

**ENDBERICHT ZUM LANDSCHAFTSFONDSPROJEKT ABB-LEBO-758/0001**

**BODENZUSTANDSÄNDERUNGEN IN LANDSCHAFTSRÄUMEN DES  
INDUSTRIEVIERTELS**

**Autoren:**

**Walter W. Wenzel, Alireza Golestanifard & Olivier Duboc**



**Universität für Bodenkultur Wien  
Department für Wald- und Bodenwissenschaften  
Institut für Bodenforschung**

**am**

**Universitäts- und Forschungszentrum Tulln (UFT)  
Konrad-Lorenz-Straße 24, A-3430 Tulln**

**Februar 2024**

**Finanziert durch den NÖ Landschaftsfonds**



## Kurzfassung

In Vollziehung des NÖ Bodenschutzgesetzes wurden im vorliegenden Projekt bisher 225 Standorte der Niederösterreichischen Bodenzustandsinventur in Landschaftsräumen des Industrieviertels und des angrenzenden Wienerwaldes erneut aufgesucht und Oberböden (0-20 cm) unter Grünland- und Ackernutzung entnommen. Gemeinsam mit den für dieselben Standorte verfügbaren Archivproben der Erstaufnahme aus dem Zeitraum 1990-1992 wurden diese auf wichtige Kennwerte der Bodengesundheit (organischer Kohlenstoff, Bodenacidität pH-Wert, Konzentrationen potentiell schädlicher Metalle und Metalloide) untersucht. Mit Hilfe dieser Daten sowie bereits früher an Standorten der österreichischen Bodenkartierung entnommenen Bodenproben im Projektgebiet wurde der aktuelle Bodenzustand beschrieben und Veränderungen während der vergangenen drei Jahrzehnte erfasst, sowie Einflussfaktoren des Bodenzustands mit Hilfe multipler Regressionsmodelle ermittelt.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen im Vergleich zu Ackerböden deutlich höhere Konzentrationen des organischen Kohlenstoffs (SOC) und geringere pH-Werte (stärkere Bodenacidität) in den Grünlandböden. Abgesehen von der Nutzungsart wird die SOC-Konzentration im Projektgebiet von bodenchemischen Kennwerten (amorphe Hydroxide und Oxide des Eisens und Aluminiums, pH-Wert) kontrolliert.

Es kam im Beobachtungszeitraum (im Mittel 1991 bis 2020) – im Gegensatz zu vielen anderen europäischen Regionen - zu teils deutlichen Zuwächsen des organischen Kohlenstoffs sowohl unter Acker (im Mittel um 7,8 % der Ausgangskonzentration) als auch Grünland (um 17,4% der Ausgangskonzentration). Am deutlichsten waren die Steigerungen im Wienerwald (15,9 %; Hauptproduktionsgebiet 2), am geringsten in der Buckligen Welt (7,3 %, nicht signifikant; HPG 3). Auch in den hauptsächlich als Ackerland genutzten tieferen Lagen des im Projektgebiet liegenden Teils des nordöstlichen Flach- und Hügellandes (HPG 8) ist der Kohlenstoffzuwachs mit 11,2 % bemerkenswert. Relevante Veränderungen der Bodenacidität (pH-Wert) wurden hingegen nicht gefunden.

Die Versorgung der Böden des Industrieviertels mit organischem Kohlenstoff war zu Beginn der Beobachtungsperiode an 45,2 % der Standorte anhand des SOC:Ton-Verhältnisses als „sehr gut“, an 18,6 % als gut einzustufen; 36,2 % lagen jedoch unter dem SOC:Ton-Zielwert von 0,1 nach Johannes et al. (2017). Bis zum Ende der Beobachtungsperiode kam es zu einer Verbesserung mit nunmehr 51,9 % der Standorte im „sehr guten“ und 15,2% im „guten“ Zustand, der Anteil der Standorte unter dem Zielwert sank auf 33,0 %. Der Großteil der Böden unter dem Zielwert befindet sich unter Ackernutzung. Zieht man die Kriterien (gesunde Böden mit SOC:Ton > 0,13) des im Juli 2023 vorgelegten Entwurfs für eine Rahmenrichtlinie für Bodenmonitoring und Resilienz zur Bewertung heran, würden die Böden an 45,2 % der Standorte zu Beginn der Beobachtungsperiode als „gesund“ eingestuft, am Ende der Periode wären dies 51,9 %. Der Vorschlag der Europäischen Kommission beruht jedoch auf einer Fehlinterpretation der von Johannes et al. (2017) anhand von Böden der Westschweiz kalibrierten und von Prout et al. (2020) für Böden von England und Wales bestätigten Kategorisierung mit einem Zielwert von 0,1.

Bei den Konzentrationen der Metalle und Metalloide konnten im Überwachungszeitraum keine relevanten Veränderungen festgestellt werden.

# 1. Einleitung

Das Industrieviertel ist ein hoch dynamischer Lebens- und Wirtschaftsraum im Südosten Niederösterreichs und war damit insbesondere auch in den vergangenen Jahrzehnten erheblichen anthropogenen Einwirkungen auf die Landschaftsentwicklung und möglichen Auswirkungen auf den Bodenzustand unterworfen. Zugleich handelt es sich auch um ein wichtiges landwirtschaftliches Produktionsgebiet mit teils hoher Nutzungsintensität.

Gemäß NÖ Bodenschutzgesetz, §4, hat die NÖ Landesregierung den Zustand der Böden zu untersuchen und Entwicklungstendenzen zu erforschen. Die Untersuchungen haben die für die nachhaltige Bodenfruchtbarkeit und Bodengesundheit bedeutsamen Faktoren nach dem Stand der Wissenschaft zu umfassen, insbesondere hinsichtlich Schadstoffeintrag und Schadstoffgehalt, Bodenverdichtung und Bodenerosion. Die Landesregierung hat diesbezüglich ein Arbeitsprogramm hinsichtlich der Messtellen für die Probenahme, der Untersuchungsparameter und der Untersuchungsintervalle festzulegen.

Da die zuständige Agrarbezirksbehörde nicht über eigene personelle Ressourcen und Infrastruktur (Labor) zur Durchführung dieser Aufgaben verfügt, wurden diese in einer Rahmenvereinbarung (datiert 13.06.2018) an das Department für Wald- und Bodenforschung der Universität für Bodenkultur übertragen. Die Koordination und Finanzierung obliegen dem Land NÖ. Das in der Rahmenvereinbarung vereinbarte Arbeitsprogramm sieht u.a. die Wiederholung der NÖ Bodenzustandsinventur (Amt der NÖ Landesregierung, 1994) vor, deren Erstaufnahme in den Jahren 1990 – 1992 erfolgte.

In bisherigen Projekten wurde ein Teil der Standorte der Bodenzustandsinventur im Weinviertel, dem Marchfeld, dem Waldviertel sowie im NÖ Voralpengebiet (Zentralraum) nochmals aufgesucht und Oberbodenmaterial (0-20 cm) entnommen. Darüber hinaus wurden Profilstandorte der Österreichischen Bodenkartierung, für die Archivbodenproben verfügbar sind, in den NÖ Kalkalpen und in einigen weiteren Regionen Niederösterreichs wieder beprobt.

Für die Landschaften des Industrieviertels und der angrenzenden Regionen des Wienerwalds war die Wiederholung der Bodenzustandsinventur jedoch noch ausständig.

Im vorliegenden Projekt werden daher bestehende Lücken in der Neuaufnahme der Niederösterreichischen Bodenzustandsinventur in der Region Industrieviertel sowie in angrenzenden Gebieten des Wienerwaldes geschlossen. Ziel ist die Erfassung des aktuellen Bodenzustands hinsichtlich Humusversorgung, Bodenversauerung und der Belastung mit Metallen und Metalloiden. Um einen methodisch abgesicherten Vergleich mit den Ergebnissen der Erstaufnahme der Bodenzustandsinventur zu ermöglichen, werden parallel die Archivproben derselben Standorte nochmals mit den aktuellen, verbesserten Methoden der Bodenanalytik gemessen. Damit wird gewährleistet, dass eventuell festgestellte Unterschiede zwischen den beiden Zeitpunkten der Probenahme nicht auf methodischer bzw. Labor-bedingter Variabilität beruhen, sondern tatsächlich als zeitliche Veränderungen interpretiert werden können. Aus den so festgestellten Veränderungen werden Rückschlüsse auf mögliche Einflussfaktoren sowie Hinweise auf eventuellen Handlungsbedarf abgeleitet.

Da bisherige Untersuchungen in anderen Regionen Niederösterreichs zum Teil sehr kleinräumige Unterschiede in der Entwicklung des Bodenzustands gezeigt haben (Wenzel et al., 2022a; Wenzel et al., 2022b; Wenzel et al., 2022c), wurden die Daten nicht nur für das Gesamtgebiet, sondern – soweit es die

jeweilige Zahl der Standorte erlaubt – auch getrennt nach Haupt- und Kleinproduktionsgebieten ausgewertet und zu verfügbaren Informationen über Boden, Klima und Bewirtschaftung in Bezug gesetzt. Damit ist auch ein Bezug zu verschiedenen Landschaftstypen möglich.

