



HOCHSCHULE
NEUBRANDENBURG
University of Applied Sciences

Freie wissenschaftliche Arbeit
zur Erlangung des akademischen Grades eines **Bachelor of Science** (B.Sc.)
an der Hochschule Neubrandenburg
im Fachbereich **Landschaftswissenschaften & Geomatik**,
im Studiengang **Naturschutz und Landnutzungsplanung**

**„Phosphatkartierung auf
diluvialen Sandböden am Beispiel
von ‚Celtic-fields‘ im Siedenbollentiner Wald“**

URN-Nr.: urn:nbn:de:gbv:519-thesis-2025-0198-1

Eingereicht von: Maria Maas

Erstgutachter: Prof. Dr. Maik Stöckmann

Zweitgutachter: Moritz Kaliner, B. Sc.

Ort, Datum: Neubrandenburg, 22.10.2025

Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit untersucht Aussagekraft und Grenzen der Phosphatkartierung auf nährstoffarmen Sandböden am Beispiel der *Celtic-fields* im Siedenbollentiner Wald in Mecklenburg-Vorpommern.

Ziel war es, das methodische Potenzial unter Bedingungen diluvialer Substrate zu bewerten und Kriterien für eine Standardisierung abzuleiten. Dazu wurden Bodenproben rasterbasiert erhoben, bodenkundlich beschrieben und auf rezent, fossil und total Phosphat analysiert. Ergänzend wurden pH in Wasser und Calciumchlorid mit der daraus abgeleiteten ΔpH , Gesamt-Eisen, Phosphat zu Eisen, Glühverlust, Bodenfarben im CIELAB-System und Carbonat bestimmt. Die Auswertung erfolgte GIS-gestützt in QGIS und wurde mit der Lesesteindichte mittels Kerndichteschätzung sowie mit Bodenarten für die Schichten B und C verknüpft.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt niedrige direkt extrahierbare P-Gehalte, zugleich aber klar abgrenzbare Teilbereiche mit erhöhtem Gesamt-P, charakteristischen P/Fe-Verhältnissen und dunkleren Bodenfarben. Diese Felder heben sich vom geogenen Hintergrund ab und deuten auf anthropogene Einträge. Für die Interpretation erwies sich die kombinierte Auswertung von pH, ΔpH und Fe als zentral. Der Zusammenhang zwischen pH (einschließlich ΔpH) und Phosphat wurde explizit geprüft und in den Ergebnissen ausgewiesen (vgl. Abb. 8 & 9). Im B-Horizont überlagern sich hohe ΔpH -Klassen, P-Hotspots und strukturelle Elemente am deutlichsten; der C-Horizont liefert zusätzliche Hinweise auf langfristige Einträge.

Die Studie zeigt, dass eine standardisierte Phosphatkartierung auf Sandböden möglich ist, wenn sie multiparametrisch und in abgestufter Reihenfolge erfolgt. Entscheidend sind die parallele Bestimmung von pH, ΔpH , Eisen und Phosphat-Fraktionen sowie die Ergänzung um farbmétrische Parameter (Bodenfarbe), Glühverlust, Carbonat und räumliche Kontextlayer (z. B. Lesesteindichte) in B- und C-Horizonten.

Methodisch neu ist die Normierung der (fossilen) Phosphat-Gehalte auf die berechnete reaktive Oberfläche und damit die Ausweisung in $\mu\text{m}/\text{m}^2$. Diese Bezugsgröße erhöht die Vergleichbarkeit der Ergebnisse insbesondere auf sauren Sandböden deutlich und stellt einen nachvollziehbaren Schritt der methodischen Weiterentwicklung dar.

Für die Probenahme bestätigt die Studie die bisherige Empfehlung, unterhalb des A-Horizonts zu beproben. Eine deutlich tiefere Beprobung liefert keine zusätzlichen oder „besseren“ Ergebnisse, insbesondere weil der Untergrund im C-Horizont bodenchemisch deutlich heterogener ist als im B-Horizont. Insgesamt unterscheidet die entwickelte Matrix obligatorische, optionale und kontextbezogene Parameter und erhöht Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit in ähnlichen Landschaftsräumen.

Abstract

This bachelor's thesis examines the explanatory power and limitations of phosphate mapping on nutrient-poor sandy soils using the *Celtic fields* in the Siedenbollentiner Forest (Mecklenburg-Western Pomerania) as a case study.

The aim was to evaluate the methodological potential under conditions of diluvial substrates and to derive criteria for standardization. To this end, soil samples were collected on a grid, described pedologically, and analyzed for recent, fossil, and total phosphate. In addition, pH in water and in calcium chloride (with derived ΔpH), total iron, the phosphate-to-iron ratio, loss on ignition, soil color in the CIELAB system, and carbonate were determined. The evaluation was GIS-based in QGIS and was linked to stone-count density using kernel density estimation as well as to soil types for the B and C horizons.

The results show generally low directly extractable P contents, yet clearly delineated subareas with elevated total P, characteristic P/Fe ratios, and darker soil colors. These fields stand out from the geogenic background and indicate anthropogenic inputs. The combined assessment of pH, ΔpH , and Fe proved central for interpretation. We explicitly tested the relationship between pH (including ΔpH) and phosphate and report it in the results (see figs. 8 & 9). In the B horizon, high ΔpH classes, P hotspots, and structural elements overlap most distinctly; the C horizon provides additional indications of long-term inputs.

The study shows that standardized phosphate mapping on sandy soils is feasible when it is multiparametric and proceeds in a staged sequence. Crucial are the parallel determination of pH, ΔpH , iron, and phosphate fractions, together with complementary colorimetric parameters (soil color), loss on ignition, carbonate, and spatial context layers (e.g., stone-count density) in the B and C horizons.

Methodologically new is the normalization of (fossil) phosphate contents to the calculated reactive surface area, with reporting in $\mu\text{m}/\text{m}^2$. This reference unit markedly improves comparability—especially on acidic sandy soils—and represents a transparent step forward in method development.

For sampling, the study confirms the existing recommendation to sample below the A horizon. Considerably deeper sampling does not yield additional or “better” results, particularly because the C-horizon subsoil is chemically much more heterogeneous than the B horizon. Overall, the developed matrix differentiates mandatory, optional, and context-dependent parameters and thereby increases comparability and reproducibility in similar landscape settings.

Vorwort

Die vorliegende Bachelorarbeit entstand im Rahmen des Projektes „*Celtic-fields* im Siedenbollentiner Wald“ innerhalb des Sommersemesters 2023, im Studiengang „Naturschutz und Landnutzungsplanung“. Grundlage dieser Arbeit war eine gemeinsame Projektarbeit, bei der zahlreiche vorbereitende Schritte von den beteiligten Studenten durchgeführt wurden.

Dazu zählten insbesondere die Kartierung der Geländestrukturen des Untersuchungsgebietes, bestehend aus hauptsächlich Lesesteinen, sowie die Probenahme im Gelände und das Ausfüllen der Feldbögen. Diese Arbeiten bildeten die notwendige Basis für die späteren Laboranalysen und Auswertungen, auf denen die vorliegenden Ergebnisse beruhen.

Die Geländearbeiten erforderten eine enge Abstimmung innerhalb der Projektgruppe. So wurden beispielsweise Probenahmestrategien gemeinsam im Gelände umgesetzt und besprochen. Auch die Dokumentation der Standorte und die systematische Erfassung der erhobenen Daten waren Teil der kollektiven Arbeitsleistung.

Die in dieser Arbeit behandelten Fragestellungen bauen daher in wesentlichen Teilen auf den gemeinschaftlich erarbeiteten Grundlagen auf.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Maik Stöckmann, der das Projekt wissenschaftlich betreute, mich mit methodischer Anleitung begleitete und durch anregende Diskussionen sowie kritische Hinweise wesentlich zum Fortschritt beitrug. Für konstruktive Rückmeldungen und praktische Hilfe im Labor danke ich Moritz Kaliner. Allen weiteren Beteiligten danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit im Gelände und im Labor sowie für die organisatorische Unterstützung, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Gender Erklärung

In dieser Bachelorarbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das Generische Maskulinum verwendet. Essenziell ist, dass die Verwendung der männlichen Form als geschlechtsneutral zu verstehen ist.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Wissenschaftlicher Kontext und aktueller Forschungsstand	2
1.2 Potenziale und Grenzen der Phosphatkartierung auf Sandböden	2
1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage	3
2. Untersuchungsgebiet: Der Siedenbollentiner Wald	4
2.1 Naturräumliche Grundlagen	4
2.2 Celtic-fields als Kulturerbe	6
3. Methodik	9
3.1 Probenahme im Gelände	9
3.2 Prospektion oberirdisch sichtbarer Strukturen	10
3.3 Laborauswertung	11
3.3.1 pH-Wert-Messung	11
3.3.2 Korngrößenanalyse	12
3.3.3 Carbonatnachweis	13
3.3.4 Siebung der Proben	14
3.3.5 Bestimmung der Bodenfarbe	14
3.3.6 Bestimmung des rezenten Phosphates	15
3.3.7 Bestimmung des totalen Phosphatgehalts und des Eisengehalts	15
3.3.8 Standardisierung der Bodenprofile	16
3.4 GIS-gestützte Datenauswertung	17
4. Ergebnisse	19
4.1 Schichtgliederung	19
4.2 pH-Werte	19
4.3 pH-Differenzen	20
4.4 Räumliche Synthese	21
4.5 Phosphat (rezent, fossil, total)	22
4.6 Eisen und P/Fe	23
4.7 Glühverluste	24
4.8 Carbonat	25
4.9 Bodenfarben (CIELAB)	26
4.10 Bodenstofffarben	27
4.11 Bodentypen	29

4.12 Bodenarten	31
4.13 Fossiles Phosphat bezogen auf die reaktive Oberfläche	31
5. Diskussion	34
5.1 pH-Werte	34
5.2 Vergleich der Horizonte (ΔpH)	35
5.3 Funktionale Deutung der Synthese	35
5.4 Phosphat (rezent, fossil, total)	38
5.5 Eisen und P/Fe	40
5.6 Glühverluste	41
5.7 Carbonat	42
5.8 Bodenfarben (CIELAB)	43
5.9 Bodenstofffarben	44
5.10 Bodentypen	45
5.11 Bodenarten	46
5.12 Normalisierung auf reaktive Oberfläche	47
5.13 Schichtspezifische Aussagekraft der Kenngrößen	49
5.14 Vorgehensweise	52
5.15 Gesamtwertung	54
5.16 Limitation und Ausblick	55
6. Fazit	57
7. Nachwort	58
Literaturverzeichnis	59
Eidesstattliche Erklärung	61
Abbildungsverzeichnis	62
Tabellenverzeichnis	63

Abkürzungsverzeichnis

BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
CaCl ₂	Calciumchlorid
CF	<i>Celtic-fields</i>
CIELAB	Farbraum
DIN	Deutsches Institut für Normung
DGM	Digitales Geländemodell
Fe	Eisen
FFH	Fauna-Flora-Habitat (EU-Richtlinie)
GIS	Geographisches Informationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GV ₅₅₀	Glühverlust bei 550 °C
GV ₈₀₀	Glühverlust bei 800 °C
H ₂ O	Wasser
HCl	Salzsäure (Hydrochloric Acid)
KA5 / KA6	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5./6. Auflage
KDE	Kernel Density Estimation (Kerndichteschätzung)
LAKD M-V	Landesamt für Kultur und Denkmalpflege Mecklenburg-Vorpommern
LBGR	Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (Brandenburg)
LOI	Loss on Ignition
LUNG M-V	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
M-V	Mecklenburg-Vorpommern
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
P	Phosphat
pH	Potentia Hydrogenii (Maß für den Säuregrad)
P/Fe	Verhältnis Gesamt-Phosphat zu Eisen
QField	Mobile GIS-App für Datenerfassung (QGIS-Ökosystem)
QGIS	Open-Source-Geoinformationssystem QGIS
USDA	United States Department of Agriculture
ΔpH	Differenz pH(H ₂ O) – pH(CaCl ₂)

1. Einleitung

Gemäß § 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG, 1998) sind Böden nicht nur Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen, sondern übernehmen zugleich eine Archivfunktion für die Natur- und Kulturgeschichte. Sie bewahren Spuren vergangener Nutzungen und somit Informationen über die Entwicklung historischer Kulturlandschaften. Auch das Bundesnaturschutzgesetz (§1 Abs. 4 Nr. 1 BNatSchG, 2009) trägt diesem Umstand Rechnung, indem es den Schutz historisch gewachsener Kulturlandschaften ausdrücklich betont und als Ziel der Landschaftspflege festschreibt. Ergänzend betont das Bundeswaldgesetz die Erhaltung der Schutz- und Nutzfunktionen des Waldes. § 11 Abs. 2 BWaldG unterstreicht dabei den Stellenwert eines schonenden Umgangs mit Waldböden und ihrer Funktionen. Für archäologische Quellen im Boden setzt das Denkmalschutzgesetz Mecklenburg-Vorpommern (DSchG M-V) einen verbindlichen Rahmen, indem es Bodendenkmale ausdrücklich schützt und deren Erfassung, Erhaltung und Umgang regelt.

Vor diesem Hintergrund gewinnt der Umgang mit kulturhistorisch bedeutsamen Strukturen in der Landschaft zunehmend an Relevanz. In Mecklenburg-Vorpommern konnten durch die Auswertung digitaler Geländemodelle und ergänzende Feldforschungen in den letzten Jahren vermehrt Spuren der sogenannten *Celtic-fields* nachgewiesen werden (LUNG M-V, 2011). Diese urgeschichtlichen Ackerfluren dokumentieren frühe Formen landwirtschaftlicher Nutzung und verdeutlichen die enge Verflechtung von Natur- und Kulturgeschichte. Während ihre kulturhistorische Bedeutung außer Frage steht, bleibt bislang ungeklärt, wie mit diesen Relikten planerisch umgegangen werden sollte und inwieweit einzelne Teilbereiche als besonders schutzwürdig einzustufen sind.

Zentrale Frage ist daher, mit welchen Methoden sich das Wesen solcher Strukturen besser erfassen und ihre Schutzwürdigkeit fundiert beurteilen lässt. Prospektionsverfahren aus der Bodenkunde können hierzu einen wichtigen Beitrag leisten, da sie anthropogene Einflüsse im Boden sichtbar machen. Insbesondere die Phosphatkartierung hat das Potenzial, Hinweise auf frühere Nutzungen zu liefern und somit einen Zugang zum Verständnis historischer Kulturlandschaften zu eröffnen (Holliday & Gartner, 2007; BGR, 2024; BonaRes, 2023).

Allerdings bestehen bislang erhebliche Unsicherheiten darüber, ob diese Methode auch auf nährstoffarmen Sandstandorten, wie sie in weiten Teilen Norddeutschlands vorkommen, belastbare Ergebnisse liefern kann. Auf solchen Substraten werden Phosphate durch Auswaschungsprozesse nur schlecht konserviert, sodass ihre Aussagekraft eingeschränkt sein könnte (vgl. Holliday & Gartner, 2007).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, das Potenzial der Phosphatkartierung für den Einsatz in Sandböden systematisch zu untersuchen. Am Beispiel des Siedenbollentiner Waldes in Mecklenburg-Vorpommern soll geklärt werden, ob und unter welchen Bedingungen die Methode

Hinweise auf vergangene Nutzungen erbringen kann. Damit soll ein Beitrag zur Bewertung der Schutzwürdigkeit von Böden als kulturhistorisches Archiv im Sinne des BBodSchG und des BNatSchG geleistet werden.

1.1 Wissenschaftlicher Kontext und aktueller Forschungsstand

Die Phosphatkartierung ist seit den 1960er-Jahren eine etablierte bodenkundlich-geoarchäologische Prospektionsmethode (Eidt 1977). Sie dient dazu, anthropogene Eingriffe in Böden nachzuweisen, insbesondere dort, wo oberirdische Strukturen fehlen oder geophysikalische Prospektionsmethoden nur eingeschränkt einsetzbar sind. Auf Grund der vergleichsweise einfachen Probenahme, der geringen Kosten und der Möglichkeit, auch größere Flächen systematisch zu erfassen, hat sich dieses Verfahren als wertvolles Werkzeug etabliert.

In den letzten Jahrzehnten wurde die Methodik weiterentwickelt. Interdisziplinäre Forschungsansätze, die bodenchemische Analysen mit vegetationskundlichen, reliefbasierten und fernerkundlichen Daten kombinieren, eröffnen neue Perspektiven für die Rekonstruktion vergangener Landnutzungen (Wilson et al., 2009). Auch die Verfügbarkeit digitaler Geländemodelle erweitert die Möglichkeiten, chemische Signale im Kontext mikoreliefbasierter Strukturen zu interpretieren.

Trotz dieser Fortschritte bestehen weiterhin Forschungslücken. Zwar wurden in Mitteleuropa zahlreiche Studien zur Anwendung der Phosphatkartierung publiziert, doch systematische Untersuchungen zu spezifischen Standortbedingungen fehlen häufig. Dies gilt insbesondere für leichte, nährstoffarme Substrate, die sich durch eine hohe Dynamik der Phosphatbindung und -auswaschung auszeichnen. Übersichtsarbeiten betonen daher die Notwendigkeit, die Methode gezielt unter solchen Standortbedingungen zu testen und anzupassen (Holliday & Gartner, 2007). Bislang liegen nur wenige Fallstudien vor, die eine zuverlässige Interpretation siedlungsarchäologischer Befunde auf Sandstandorten ermöglichen.

1.2 Potenziale und Grenzen der Phosphatkartierung auf Sandböden

Die Phosphatkartierung wurde zwar in vielen Landschaftsräumen erfolgreich eingesetzt, stößt auf nährstoffarmen Sandböden jedoch an deutliche methodische Grenzen. Charakteristisch für diese Substrate sind eine geringer Feinkornanteil, eine hohe Porosität und eine geringe Kationenaustauschkapazität. Dadurch wird Phosphat nur schwach gebunden und kann leicht ausgewaschen oder in tiefere Horizonte verlagert werden. Infolge dessen ist die langfristige Konservierung anthropogener Signale stark eingeschränkt.

Auch geophysikalische Verfahren wie beispielsweise Magnetik (Bodenmagnetometrie), Georadar/ GPR (Ground-Penetrating Radar), Geoelektrik/ERT (Electrical Resistivity Tomography) und EMI-Kartierung (Electromagnetic Induction), die als ergänzende Prospektionsmethoden herangezogen werden könnten, liefern an Sandstandorten oft keine verlässlichen Ergebnisse (vgl. Clark 1996; Aspinall, