|-------------------------|----------------------|-----------------|------------|-------------|--------------|----------|---------------------|----------------------------|-----------------|-------------------|-----------|-------|--|---------------------------|--------------|--------------|-----|-----|
| | Unter-/Ober-grenze (cm) | Form, Schärfen. Lage | | | | oxidativ | reduktiv | | | feuchte | art. Verfestigung | Risse | Poren | | Rehren u. Gänge | Fein-wurzeln | Grob-wurzeln | | |
| | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41a | 41b | |
| 1 | -30 | | (A1) 1 AP | KA 5 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | | | | | | | | | | |
| 2 | -65 | | BH(V) | | | | | | M | Pol | | | | | | | Rre, Rwu | WF4 | Mg2 |
| 3 | -105 | | (CBt) 5w | | | | | | | Pol | | | | | | | Rwu | WF2 | |
| 4 | -110 | | II SdL | | | | | | | Koh/ pla.? | | | | | | | | | |
| 5 | >110 | | Cv | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | Ad-hoc-AG Boden | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Horizontbezogene Daten II

| Lfd. Nr. | (Substratart) | (Substratgenese) | Gesamtbodenart | | | | Merkmale der Substratzusammensetzung | | | | | | | Proben | | | | | |
|----------|---------------|------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|-------------|-------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| | | | Bodenart/ Torfart/ Muddert | Anteil am Gesamtboden | Grobbodenfraktionen und Anteile | Summe Skelett (%) | Kohlenstoffgehalt | Carbo-nat-gehalt | Boden-ausgangs-gestein | periglaziäre Lagen | Grobboden-komponenten | Substrathomogenitäten | Stratigraphie | Bemerkungen | Ent-nahme art | Ent-nahme-tiefe (cm) | Nummern gestörter Proben | Nummern ungestörter Proben | |
| 42 | | 43 | 44a | 44b | 44c | 45 | 46 | 47a | 47b | 47c | 47d | 47e | 48 | 49 | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | Stech- zyklus ~ 20cm | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

oberer Bunbandstein

Ad-hoc-AG Boden

Ton- und Sandstein
Bunbandstein
Solifluktion (periglazial)

Profilkennzeichnung

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|----|-------------------------------|----|-----------|----|--------------------|-----|-------|-----|------|--------------|----|------|----|----------------|----|--------------------|----|-------------|----|--|
| Bodensystematische Einheit | 50 | Substratsystematische Einheit | 51 | Humusform | 52 | Wasserstand u. GOF | 53a | Stand | 53b | grad | Vermässungs- | 54 | grad | 55 | Bodenschätzung | 56 | weitere Unterlagen | 57 | Bemerkungen | 58 | |
| Subtyp: BS-LL | | Klasse: Leopold | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Varietät: | | Typ: Parabrunerde | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Subvarietät: | | Subtyp: Parabrunerde | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tonreicher im Bt pedogen

sekundärer Baulogley?

Bayern, Prack

Titeldaten

| | | | | | | | | | |
|----------|---------------|--------------|---|--------------|--------------|------------|----------------|---|----------------|
| TK-Nr. 1 | Projekt-Nr. 2 | Profil-Nr. 3 | Datum der Aufnahme Jahr 3 Monat 3 Tag 4 | Bearbeiter 5 | Rechtswert 6 | Hochwert 7 | Höhe über NN 8 | Aufschlussart/Aufnahmeintensität/Probenahme 9 | Bemerkungen 10 |
| | 3Mng PEZ | | 2017 Mai 03 | Tina | 11.23739 | 18.26878 | | 65 | |

Aufnahmesituation

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|------------|-------------------|---|----------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------|----------------|
| Neigung 11 | Exposition 12 | Wölbung 13 | Relief | | Mikrorelief 16 | Lage im Relief 17 | Bodenabtrag/-auftrag 18 | Nutzungsart /Verstärkungsgelung 19 | Vegetation und Bedeckungsgrad 20 | Witterung 21 | anthrop. Veränd./bautechn. Maßn. 22 | Bodenorganismen 23 | Bemerkungen 24 |
| | | | Relief-formtyp 14 | metrische Angaben zum Relief-formtyp 15 | | | | | | | | | |
| NA.1 | SW | | | | | | | A | GE | WLU | | | |

Horizontbezogene Daten I

| Lfd. Nr. | Horizontgrenzen | | Horizont-Symbol | Bodenfarbe | Humusgehalt | Hydromorphiemerkmale | | Bodenfeuchte | Konsistenz | sonstige pedogene Merkmale | Bodengefüge | | | Risse | Hohlräume | | Lagerungsdichte/ Substanzvol./Zers.stufe | Durchwurzelungsintensität | | | |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------|------------|-------------|----------------------|----------|--------------|------------|----------------------------|-------------|---------|-----|-------|-----------|-----------------|--|---------------------------|-------------|--|-----|
| | Unter-/Obergrenze (cm) | Form, Schärfe u. Lage | | | | oxidativ | reduktiv | | | | größte | Lageart | Art | | Poren | Röhren u. Gänge | | Feinwurzeln | Grobwurzeln | | |
| 1 | ~28 | | AP | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | -80 | W, Z | Bv | | | | | | | Heiße Korte | | | | | | | | | | | MFZ |
| 3 | -110 | E, Sc | BvZ | 10YR5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | >110 | | Cv | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | Ad-hoc-AG Boden | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Horizontbezogene Daten II

| Lfd. Nr. | Substratart | Substratgenese | Merkmale der Substratzusammensetzung | | | | Gesteinskennzeichnung | | | | Stratigraphie | Bemerkungen | Proben | | | | | |
|----------|-------------|----------------|--------------------------------------|--|-----------------------|------------------|-----------------------|-----|---------------------|-----------------------|-------------------|------------------|---------------------|---------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| | | | Gesamtbodenart | | Kohlenstoffgehalt | Carbo-nat-gehalt | Boden-angangs-gestein | | perigla-ziale Lagen | Grobboden-komponenten | | | Substrathomogenität | Ent-nahme art | Ent-nahme-tiefe (cm) | Nummern gestörter Proben | Nummern ungestörter Proben | |
| | | | Bodenart/ Torfart/ Muddart | Anteil am Gesamtboden | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 44a | Grobbodenfraktionen und Anteilsklassen 44b | Summe Skelett (%) 44c | 45 | 46 | 47a | 47b | 47c | Substranziale 47d | strukturelle 47e | 48 | 49 | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ad-hoc-AG Boden

Profilkennzeichnung

| | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|-----------|-------------------|---------|-----------------|--------------|----------------|--------------------|-------------|
| Bodenform | Substratgenese | Humusform | Wasserstand n.GOF | Stand | Vernässungsgrad | Erosionsgrad | Bodenschätzung | weitere Unterlagen | Bemerkungen |
| 50 | 51 | 52 | 53a | 53b | grad | 54 | 55 | 56 | 57 |
| Subtyp: | Klasse: | Subtyp: | Typ: | Subtyp: | | | | | |
| Subvarietät: | Subtyp: | | | | | | | | |

Klasse: **Braunerden**
 Typ: **Normbraunerde**

Titeldaten

| | | | | | | | | | | |
|----------|---------------|--------------|--------------------|-----------|------------|------------|-------------|---------|-------------------------|-------------|
| TK-Nr. 1 | Projekt-Nr. 2 | Profil-Nr. 3 | Datum der Aufnahme | | Bearbeiter | Rechtswert | Hochwert | Höhe | Aufschlussart/Aufnahme- | Bemerkungen |
| | | dZ | Jahr 2017 | Monat Mai | Tag 10 | Längsgroß | Breitengrad | über NN | intensität/Probenahme | 10 |
| | | | | | | 13.12.91 B | 53.31' 56.3 | | GS | |

Aufnahmesituation

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|------------|------------|------------|------------------------------|----------------|-------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------|-------------|
| Neigung 11 | Exposition 12 | Wölbung 13 | Relief | | metrische Angaben zum Relief | Mikrorelief 16 | Lage im Relief 17 | Bodenabtrag/-auftrag 18 | Nutzungsart/Versickerungsgrad 19 | Vegetation und Bedeckungsgrad 20 | Witterung 21 | anthrop. Veränd./bautechn. Maßn. 22 | Bodenorganismen 23 | Bemerkungen |
| | | | formtyp 14 | formtyp 15 | | | | | | | | | | |
| NO | NW | | | | | | | | A | FR | | | | |

Horizontbezogene Daten I

| Lfd. Nr. | Horizontgrenzen | | Horizont-Symbol | Bodenfarbe | Humusgehalt | Hydromorphiemerkmale | | Bodenfeuchte | Konsistenz | sonstige pedogene Merkmale | Bodengefüge | | Risse | Hohlräume | | Lagerungs-dichte/ Substanzvol./Zers. stufe | Durchwurzelungsintensität | |
|----------|------------------------|-----------------------|-----------------|------------|-------------|----------------------|----------|--------------|------------|----------------------------|-----------------|------------------------|-------|-----------|-----------------|--|---------------------------|-------------|
| | Unter-/Obergrenze (cm) | Form, Schärfe u. Lage | | | | oxidativ | reduktiv | | | | Aggregationsart | Lageart | | Poren | Röhren u. Gänge | | Feinwurzeln | Grobwurzeln |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41a | 41b | |
| 1 | -30 | | AP | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | -40 | | AL | | | | | | | | pol | | | | | | Rru | |
| 3 | -100 | | BE | | | | | | | | pol | VE3 Faktor ab AL | | | | | Rre | |
| 4 | > 100 | | eCV | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ad-hoc-AG Boden

Horizontbezogene Daten II

| Lfd. Nr. | Substratart | Substratgenese | Merkmale der Substratzusammensetzung | | | | | | | | | | Proben | | | | |
|----------|-------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------|-------------------|------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| | | | Gesamtbodenart | | | Kohlenstoffgehalt | Carbo-nat-gehalt | Gesteinskennzeichnung | | | | Strati-gra-fie | Bemer-kungen | Ent-nahme art | Ent-nahme-tiefe (cm) | Nummern gestörter Proben | Nummern ungestörter Proben |
| | | | Bodenart/ Torfart/ Muddert | Anteil am Gesamtboden | Summe Skelett | | | Boden- ausgangs- gestein | perigla- ziere Lagen | Grobboden- komponenten | Substrathomogenitäten | | | | | | |
| 42 | 43 | 44a | 44b | 44c | 45 | 46 | 47a | 47b | 47c | 47d | 47e | 48 | 49 | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ad-hoc-AG Boden

Profilkennzeichnung

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|----|-------------------------------|-------------------|-----------|----|--------------------|-----|-------|-----|------|--------------|----|-----------|----|------|----------------|----|--------------------|----|-------------|----|
| Bodensystematische Einheit | 50 | Substratsystematische Einheit | 51 | Humusform | 52 | Wasserstand u. GOF | 53a | Stand | 53b | grad | Vernässungs- | 54 | Erosions- | 55 | grad | Bodenschätzung | 56 | weitere Unterlagen | 57 | Bemerkungen | 58 |
| Subtyp: | | Klasse: | Leptos | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Varietät: | | Typ: | Parabraunerde | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Subvariätät: | | Subtyp: | Normparabraunerde | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Magdeburg

Titeldaten

| | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------|--------------|------------------------------|-----------|--------|-----------------|--------------|-------------|----------------|---|----------------|
| TK-Nr. 1 | Projekt-Nr. 2 | Profil-Nr. 3 | Datum der Aufnahme Jahr 2017 | Monat Mai | Tag 11 | Bearbeiter Tino | Rechtswert 6 | Hochwert 7 | Höhe über NN 8 | Aufschlussart/Aufnahmeintensität/Probenahme 9 | Bemerkungen 10 |
| | B2, C2, A2, D2 | | 2017 | Hai | 11 | | Langengrad | Breitengrad | | GS | |

Aufnahmesituation

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|------------|-------------------|------------------------------|------------|----------------|-------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------------------------------|----------------------|----------------|
| Neigung 11 | Exposition 12 | Wölbung 13 | Relief-formtyp 14 | Relief | | Mikrorelief 16 | Lage im Relief 17 | Bodenab-trag/-auf-trag 18 | Nutzungs-art/Versie-ckung 19 | Vegetation und Bede-ckungsgrad 20 | Witterung 21 | anthrop. Veränd./bautechn. Maßn. 22 | Boden-organis-men 23 | Bemerkungen 24 |
| | | | | metrische Angaben zum Relief | formtyp 15 | | | | | | | | | |
| NO | | | | | | | | | A | HF | WT-1 | | | |

Horizontbezogene Daten I

| Lfd. Nr. | Horizontgrenzen | | Horizont-Symbol | Boden-farbe | Humus-gehalt | Hydromorphiemerkmale | | Boden-feuchte | Kon-sistenz | sonstige pedogene Merkmale | Bodengefüge | | Hohlräume | | | Lagerungs-dichte/ Substanz-vol./Zers. stufe | Durchwurzelungs-intensität | |
|----------|-------------------------|------------------------|-----------------|-------------|--------------------------------|----------------------|----------|---------------|-------------|----------------------------|---------------------|----------------|-----------|-------|-----------------|---|----------------------------|--------------|
| | Unter-/Ober-grenze (cm) | Form, Schärfen u. Lage | | | | oxidativ | reduktiv | | | | aggr- u. Aggr-größe | Lage-rungs-art | Risse | Poren | Röhren u. Gänge | | Fein-wurzeln | Grob-wurzeln |
| | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41a | 41b |
| 1 | -30 | | AP | | | | | | | | | | | | | | WF2 | |
| 2 | -60 | | Go - BV | | Humus ed, es bis 50cm sichtbar | | ed, es | | | | pol | VF2 | | | | | WF2 | MG0 |
| 3 | >60 | z | Go | | | | ed, es | feucht | | | koh | VF1 | | | | | WF0 | MG0 |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ad-hoc-AG Boden

Horizontbezogene Daten II

Merkmale der Substratzusammensetzung

| Lfd. Nr. | Substratart | Substratgenese | Gesamtbodenart | | | Kohlenstoffgehalt | Carbo-nat-gehalt | Gesteinskennzeichnung | | | | | | Strati-gra-fie | Bemerkungen | Proben | | | | |
|----------|-------------|----------------|--|---|-----------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|---------------------|----------------------|----------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| | | | Bodenart/ Torfart/ Muddeart 44a | Anteil am Gesamtboden Grobbodenfraktionen und An-teilstklassen 44b | Summe Skelett (%) 44c | | | Boden- ausgangs- gestein 47a | perigla- ziäre Lagen 47b | Grobboden- komponenten 47c | Substrathomogenität substanzelle 47d | strukturelle 47e | Ent- nahme art | | | Ent- nahme- tiefe (cm) | Nummern gestörter Proben | Nummern ungestörter Proben | | |
| 42 | | 43 | | | | 45 | 46 | | | | | | | 48 | 49 | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ad-hoc-AG Boden

Profilkennzeichnung

| | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-----------|----------------------|--------------|-----------|----------------|--------------------|-------------|
| Bodenform | Substratsystematische Einheit | Humusform | Wasserstand u. GOF | Vernässungs- | Erosions- | Bodenschätzung | weitere Unterlagen | Bemerkungen |
| | 50 | 51 | 52 GWS 53a Stand 53b | 54 grad | 55 grad | 56 | 57 | 58 |
| Subtyp: | Klasse: <i>Braunerden</i> | | | | | | | |
| Varietät: | Type: <i>Braunerde</i> | | | | | | | |
| Subvariетät: | Subtyp: <i>Gley - Braunerde</i> | | | | | | | |