Die Auswertungen erfolgten im Hinblick auf die Beschreibung des aktuellen Bodenzustands sowie die Erfassung zeitlicher Veränderungen seit der Erstaufnahme der Bodenzustandsinventur (1990 – 1992). Damit wurden sowohl positive als auch potentiell negative Entwicklungen der Bodengesundheit und deren Auswirkungen auf Ökosystemleistungen der Böden erfasst und – entsprechend den Anforderungen des NÖ Bodenschutzgesetzes - im Kontext des aktuellen Wissensstandes interpretiert.

Ein weiterer Schwerpunkt der Auswertungen wurde auf die Erfassung der Unterschiede zwischen Teilregionen des Untersuchungsraums gelegt. Hierbei werden die Daten nach Haupt- bzw. Kleinproduktionsgebieten ausgewertet, um neben den Ergebnissen für das Gesamtgebiet auch einen Bezug zwischen der ökologischen Ausstattung und Bewirtschaftung der Landschaftsräume, und der Bodengesundheit bzw. deren Entwicklung herzustellen.

Da im Projektgebiet nur 225 Standorte der Bodenzustandsinventur den Auswahlkriterien entsprachen, wurden im Herbst 2022 ca. weitere 75 Standorte im Waldviertel wieder beprobt, um die im Landschaftsfondprojekt ABB-LEBO-746/0002 (Wenzel et al., 2022a) beobachteten Trends der Veränderung der Kohlenstoffkonzentrationen in den Oberböden dieses Hauptproduktionsgebiets besser absichern zu können. Diese Daten werden im Projektbericht nicht dargestellt, jedoch in die Datenbank integriert. Um die Datenlage für das Projektgebiet (Industrieviertel) dennoch zu verdichten, wurden verfügbare Daten aus der 2016 – 2020 erfolgten erneuten Beprobung von Profilstandorten der österreichischen Bodenkartierung (Wenzel et al., 2022c) in die Auswertungen einbezogen. Insgesamt konnten im Projektgebiet somit 377 Standorte hinsichtlich des Bodenzustands und seiner Veränderungen in den letzten drei Jahrzehnten dargestellt und interpretiert werden.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet und Bodenprobenahme

Im Sommer 2022 wurden unter Ackernutzung sowohl Rasterpunkte im Grundnetz (BAZUFR 1) der NÖ BZI als auch Verdichtungspunkte (BAZUFR 3) wieder beprobt. Unter Grünlandnutzung wurden nur Verdichtungspunkte neuerlich beprobt, da an diesen wie unter Acker bei der Erstaufnahme 1991 der Oberboden von 0-20 cm entnommen worden war. Damit ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse zwischen den Landnutzungskategorien möglich. Die Auswahl erfolgte anhand der Informationen aus der Erstaufnahme. Die beprobten Haupt- und Kleinproduktionsgebiete sind Abbildung 1, die räumliche Verteilung und die Lokalisierung der Entnahmepunkte in Abbildung 2 dargestellt.

Die bisher 225 Rasterpunkte (Standorte) wurden mit Hilfe der im Rahmen der Erstaufnahme dokumentierten Koordinaten aufgesucht. An jedem Rasterpunkt wurden mindestens 10 Teilproben aus 0-20 cm Bodentiefe randomisiert innerhalb eines Kreises von 10 m Durchmesser mit einem Spaten entnommen und zu einer Mischprobe vereinigt.

Alle Bodenproben wurden zeitnah in das Labor des Instituts für Bodenforschung (UFT Tulln) verbracht, an der Luft getrocknet, und zur Gewinnung der Feinbodenfraktion auf < 2 mm Korngröße gesiebt.

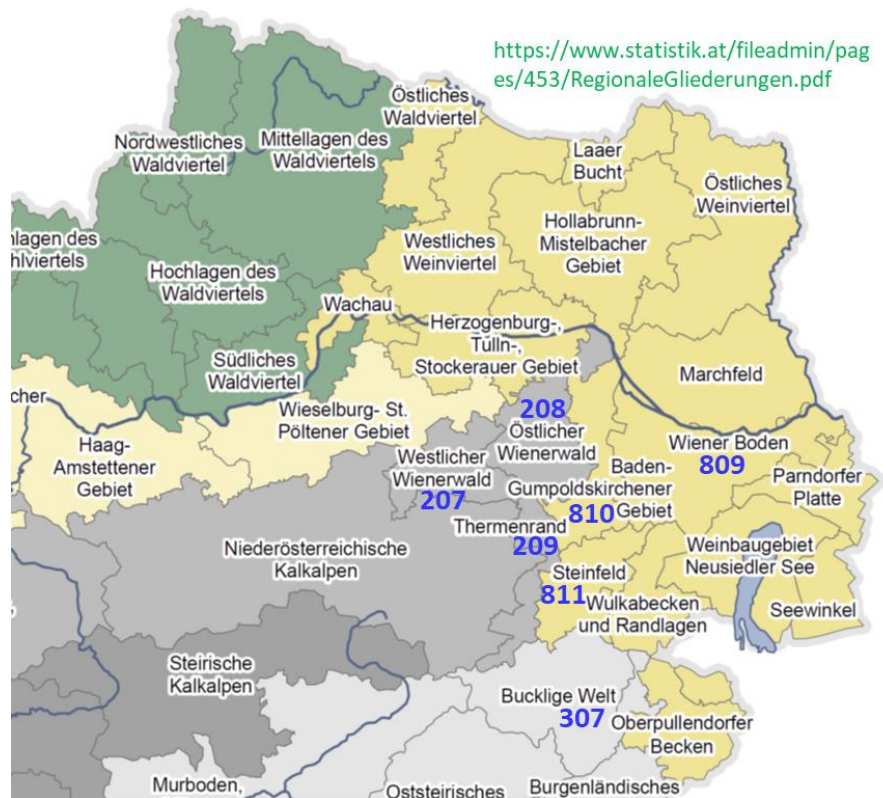


Abbildung 1 Karte der Kleinproduktionsgebiete, in denen ein Teil der BZI-Standorte im Zuge des Projekts nochmals beprobt wurden. Die Kleinproduktionsgebiete im Projektgebiet sind in blauer Schrift nummeriert. Kartenquelle: Statistik Austria (Gebietsstand 01.01.2022)

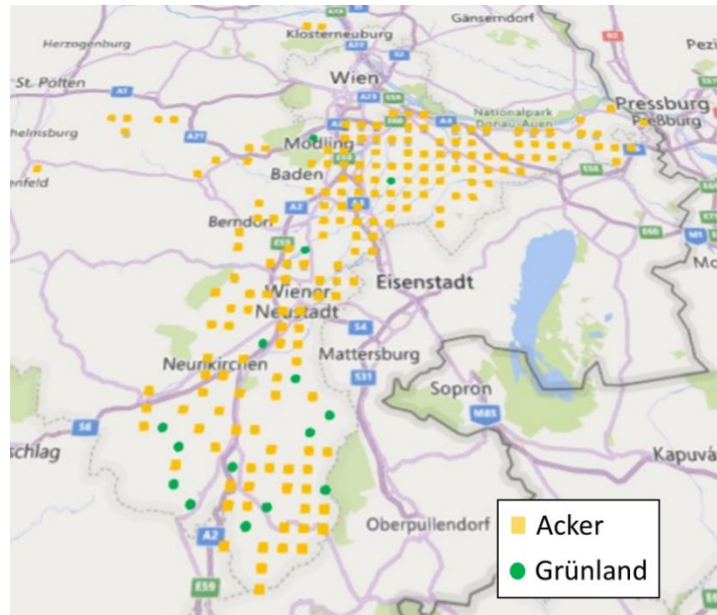


Abbildung 2 Karte der BZL-Standorte, welche im Zuge des Projekts nochmals beprobt wurden. Karte generiert mit 3D-Karten-Tool in EXCEL

## 2.2 Analytische Methoden

Die neu gewonnenen, getrockneten und gesiebten Bodenproben wurden gemeinsam mit den im Herbst 2019 vom Land NÖ überlassenen Archivproben der Erstaufnahme im Probenlager des Instituts für Bodenforschung am Standort Tulln eingelagert und systematisch registriert. Für die Analytik wurden laufend Teilproben entnommen und sowohl die Archiv- als auch die Neuproben auf folgende Kennwerte untersucht:

- Ofentrockenfaktor, pH ( $\text{CaCl}_2$ ) (ÖNORM EN 15933)
- Anorganischer Kohlenstoff (TIC), Organischer Kohlenstoff (TOC)
- Schwermetalle und Arsen im Königswasseraufschluss
- Amorphe Oxide und Hydroxides des Eisens und Aluminiums (Feo und Alo) mittels Ammoniumoxalat-Extraktion (modifizierte Methode nach Loeppert und Inskeep, 1996; vgl. Wenzel et al., 2023)

Der organische Kohlenstoff (OC) wurde an zuvor gemahlene Bodenproben mit einem Totalanalysator mit Temperaturrampenfunktion (solu TOC cube, ELEMENTAR) als Summe der Konzentrationen des im engeren Sinne organischen Kohlenstoffs (400 °C) und des residualen C (550 °C) bestimmt (TOC), der anorganische (carbonatische) Kohlenstoff mit derselben Methode bei 950 °C. Das Calciumcarbonatäquivalent (Carbonatgehalt) wurde aus dem anorganischen C (TIC) mit Hilfe des stöchiometrischen Verhältnisses zwischen  $\text{CaCO}_3$  und C (100:12) berechnet. Alle Kohlenstoffdaten wurden mit Hilfe des Ofentrockenfaktors (105°C) auf ofentrockenen Boden bezogen.

Zur Bestimmung der annähernden Gesamtkonzentrationen der Schwermetalle und Arsen wurden die Bodenproben mit Königswasser aufgeschlossen (ÖNORM EN ISO 54321). Die Messung erfolgte abhängig von der erwarteten Konzentration mittels ICP-OES bzw. ICP-MS.

Die Ergebnisse werden laufend in Form einer Datenbank (EXCEL Version 16.0) für weitere Anwendungen dokumentiert.

### 2.3 Auswerteverfahren und Statistik

Die Auswertungen erfolgten unter Verwendung der im Rahmen des Projekts generierten Daten der 2022 wieder beprobten BZI-Standorte und den aus früheren Probenahme-Kampagnen (2015 – 2020) stammenden Daten von Profilstandorten der österreichischen Bodenkartierung im Projektgebiet. Die Einbeziehung bereits vorhandener Daten erfolgte im Hinblick auf eine bessere statistische Absicherung der Ergebnisse.

Als Indikator der Bodengesundheit hinsichtlich der Versorgung mit organischem Kohlenstoff wurde das Verhältnis zwischen organischem Kohlenstoff ( $\text{g C kg}^{-1}$ ) und Tonanteil ( $\text{g kg}^{-1}$ ) berechnet (SOC:Ton-Verhältnis). Über Korrelationen des SOC:Ton-Verhältnisses mit Kennwerten der Bodenstruktur wurden von Johannes et al. (2017) SOC:Ton-Verhältnisse von  $> 1/8$  ( $> 0,13$ ) als „sehr gut“, zwischen  $1/10$  ( $0,1$ ) und  $1/8$  als „gut“, zwischen einem  $1/13$  ( $0,08$ ) und  $1/10$  als moderat degradiert, und  $< 1/13$  als degradiert eingestuft. Diese Kalibration erfolgte an Böden der Westschweiz und wurde für Böden in England und Wales bestätigt (Prout et al., 2020). Als Zielwert wird in beiden Arbeiten ein SOC:Ton-Verhältnis  $> 1/8$  ( $> 0,13$ ) angegeben.

Für deskriptive Statistiken wurden Mittelwerte, Mediane, Standardabweichungen, Quartile, Minima und Maxima berechnet. Der Gesamtdatensatz und Teildatensätze (nach Landnutzung, Haupt- bzw. Kleinproduktionsgebieten) wurden mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov Test auf Normalverteilung geprüft.

Bei der Berechnung zeitlicher Änderungen des organischen Kohlenstoffs wurden SOC-Konzentrationen  $> 100 \text{ g kg}^{-1}$  ausgeschlossen. Die Prüfung der statistischen Signifikanz zeitlicher Veränderungen des organischen Kohlenstoffs (SOC) zwischen den beiden Probenahmeterminen erfolgte mittels t-Test, auch wenn die zeitlichen Unterschiede ( $\Delta\text{SOC}$ ) moderate Abweichungen von einer Normalverteilung gemäß Kolmogorov-Smirnov Test aufwiesen, da bei Probenzahlen  $> 35$  der t-Test als ausreichend robust gilt. Zeitliche Unterschiede bei den Metallen und Metalloiden wurden aufgrund der meist großen Abweichung von der Normalverteilung mittels des Wilcoxon-Tests geprüft.

Einflussfaktoren der Kohlenstoffstabilisierung und -speicherung in den Böden wurden nach Prüfung der Voraussetzungen mittels multiplen Regressionsmodellen identifiziert. In einem Top-Down-Ansatz wurde ausgehend von einem Modell mit den unabhängigen Variablen (Einflussfaktoren) mittlerer Jahresniederschlag (MAP), mittlere Jahrestemperatur (MAT), pH-Wert, Carbonatgehalt, Tonanteil, sowie amorphe Hydroxide / Oxide des Eisens ( $\text{Fe}_o$ ) und Aluminiums ( $\text{Al}_o$ ) schrittweise jene Variablen eliminiert, welche keinen wesentlichen Beitrag zur Erklärung der Gesamtvariant leisteten bzw. deren Regressionskoeffizienten nicht dem geforderten Signifikanzniveau ( $p \leq 0,05$ ) entsprachen.

Tabellen und Grafiken wurden mit Hilfe von EXCEL 16.0 erstellt. Statistische Auswertungen erfolgten ebenfalls mit Standardfunktionen und eigenen Berechnungen in EXCEL 16.0.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Klima- und Bodenkennwerte

#### 3.1.1. Unterschiede zwischen Hauptproduktionsgebieten

Die mittlere Seehöhe an den untersuchten BZI-Standorten im Industrieviertel beträgt  $350 \pm 193$  m, variiert jedoch zwischen den Hauptproduktionsgebieten deutlich zwischen  $212 \pm 51$  (HPG 8 – Nordöstliches Flach- und Hügelland) und  $620 \pm 139$  (HPG 3 – Bucklige Welt) m. Der Wienerwald (HPG 2) nimmt mit einer mittleren Seehöhe von  $431 \pm 97$  eine Mittelstellung ein (Tabelle 1). Mit steigender Seehöhe sinken erwartungsgemäß die mittleren Jahrestemperaturen (MAT) während die Jahresniederschläge (MAP) steigen (Tabelle 1).

Die Hauptproduktionsgebiete unterscheiden sich klar hinsichtlich der dominanten Ausgangsmaterialien der Bodenbildung. Das Ausgangsmaterial des KPG 8 wird von meist feinen, kalkhaltigen Schwemmmaterialien oder anderen Feinsedimenten dominiert, KPG 2 von Ton, Schluff- und Sandsteinen der Flyschzone, KPG 3 von kristallinen Schiefen und Gneis. Diese verschiedenartigen Ausgangsmaterialien tragen wesentlich zur unterschiedlichen Bodentextur in den Hauptproduktionsgebieten bei, wobei sich KPG 3 mit einem hohem Sand- ( $425 \pm 97$  g kg<sup>-1</sup>) und geringem Tonanteil ( $107 \pm 41$  g kg<sup>-1</sup>) von den beiden anderen Produktionsgebieten deutlich absetzt. Letztere weisen etwa halb so hohe Sand- und doppelt so hohe Tonanteile auf. Der Schluffanteil liegt in allen drei Hauptproduktionsgebieten zwischen etwa 450 und 525 g kg<sup>-1</sup> (Tabelle 1).

Die drei Hauptproduktionsgebiete unterscheiden sich deutlich im mittleren Carbonatgehalt; dieser steigt in der Reihenfolge HPG 3 ( $11 \pm 65$  g CaCO<sub>3</sub>-Äquivalent kg<sup>-1</sup>) < HPG 2 ( $59 \pm 137$  g CaCO<sub>3</sub>-Äquivalent kg<sup>-1</sup>) < HPG 8 ( $227 \pm 177$  g CaCO<sub>3</sub>-Äquivalent kg<sup>-1</sup>) (Tabelle 1). Die Böden der Buckligen Welt (HPG 3) sind im Einklang mit dem Ausgangsmaterial (kristalline Schiefer und Gneis) weitgehend frei von Carbonaten, dies gilt auch für den Großteil der meist auf Carbonat-armen bzw. -freien Sedimentgesteinen der Flyschzone entstandenen Böden im Wienerwald (HPG 2). Demgegenüber weisen die Böden des Flach- und Hügellandes (HPG 8) mit wenigen Ausnahmen erhebliche Carbonatgehalte auf.

Die unterschiedlichen Carbonatgehalte in den Hauptproduktionsgebieten stehen in guter Übereinstimmung mit dem Grad der Bodenversauerung, welcher durch die Messung der pH-Werte erfasst wurde. Diese nehmen in der Reihenfolge HPG 3 ( $5,50 \pm 0,73$ ) < HPG 2 ( $6,87 \pm 0,94$ ) < HPG 8 ( $7,46 \pm 0,28$ ) zu (Tabelle 1; Werte zu Beginn der Beobachtungsperiode). Dementsprechend sind die Böden als mäßig sauer (HPG 3), schwach sauer (HPG 2) bzw. schwach alkalisch (HPG 8) einzustufen (Amelung et al., 2018).

Die Konzentration amorpher Aluminiumhydroxide und -oxide (Al<sub>o</sub>) liegt in allen Hauptproduktionsgebieten zwischen etwa 950 und 1300 g Al kg<sup>-1</sup>, jene der amorphen Eisenhydroxide und -oxide (Fe<sub>o</sub>) in HPG 2 und 3 bei ca. 3000 g Fe kg<sup>-1</sup>, in HPG 8 hingegen nur bei etwa einem Drittel dieses Wertes (Tabelle 1). Dieser Unterschied könnte einerseits auf unterschiedliche Eisenkonzentrationen im Ausgangsmaterial, andererseits auf die gehemmte Verwitterung im trocken-warmen Klima des HPG 8 (Tabelle 1) zurückzuführen sein. Letztere ist vermutlich auch durch den hohen Carbonatgehalt (Tabelle 1) und die damit verbundene hohe Pufferkraft der Böden gegenüber Säureinträgen bedingt.



Die mittleren Konzentrationen des organischen Kohlenstoffs waren zu Beginn der Beobachtungsperiode ( $\text{SOC}_A$ ) im KPG 3 mit  $27,4 \pm 9,5 \text{ g C kg}^{-1}$  geringer als in den beiden anderen Hauptproduktionsgebieten (jeweils  $31,7 \text{ g C kg}^{-1}$ ). Dies steht vermutlich in Zusammenhang mit der geringeren Sättigungskapazität der durch hohen Sand- und geringen Tonanteil (Tabelle 1) geprägten Böden in der Buckligen Welt (HPG3) (Wenzel et al., 2022b).

Die Anteile der Bodentypen bzw. -typengruppen an den wieder beprobten Standorten der NÖ Bodenzustandsinventur in den drei Hauptproduktionsgebieten des Industrieviertels sind in Abbildung 3 dargestellt. Nur die Braunerden werden aufgrund ihrer Häufigkeit auf Subtypenebene unterschieden. Das NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8) unterscheidet sich deutlich von den beiden anderen Hauptproduktionsgebieten. Seine Bodendecke wird dominiert von Tschernosemen und Feuchtschwarzerden, jene des Wienerwalds (HPG 2) und der Buckligen Welt (HPG 3) hingegen von – meist carbonatfreien – Braunerden. Kennzeichnend für HPG 2 ist zudem, bedingt durch die oft bindigen Böden und relativ hohe Niederschläge (Tabelle 1), ein beträchtlicher Anteil von Pseudogleyen. Das weitgehende Fehlen von Verwitterungshorizonten (B-Horizonten) in HPG 8 kann auf die geringen Niederschläge (Tabelle 1) zurückgeführt werden, da für Verwitterungs- und Auswaschungsprozesse ausreichend Bodenfeuchte erforderlich ist.

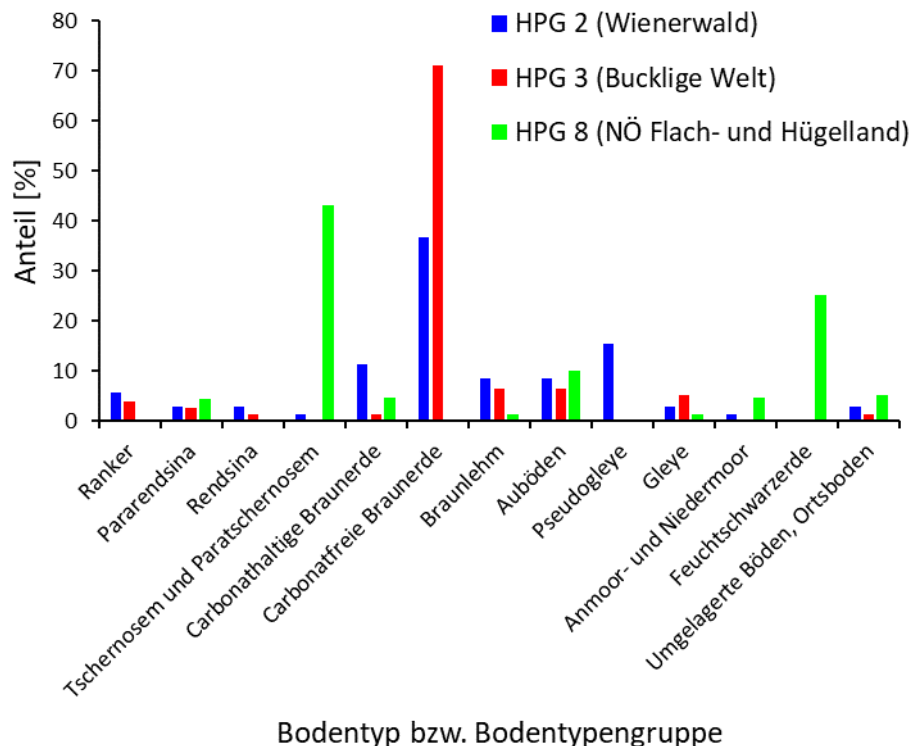


Abbildung 3 Anteil von Bodentypen bzw. Bodentypengruppen (Nomenklatur gemäß Nestroy et al., 2011) an den Untersuchungsstandorten in den drei Hauptproduktionsgebieten des Industrieviertels

Tabelle 1 Deskriptive Statistik der Klima- und Bodendaten für das gesamte Untersuchungsgebiet (Industrieviertel) sowie die Haupt- und Kleinproduktionsgebiete. Angegeben werden jeweils Mittelwerte (ober Zeile) und Standardabweichungen (unter Zeile)

HPG <sup>1)</sup>	KPG <sup>2)</sup>	Bezeichnung	Anzahl	Seehöhe m	MAT <sup>3)</sup> mm	MAP <sup>4)</sup> °C	Sand g kg <sup>-1</sup>	Schluff g kg <sup>-1</sup>	Ton g kg <sup>-1</sup>	Al <sub>o</sub> <sup>5)</sup> mg kg <sup>-1</sup>	Fe <sub>o</sub> <sup>6)</sup> mg kg <sup>-1</sup>	Carbonat g kg <sup>-1</sup>	pH <sub>A</sub> <sup>7)</sup>	SOC <sub>A</sub> <sup>8)</sup> g kg <sup>-1</sup>	pH <sub>E</sub> <sup>9)</sup>	SOC <sub>E</sub> <sup>10)</sup> g kg <sup>-1</sup>
Alle		Industrieviertel	377	350	8,87	681	281	503	215	1051	1852	152	6,87	30,8	6,82	33,9
				193	1,03	139	148	105	110	524	1732	180	0,94	22,2	1,05	23,8
2		Wiener Wald	71	431	8,06	814	280	525	195	946	2791	59	6,42	31,7	6,26	36,8
				97	0,48	106	136	94	91	404	2808	137	0,76	18,2	0,81	22,6
	207	Westlicher Wienerwald	19	480	7,66	928	323	493	185	893	2670	29	5,88	30,6	6,00	36,8
				102	0,55	130	145	91	72	382	925	94	0,61	15,7	0,61	14,1
	208	Östlicher Wienerwald	26	353	8,37	759	196	552	252	1130	3155	32	6,38	33,9	6,04	43,1
				84	0,36	59	114	92	77	424	1514	100	0,65	14,6	0,79	17,6
	209	Thermenrand	26	419	8,04	784	334	521	145	801	2520	108	6,85	30,3	6,68	30,6
				50	0,27	44	109	92	88	336	4379	179	0,71	23,0	0,83	29,9
3	307	Bucklige Welt	76	620	7,43	850	425	469	107	1280	3066	11	5,50	27,4	5,41	29,4
				139	0,67	89	97	81	41	527	1315	65	0,73	9,5	0,99	14,4
8		Nordöstliches Flach- und Hügelland	230	212	9,60	584	235	508	256	1010	1162	227	7,46	31,7	7,46	34,4
				51	0,29	39	135	113	105	537	821	177	0,28	26,0	0,34	26,4
	809	Wiener Boden	165	183	9,72	569	209	526	264	1063	1251	216	7,47	32,8	7,48	34,6
				20	0,10	18	125	116	98	535	891	171	0,28	29,2	0,32	29,1
	810	Gumpoldskirchen	33	244	9,34	619	234	463	303	786	953	239	7,40	25,4	7,30	32,5
				53	0,43	67	85	78	104	381	475	175	0,39	9,9	0,47	14,3
	811	Steinfeld	32	274	9,23	628	367	462	171	926	882	270	7,50	32,8	7,49	35,4
				40	0,32	24	152	104	97	604	553	201	0,12	18,0	0,13	20,7

<sup>1)</sup> Hauptproduktionsgebiet

<sup>2)</sup> Kleinproduktionsgebiet

<sup>3)</sup> Mittlere Jahrestemperatur

<sup>4)</sup> Mittlerer Jahresniederschlag

<sup>5)</sup> Ammoniumoxalat-extrahierbares (amorphes) Aluminium

<sup>6)</sup> Ammoniumoxalat-extrahierbares (amorphes) Eisen

<sup>7)</sup> pH(CaCl<sub>2</sub>) zu Beginn der Monitoringperiode

<sup>8)</sup> Organischer Kohlenstoff zu Beginn der Monitoringperiode

<sup>9)</sup> pH(CaCl<sub>2</sub>) am Ende der Monitoringperiode

<sup>10)</sup> Organischer Kohlenstoff am Ende der Monitoringperiode

Tabelle 2 Deskriptive Statistik der Klima- und Bodendaten getrennt nach Acker- und Grünlandnutzung für das gesamte Untersuchungsgebiet (Industrieviertel) sowie die Hauptproduktionsgebiete. Angegeben werden jeweils Mittelwerte (ober Zeile) und Standardabweichungen (unter Zeile)

HPG <sup>1)</sup>	Bezeichnung	Nutzung <sup>2)</sup>	Anzahl	Seehöhe m	MAT <sup>3)</sup> mm	MAP <sup>4)</sup> °C	Sand g kg <sup>-1</sup>	Schluff g kg <sup>-1</sup>	Ton g kg <sup>-1</sup>	Al <sub>o</sub> <sup>5)</sup> mg kg <sup>-1</sup>	Fe <sub>o</sub> <sup>6)</sup> mg kg <sup>-1</sup>	Carbonat g kg <sup>-1</sup>	pH <sub>A</sub> <sup>7)</sup>	SOC <sub>A</sub> <sup>8)</sup> g kg <sup>-1</sup>	pH <sub>E</sub> <sup>9)</sup>	SOC <sub>E</sub> <sup>10)</sup> g kg <sup>-1</sup>
Alle	Industrieviertel	Acker	269	305	9,16	640	272	498	229	1016	1449	175	7,12	28,0	7,07	29,9
				177	0,86	111	143	102	105	498	1049	185	0,77	17,5	0,89	17,3
		Grünland	55	529	7,81	842	318	528	154	1176	3080	58	5,84	38,5	5,85	45,2
				157	0,97	147	177	124	98	627	1494	142	0,94	24,2	1,17	28,7
2	Wiener Wald	Acker	34	405	8,09	794	324	498	179	749	1846	66	6,60	23,5	6,45	27,6
				84	0,39	74	124	96	90	256	875	137	0,78	9,0	0,83	12,7
		Grünland	24	492	7,85	875	233	556	211	1184	3253	101	5,97	39,4	5,89	44,9
				86	0,56	134	141	86	91	432	1362	150	0,61	15,2	0,67	17,8
3	Bucklige Welt	Acker	37	617	7,62	822	413	466	121	1289	2855	7	5,72	25,4	5,46	24,9
				137	0,61	72	86	69	44	535	1153	39	0,71	8,2	0,89	6,9
		Grünland	22	648	7,15	892	450	464	86	1297	3366	24	5,17	30,1	5,22	37,5
				170	0,73	100	113	96	28	583	1565	110	0,72	11,9	1,24	21,0
8	Nordöstliches Flach- und Hügelland	Acker	198	208	9,63	579	237	505	257	1009	1108	225	7,47	29,3	7,48	31,2
				48	0,24	31	135	108	100	498	772	182	0,26	19,6	0,31	19,1
		Grünland	9	302	9,31	634	220	609	171	868	1886	225	7,16	56,4	7,27	65,1
				27	0,58	91	198	193	130	1084	1262	191	0,58	48,5	0,75	53,5

<sup>1)</sup> Hauptproduktionsgebiet

<sup>2)</sup> Andere Nutzungsarten und Nutzungsänderungen nicht berücksichtigt

<sup>3)</sup> Mittlere Jahrestemperatur

<sup>4)</sup> Mittlerer Jahresniederschlag

<sup>5)</sup> Ammoniumoxalat-extrahierbares (amorphes) Aluminium

<sup>6)</sup> Ammoniumoxalat-extrahierbares (amorphes) Eisen

<sup>7)</sup> pH(CaCl<sub>2</sub>) zu Beginn der Monitoringperiode

<sup>8)</sup> Organischer Kohlenstoff zu Beginn der Monitoringperiode

<sup>9)</sup> pH(CaCl<sub>2</sub>) am Ende der Monitoringperiode

<sup>10)</sup> Organischer Kohlenstoff am Ende der Monitoringperiode

### 3.1.2. Unterschiede zwischen Nutzungsarten

Generell konzentrieren sich im Industrieviertel die Grünlandstandorte auf höhere und damit kühlfeuchtere Lagen. Dies gilt auch in den einzelnen Hauptproduktionsgebieten (Tabelle 2). Im Wienerwald (HPG 2) sind Grünlandböden tendenziell eher auf tonreicheren Standorten zu finden, dies steht im Einklang mit der Neigung zu Tagwasserstau (vgl. den relativ hohen Anteil an Pseudogleyen, Abbildung 3) in dieser Region. In den beiden anderen Hauptproduktionsgebieten ist dies umgekehrt, da aufgrund des trockenen Klimas (HPG 8) bzw. der aufgrund des meist hohen Sandanteils geringen Wasserspeicherkapazität (HPG 3) (Tabelle 1, Tabelle 2) Ackerböden bevorzugt auf den speicherfähigeren Standorten mit höherem Tonanteil zu finden sind. Bewirtschaftungsbedingt weisen die Grünlandböden in allen Hauptproduktionsgebieten deutlich geringere pH-Werte auf, die Konzentrationen an organischem Kohlenstoff sind hingegen deutlich höher als unter Ackernutzung (Tabelle 2). Interessant ist die durchwegs deutlich höhere Konzentration an Fe<sub>o</sub> in den Grünlandböden, welche sich zumindest teilweise mit intensiverer Verwitterung von Primärmineralen zu Oxiden und Hydroxiden des Eisens bei höheren Niederschlägen und im sauren Bodenmilieu (Tabelle 2) erklären lässt (Brunsdon, 1979).

## 3.2 Zeitliche Veränderungen von Bodenkenwerten

Die erste Beprobung der BZI-Standorte erfolgte im Zeitraum 1990 bis 1992, jene der Profilstandorte der österreichischen Bodenkartierung zwischen 1985 und 1997. Der Mittelwert der Jahreszahlen beider Probenahme-Kampagnen ist 1991. Die erneute Beprobung der BZI-Standorte im Rahmen des Projekts erfolgte 2022, jene der Profilstandorte der österreichischen Bodenkartierung zwischen 2015 und 2020 (Wenzel et al., 2022c). Der Mittelwert der Jahreszahlen der erneuten Probenahmen ist 2020. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse zu zeitlichen Veränderungen des Bodenzustands beziehen sich somit auf einen mittleren Beobachtungszeitraum von 29 Jahren, also nahezu drei Jahrzehnten.

### 3.2.1 Organischer Kohlenstoff

Seit der ersten Probenahme nahm die Konzentration des organischen Kohlenstoffs in den Böden des Industrieviertels im Mittel statistisch signifikant ( $p \leq 0,05$ ) von 28,1 auf 31,3 g C kg<sup>-1</sup> zu. Relativ zur Ausgangskonzentration entspricht dies einer Steigerung von 11,4 % (Tabelle 3). Noch deutlicher ist der mittlere Zuwachs an organischem Kohlenstoff in den Böden des Wiener Walds (KPG 2) um 15,9% von 30,2 auf 35,0 g C kg<sup>-1</sup> (Tabelle 3). Im NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8) liegt der Zuwachs etwa nahe jenem für das gesamte Industrieviertel, während in der Buckligen Welt (KPG 3) nur eine statistisch nicht signifikante Tendenz zur Zunahme um 7,3 % zu verzeichnen ist (Tabelle 3).

Die beobachtete Zunahme des organischen Kohlenstoffs unterscheidet sich auch deutlich nach Nutzungsart. Ausgehend von einem geringeren Niveau (27,0 g C kg<sup>-1</sup>) kam es im Beobachtungszeitraum unter Ackernutzung zu einer Steigerung um 7,8 % auf 29,1 g C kg<sup>-1</sup> (Tabelle 3). Die ohnehin bereits höheren Konzentrationen des organischen Kohlenstoffs unter Grünlandnutzung (34,4 g C kg<sup>-1</sup>) steigerten sich noch

deutlicher um 17,4 % auf 40,4 g C kg<sup>-1</sup> (Tabelle 3). Die Veränderungen unter beiden Nutzungsarten sind statistisch signifikant (Tabelle 3).

Die relativ deutlichen, konsistenten Zuwächse des organischen Kohlenstoffs in den Böden des Industrieviertels stehen weitgehend im Gegensatz zu Ergebnissen aus anderen europäischen Regionen. So fanden Bellamy et al. (2005) in der Periode 1978 bis 2003 deutliche Abnahmen der Konzentrationen des organischen Kohlenstoffs in Oberböden (0 – 15 cm) von England und Wales. Allerdings waren davon vor allem Moor- und Hochlandböden mit hohen SOC-Konzentrationen betroffen, welche im Industrieviertel nur eine geringe Rolle spielen. Zudem wurden in der vorliegenden Studie Böden mit SOC-Konzentrationen > 100 g C kg<sup>-1</sup> ausgeschlossen, um Verzerrungen durch einzelne hohe Werte (Ausreißer) zu vermeiden. In landwirtschaftlich genutzten Oberböden (Acker 0 – 15 cm; Grünland 0 – 10 cm) Bayerns wurde in der Periode 1986 bis 2007 ebenfalls eine Abnahme der SOC-Konzentrationen gefunden (Capriel, 2013). In südbelgischen Oberböden (Pflughorizont unter Acker bzw. 0 – 30 cm unter Grünland) wurde zwischen 1955 und 2005 eine Abnahme der SOC-Konzentrationen unter Acker von 13,6 auf 11,2 g C kg<sup>-1</sup>, und eine Zunahme unter Grünland von 16,0 auf 21,9 g C kg<sup>-1</sup> beobachtet (Goidts & van Wesemael, 2007). Für Oberböden (0 – 20 cm) unter Ackernutzung in der Schweiz berichten Gubler et al. (2019) im Mittel stabile SOC-Konzentrationen im Beobachtungszeitraum 1990 bis 2014. In Oberböden (0 – 15 cm) unter Ackernutzung in Finnland kam es zwischen 1974 und 2009 zu einer Abnahme der SOC-Konzentrationen (Heikkinen et al., 2013). In Oberböden (0 – 25 cm) unter Ackernutzung wurde in mehreren Regionen im Südosten Norwegens ebenfalls eine Abnahme der SOC-Konzentrationen zwischen 1991 und 2001 gefunden (Riley & Bakkegard, 2006). Massive Abnahmen der SOC-Konzentration wurden in der Periode 1990 bis 2004 auch in Oberböden unter Acker (Pflughorizont) und Grünlandnutzung (0 – 30 cm) in Franche-Comté, einer Berglandregion in Frankreich festgestellt (Saby et al., 2008). In den Niederlanden wurde in Oberböden unter Acker- (0 – 25 cm) und Grünlandnutzung (0 – 5 cm) hingegen eine Zunahme der SOC-Konzentrationen zwischen 1984 und 2004 beobachtet (Reijneveld et al., 2009).

Der Vergleich mit Ergebnissen aus anderen europäischen Regionen zeigt, dass die beobachtete Zunahme der Konzentrationen der organischen Substanz in den Böden des Industrieviertels mit einem weitverbreiteten Trend zur Abnahme in Acker- und Grünlandböden in Europa kontrastiert. Neben unterschiedlichen Boden- und Klimaverhältnissen sowie Bewirtschaftungssystemen könnte dies auch auf den durch das Monitoring abgedeckten Zeitraum liegen. Das Ende der Beobachtungszeiträume lag bei fast allen Studien zwischen 2001 und 2005, nur bei drei zwischen 2007 und 2014. Die Ergebnisse für das Industrieviertel beziehen sich hingegen auf den Beobachtungszeitraum bis 2022 (Standorte der NÖ BZL) bzw. 2016 – 2020 (Standorte der österreichischen Bodenkartierung). Es ist also denkbar, dass die beobachteten Zunahmen der SOC-Konzentrationen im Industrieviertel auf relativ rezente Verbesserungen im Bodenmanagement zurückzuführen sind. Das Österreichische Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft (ÖPUL) startete wie vergleichbare Programme in anderen europäischen Ländern erst 1995, sodass mögliche positive Auswirkungen in früheren Beobachtungsperioden vermutlich noch nicht erkennbar waren.

Hingegen sind die Ergebnisse für das Industrieviertel konsistent mit den in anderen Regionen Niederösterreichs beobachteten Zunahmen der SOC-Konzentrationen (Wenzel et al., 2022b), und erweitern die Datenbasis des Bundeslandes räumlich und hinsichtlich der Anzahl der Standorte.

Tabelle 3 Veränderungen der Konzentrationen des organischen Kohlenstoffs in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung. Böden mit SOC-Konzentrationen  $\geq 100 \text{ g C kg}^{-1}$  wurden im Vergleich nicht berücksichtigt.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>4)</sup>	HPG 3 <sup>4)</sup>	HPG 8 <sup>4)</sup>	Acker	Grünland	
SOC <sub>A</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	28,1	30,2	27,4	27,7	27,0	34,4	
SOC <sub>E</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	31,3	35,0	28,4	30,8	29,1	40,4	
$\Delta$ SOC (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	3,2	4,8	2,0	3,1	2,1	6,0	
$\Delta$ SOC (% von SOC <sub>A</sub> )	11,4	15,9	7,3	11,2	7,8	17,4	
	Beobachtungen (n)	368	70	76	222	267	52
t-Test	t-Statistik	-5,6210425	-3,2114002	-1,4195289	-4,7449867	-3,9519364	-2,623164
	Kritischer t-Wert (zweiseitig)	1,96644895	1,99494542	1,99210215	1,97075627	1,96892232	2,00758377
	p-Wert	3,7621E-08	0,00200726	0,15988799	3,7426E-06	9,9396E-05	0,0114608

<sup>1)</sup> Konzentration des organischen Kohlenstoffs zu Beginn der Beobachtungsperiode

<sup>2)</sup> Konzentration des organischen Kohlenstoffs am Ende der Beobachtungsperiode

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration des organischen Kohlenstoffs während der Beobachtungsperiode

<sup>4)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Abbildung 4 zeigt die Kategorisierung der Böden des Industrieviertels hinsichtlich ihrer Versorgung mit organischem Kohlenstoff (SOC), gemessen mittels des SOC:Ton-Verhältnisses (SOC:clay ratio). Betrachtet man alle landwirtschaftlich genutzten Böden, fallen zu Beginn der Beobachtungsperiode 22,1 % in die Kategorie „degradiert“ und 14,1 % in die Kategorie „moderat“. Gemäß der diesem Konzept zugrunde liegenden Arbeit von Johannes et al. (2017) verfügen diese Böden aufgrund der zu geringen Konzentration an organischem Kohlenstoff über eine degradierte bzw. verbesserungswürdige Bodenstruktur, es sollten also Maßnahmen für eine bessere Versorgung mit organischer Substanz ergriffen werden. Das Ziel wäre ein SOC:Ton-Verhältnis  $> 0,1$  (Johannes et al., 2017). Zum Ende der Beobachtungsperiode lag der Anteil der Böden in den Kategorien „degradiert“ und „moderat“ bei 17,0 bzw. 16,0 % (Abbildung 4), es kam also im Vergleich zu ersten Probenahme zu einer Verringerung des Anteils von Böden unterhalb des Zielwerts von 0,1 um 3,2 %. Der Anteil „degradiertes“ Böden nahm um 6 % ab (Abbildung 4). Der Anteil von Böden mit „sehr gutem“ Zustand nahm in der Beobachtungsperiode von 45,2 % auf 51,9 %, also um 6,7 % zu (Abbildung 4).

Betrachtet man die Böden getrennt nach Landnutzungskategorien, zeigt sich ein stark differenziertes Bild. Während zu Beginn der Periode 43,5 % der Ackerböden unter dem Zielwert für das SOC:Ton-Verhältnis von 0,1 lagen, lag dieser Wert für Grünlandböden bei nur 5,4 % (Abbildung 4). Der Anteil von Böden mit „sehr gutem“ Zustand lag unter Ackernutzung bei 34,9 %, unter Grünland bei 89,1 % (Abbildung 4). Zum Ende der Beobachtungsperiode sank der Anteil der Böden unter dem Zielwert von 0,1 in beiden Landnutzungskategorien, ein relevanter Anstieg des Anteils mit „sehr guter“ Versorgung erfolgte bei den Ackerböden (Abbildung 4).

Die Ergebnisse zeigen, dass unter Ackernutzung ein wesentlicher Anteil ( $> 20 \%$ ) der Böden degradiert und damit deutlich vom Zielwert (SOC:Ton-Verhältnis  $\geq 0,1$ ) entfernt ist. Der im Juli 2023 vorgelegte Entwurf der Europäischen Kommission für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur

Bodenüberwachung und -resilienz (Bodenüberwachungsgesetz) sieht jedoch vor, dass bis 2050 alle Böden einen als „gesund“ betrachteten Zielwert des SOC:Ton-Verhältnisses von 1/8 (0,13) erreichen bzw. überschreiten sollten. Dieses Konzept beruht jedoch auf einer ungeprüften Anwendung der Kategorisierung nach Johannes et al. (2017), und ein Erreichen der Zielvorgabe erscheint auch im Hinblick auf den aktuellen Anteil degradierter Böden (Abbildung 4) ohne grundlegende Veränderungen der Bewirtschaftungssysteme unter Ackernutzung unrealistisch. Zudem ist die Gültigkeit der Kategorisierung noch für Böden anderer Regionen bzw. Klimate zu prüfen.

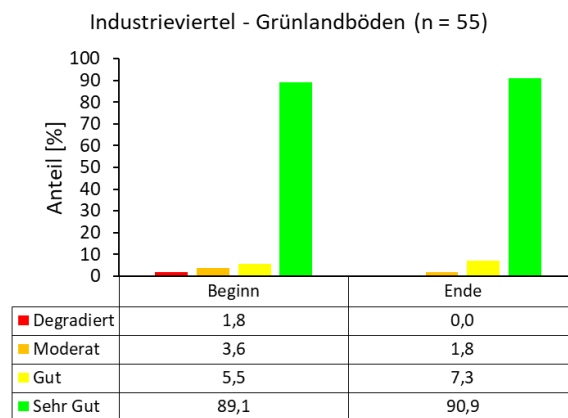
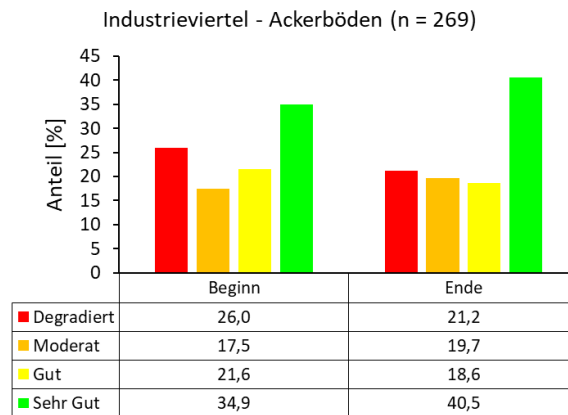
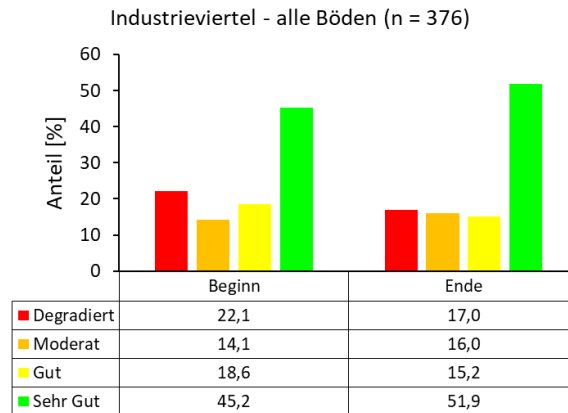


Abbildung 4 Anteil der Böden mit sehr gutem (SOC:clay ratio >0,13), gutem (0,10 – 0,13), moderatem (0,08 – 0,10) und degradiertem (< 0,08) Zustand bezüglich der Versorgung mit organischem Kohlenstoff gemäß der Kategorisierung nach Prout et al. (2021)

### 3.2.2 Bodenversauerung

Die Veränderungen der mittels pH-Wert erfassten Bodenversauerung während der Beobachtungsperiode war generell geringfügig und aus ökologischer Sicht irrelevant (Tabelle 1, Tabelle 2). Im gesamten Industrieviertel blieben die pH-Werte sowohl unter fortwährender Acker- als auch Grünlandnutzung stabil (Tabelle 2). Zu einer etwas deutlicheren Abnahme des pH-Werts von  $5,72 \pm 0,71$  auf  $5,46 \pm 0,89$  kam es nur in den Ackerböden der Buckligen Welt (HPG 3), diese kann jedoch aufgrund der zu geringen Zahl der Standorte nicht statistisch abgesichert werden (Tabelle 2).

### 3.2.3 Metalle und Metalloide

In den Tabelle 4 bis 13 sind die Mediane der annähernden Totalkonzentrationen von Metallen und Metalloiden in den Oberböden des Untersuchungsgebiets zusammengefasst. Neben den Konzentrationen zu Beginn und Ende der Beobachtungsperiode werden die absoluten und relativen Veränderungen im gesamten Gebiet (Industrieviertel), den einzelnen Hauptproduktionsgebieten sowie getrennt nach Acker und Grünlandnutzung ausgewiesen.

Generell können keine signifikanten ( $p < 0,05$ ) Veränderungen festgestellt werden. Nur bei Cd sind geringfügige, aber signifikante Abnahmen der Konzentration im gesamten Industrieviertel sowie in dessen Anteil am NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8) und in den Ackerböden des gesamten Gebietes festzustellen (Tabelle 5). Eine weitere signifikante Veränderung zeigt sich bei Molybdän in Grünlandböden, allerdings wird diese stark durch wenige BZI-Standorte mit ungewöhnlich hoher Zunahme beeinflusst. Dies dürfte auf den Einfluss der räumlichen Variabilität auf die Probenahme zurückzuführen sein, die sich hier aufgrund der geringen Zahl der Wiederholungen stark auf das Ergebnis auswirkt. Eine weitere Interpretation erscheint daher nicht sinnvoll.

Im Vergleich zur Erstaufnahme hat sich die Belastung mit Schwermetallen im Industrieviertel somit nicht wesentlich verändert. Wie auch in der Erstaufnahme überschreiten nur einzelne Standorte den allgemeinen Richtwert der ÖNORM L-1075, wobei dies teilweise auf lithogen erhöhte Konzentrationen zurückzuführen ist (Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 1994).



Tabelle 4. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Arsens in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
As <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	11,1	8,5	10,1	12,4	11,6	9,3
As <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	11,6	8,8	10,8	12,3	11,7	8,8
ΔAs (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	0,54	0,24	0,72	-0,06	0,07	-0,48
ΔAs (% von As <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	4,9	2,8	7,1	-0,5	0,6	-5,2
Beobachtungen (n)	214	37	50	127	161	30
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 5. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Cadmiums in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Cd <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	0,288	0,315	0,217	0,291	0,288	0,313
Cd <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	0,276	0,290	0,212	0,290	0,271	0,264
ΔCd (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	-0,012	-0,025	-0,006	-0,002	-0,016	-0,048
ΔCd (% von Cd <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	-4,3	-8,0	-2,5	-0,6	-5,7	-15,4
Beobachtungen (n)	218	38	53	127	163	31
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	sign.	n.s.	n.s.	sign.	sign.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 6. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Kobalts in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Co <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	8,679	9,830	10,241	8,329	8,631	9,857
Co <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	8,753	9,901	10,585	8,249	8,610	10,377
ΔCo (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	0,07	0,07	0,34	-0,08	-0,02	0,52
ΔCo (% von Co <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	0,8	0,7	3,4	-1,0	-0,2	5,3
Beobachtungen (n)	222	42	53	127	167	31
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 7. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Chroms in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Cr <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	33,161	37,655	28,534	32,849	32,849	38,674
Cr <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	31,143	40,331	26,136	30,305	31,203	41,863
ΔCr (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	-2,02	2,68	-2,40	-2,54	-1,65	3,19
ΔCr (% von Cr <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	-6,1	7,1	-8,4	-7,7	-5,0	8,2
Beobachtungen (n)	222	42	53	127	167	31
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 8. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Kupfers in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Cu <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	19,600	18,998	19,240	19,635	19,240	21,609
Cu <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	20,768	22,948	22,050	20,011	19,878	25,035
ΔCu (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	1,17	3,95	2,81	0,38	0,64	3,43
ΔCu (% von Cr <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	6,0	20,8	14,6	1,9	3,3	15,9
Beobachtungen (n)	198	39	39	120	153	24
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 9. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Molybdäns in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Mo <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	0,456	0,474	0,501	0,421	0,416	0,459
Mo <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	0,467	0,541	0,513	0,435	0,440	0,552
ΔMo (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	0,01	0,07	0,01	0,01	0,02	0,09
ΔMo (% von Cr <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	2,5	14,0	2,5	3,4	5,8	20,2
Beobachtungen (n)	201	37	50	114	148	29
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	sign.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 10. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Mangans in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Mn <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	523	697	550	479	513	694
Mn <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	510	620	543	478	506	587
ΔMn (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	-12,89	-76,78	-6,10	-1,28	-7,43	-107,49
ΔMn (% von Cr <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	-2,5	-11,0	-1,1	-0,3	-1,4	-15,5
Beobachtungen (n)	222	42	53	127	167	31
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 11. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Nickels in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Ni <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	22,5	25,2	19,4	22,1	22,7	25,2
Ni <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	22,3	27,4	21,8	21,9	22,3	25,9
ΔNi (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	-0,15	2,20	2,42	-0,24	-0,41	0,73
ΔNi (% von Cr <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	-0,7	8,7	12,5	-1,1	-1,8	2,9
Beobachtungen (n)	222	42	53	127	167	31
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 12. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Bleis in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Pb <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	21,1	23,9	18,3	20,8	20,3	22,9
Pb <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	20,6	23,2	18,9	20,2	19,3	24,2
ΔPb (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	-0,43	-0,68	0,66	-0,55	-1,00	1,30
ΔPb (% von Cr <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	-2,0	-2,9	3,6	-2,7	-4,9	5,7
Beobachtungen (n)	222	42	53	127	167	31
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

Tabelle 13. Veränderungen der annähernden Totalkonzentrationen des Zinks in den Oberböden des Industrieviertels, seiner Hauptproduktionsgebiete sowie bei unterschiedlicher Landnutzung.

	Industrie- viertel	HPG 2 <sup>5)</sup>	HPG 3 <sup>5)</sup>	HPG 8 <sup>5)</sup>	Acker	Grünland
Zn <sub>A</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	65,6	75,3	63,0	63,8	65,0	77,7
Zn <sub>E</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	67,6	79,2	70,9	65,7	65,8	83,9
ΔZn (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>3)</sup>	1,95	3,88	7,88	1,86	0,80	6,20
ΔZn (% von Cr <sub>A</sub> ) <sup>4)</sup>	3,0	5,1	12,5	2,9	1,2	8,0
Beobachtungen (n)	222	42	53	127	167	31
Shapiro Wilcoxon Test (p<0,05)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>1)</sup> Konzentration zu Beginn der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>2)</sup> Konzentration am Ende der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>3)</sup> Veränderung der Konzentration während der Beobachtungsperiode (Median des Gebietsmittels)

<sup>4)</sup> Median der Veränderung bezogen auf den Median der Ausgangskonzentration in %

<sup>5)</sup> Hauptproduktionsgebiete im Industrieviertel: Wienerwald (HPG 2), Bucklige Welt (HPG 3), NÖ Flach- und Hügelland (HPG 8)

### 3.3 Einflussfaktoren des Bodenzustands und dessen zeitlicher Veränderung

Die Bodenentwicklung und damit der Bodenzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt werden von den Faktoren der Bodenbildung bestimmt. Die grundlegende Theorie dazu wurde bereits von Jenny (1941) entwickelt. Die Bodenbildung ( $s$ ) ist demnach eine Funktion der Hauptfaktoren Klima ( $cl$ ), Topographie ( $r$ ), Ausgangsmaterial ( $p$ ), Organismen ( $o$ ) und Zeit ( $t$ ):

$$s = f(cl, r, p, o, t)$$

Eine weitere Differenzierung kann durch den Einfluss des Menschen, insbesondere die Art der Landnutzung erfolgen.

Ähnliche Faktorenmodelle werden auch auf spezifischere Fragestellungen wie die Speicherung organischer Substanz angewandt. Zur Erklärung der Ausstattung von Böden mit organischem Kohlenstoff kommt den Einflussgrößen je nach Größe der Region unterschiedliche Bedeutung zu (Wiesmeier et al., 2019). Die Fläche des Industrieviertels entspricht etwa der sub-regionalen bis regionalen Größenordnung ( $\sim 10^8 - 10^9 \text{ m}^2$ ). Nach Wiesmeier sind hier neben Klima, Vegetation und Ausgangsmaterial die Bodentextur und die Landnutzung als wesentliche Faktoren der Speicherung organischen Kohlenstoffs im Boden zu erwarten. Für Waldböden in vier niederösterreichischen Regionen konnten wir jedoch zuletzt zeigen, dass auch in diesem Skalenbereich physikochemischen Bodenfaktoren eine größere Bedeutung zukommt, als z.B. dem Klima (Bösch et al., 2023).

Für das Industrieviertel wurden daher mittels Top-Down Approach multiple Regressionsmodelle auf ihr Erklärungspotenzial geprüft. Ausgehend von einem umfassenderen Set von Faktoren (MAP, MAT, Carbonat, pH, Tonanteil,  $Al_o$ ,  $Fe_o$ ) wurden schrittweise jene Faktoren eliminiert, deren Regressionskoeffizienten nicht dem geforderten Signifikanzniveau ( $p \leq 0,05$ ) entsprachen. Das resultierende Modell (Tabelle 14) erklärt 34 % der Gesamtvarianz mit den chemischen Bodenfaktoren pH,  $Al_o$  und  $Fe_o$  (Tabelle 1). Ein wesentlicher Teil der nicht erklärten Varianz ist vermutlich auf den Einfluss der Landnutzung (Acker bzw. Grünland) und einen Fehlerterm zurückzuführen.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Stabilisierung organischer Substanz im Boden einerseits von der Sorption an amorphe Oxide und Hydroxide des Aluminiums ( $Al_o$ ) und Eisens ( $Fe_o$ ), andererseits vom Säuregrad des Bodens kontrolliert wird. Dies steht im Einklang mit Ergebnissen für globale und kontinentale Datensätze (Rasmussen et al., 2018). Die Bedeutung von  $Al_o$  für die Stabilisierung organischer Substanz wurde zudem von Bösch et al. (2023) für Waldböden niederösterreichischer Regionen und von Wenzel et al. (2023) für Böden unter Acker und Bodenschutzanlagen im Weinviertel (HPG 8 nördlich der Donau) gezeigt. Im Gegensatz dazu betrachtet der Großteil der bisherigen Literatur zu diesem Thema den Tonanteil als maßgeblichen Faktor der Stabilisierung und Speicherung organischer Substanz (vgl. u.a. Wiesmeier et al., 2019; Wenzel et al., 2022b). Die zunehmende Evidenz dafür, dass amorphe Oxide und Hydroxide des Aluminiums und Eisens die Stabilisierung organischer Substanz wesentlich besser als der Tonanteil erklären, ist wohl auch auf die aufwändigere Analytik dieser Substanzen zurückzuführen, weshalb nur wenige Datensätze mit Informationen dazu zur Verfügung stehen. Der positive Einfluss des pH-Werts könnte einerseits mit dessen Bedeutung als Schlüsselvariable zahlreicher physikochemischer Prozesse im Boden (Rasmussen et al., 2018), andererseits mit höherer mikrobieller Aktivität und

Mineralisierung zu kleineren, hydrophilen Molekülen mit stärkerer Affinität zu den geladenen Oberflächen im Boden (Bösch et al., 2023; Lehmann et al., 2015; Liang et al, 2017) erklärt werden.

*Tabelle 14 Regressionsmodell zur Erklärung der Konzentrationen des organischen Kohlenstoffs im Untersuchungsgebiet (alle Landnutzungskategorien)*

<i>Regressions-Statistik</i>	
Multipler Korrelationskoeffizient	0,58
Bestimmtheitsmaß	0,34
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,34
Standardfehler	17,9
Beobachtungen	358

<i>ANOVA</i>					
	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>	<i>Prüfgröße (F)</i>	<i>F krit</i>
Regression	3	58518	19506	60,98	8,33E-32
Residue	354	113227	320		
Gesamt	357	171745			

	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>P-Wert</i>
Schnittpunkt	-68,18	10,60655293	-6,428	4,19E-10
pH	10,21	1,374946604	7,423	8,61E-13
Al <sub>o</sub>	0,0167	0,002136088	7,828	5,81E-14
Fe <sub>o</sub>	0,0062	0,001107512	5,560	5,33E-08

## 4. Ausblick

Die Daten zur potentiellen Belastung der Böden mit Metallen und Metalloiden werden zurzeit ausgewertet und im nächsten Projektbericht dargestellt und interpretiert.

## 5. Literatur

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, b.-M. (2018): Scheffer/ Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Auflage, Springer Spektrum, 749 S.

Amt der NÖ Landesregierung (1994): Niederösterreichische Bodenzustandsinventur. Wien, 220 S.

Bellamy, P.H., Loveland, P.J., Bradley, R.I., Lark, M.R., Kirk, G.J.D. (2005): Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. Nature 437, 245 – 248. doi:10.1038/nature04038

Bösch, R.M., Laux, M., Wenzel, W.W. (2023): Pedogenic controls of soil organic carbon stocks and stability beneath montane Norway spruce forests along a precipitation gradient. Heliyon 9, e21284. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21284>

- Brunsdon, D. (1979): Weathering, in Embleton, C., Thornes, J. (Eds), Processes in Geomorphology. Edward Arnold Lmt., London, U.K., 73 – 129.
- Capriel, P. (2013): Trends in organic carbon and nitrogen contents in agricultural soils in Bavaria (south Germany) between 1986 and 2007. *European Journal of Soil Science* 64, 445–454. doi: 10.1111/ejss.12054
- Goidts, E., van Wesemael, B. (2007): Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955–2005). *Geoderma* 141, 341–354. doi:10.1016/j.geoderma.2007.06.013
- Gubler, A., Wächter, D., Schwab, P., Müller, M., Keller, A. (2019): Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends. *Environmental Monitoring & Assessment* 191, 277. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7435-y>
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V., Regina, K. (2013): Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global Change Biology*, 19, 1456–1469. doi: 10.1111/gcb.12137
- Jenny, H. (1941): Factors in soil formation. McGraw-Hill, New York, 281 S.
- Johannes, A., Mattera, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P.C., Boivin, P. (2017): Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- Lehmann, J., Kleber, M. (2015): The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528, 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>.
- Liang, C., Schimel, J.P., Jastrow, J.D. (2017): The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage, *Nat. Microbiol.* 2, 17105. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105>.
- Loeppert, R.H., Inskeep, W.P. (1996): Iron, in: J.M. Bartels (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 3. Chemical Methods*, Soil Science Society of America, Inc; American Society of Agronomy, Inc, Madison, Wisconsin, USA, 1996, 639–664.
- Nestroy, O., Aust, G., Blum, W.E.H., Englisch, M., Hager, H., Herzberger, E., Kilian, W., Nelhiebel, P., Ortner, G., Pecina, E., Pehamberger, A., Schneider, W., Wagner, J. (2011): Systematische Gliederung der Böden Österreichs. *Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft* 79, 98 S.
- ÖNORM EN ISO 54321: Boden, behandelter Bioabfall, Schlamm und Abfall - Aufschluss von mit Königswasser löslichen Anteilen von Elementen (ISO 54321:2020).
- ÖNORM EN 15933: Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden - Bestimmung des pH-Werts.
- ÖNORM L-1075: Grundlagen für die Bewertung der Gehalte ausgewählter chemischer Elemente in Böden (2017 11 01).
- Prout, J.M., Shepherd, K.D., McGrath, S.P., Kirk, G.J.D., Haefele, S.M. (2020): What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio. *European Journal of Soil Science* 72, 2493–2503. DOI: 10.1111/ejss.13012
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W.R., Keiluweit, M., Lawrence, C.R., Berhe, A.A., Blankinship, J.C., Crow, S.E., Druhan, J.L., Hicks Pries, C.E., Marin-Spiotta, E., Plante, A.F., Schädel, C., Schimel, J.P., Sierra, C.A., Thompson,



- A., Wagai, R. (2018): Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry* 137, 297–306. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>
- Reijneveld, A., van Wensem, J., Oenema, O. (2009): Soil organic carbon contents of agricultural land in the Netherlands between 1984 and 2004. *Geoderma* 152, 231–238. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.007
- Riley, H., Bakkegard, M. (2006): Declines of soil organic matter content under arable cropping in southeast Norway, *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 56, 217-223. DOI: 10.1080/09064710510029141
- Saby, N. P. A., Arrouays, D., Antoni, V., Lemerrier, B., Follain, S., Walter, C., Schwartz, C. (2008): Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990–2004. *Soil Use and Management* 24, 254–262. doi: 10.1111/j.1475-2743.2008.00159.x
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lütow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J., Kögel-Knabner, I. (2019): Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333, 149–162. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.026.
- Wenzel, W.W., Holzinger, C., Golestanifard, A., Duboc, O. (2022a): Regionale Kohlenstoffinventuren in Böden des NÖ Zentralraums und des Waldviertels. Ergebnisbericht um Landschaftsfondprojekt ABB-LEBO-746/0002.
- Wenzel, W.W., Duboc, O., Golestanifard, A., Holzinger, C., Mayr, K., Reiter, J. & Schiefer, A. (2022b): Soil and land use factors control organic carbon status and accumulation in agricultural soils of Lower Austria. *Geoderma* 409, Article 115595. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115595>
- Wenzel, W.W., Holzinger, C., Golestanifard, A., Duboc, O. (2022c): NÖ Bodenzustandsinventur: Aktualisierung und Überprüfung von Veränderungen in agrarisch genutzten Böden. Ergebnisbericht zum Landschaftsfondsprojekt LEBO-526/0001. Universität für Bodenkultur, Tulln an der Donau.
- Wenzel, W.W., Philipsen, F.N., Herold, L., Kingsland-Mengi, A., Laux, M., Golestanifard, A., Strobel, B.W., Duboc, O. (2023): Carbon sequestration potential and fractionation in soils after conversion of cultivated land to hedgerows. *Geoderma* 435, 116501. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116501>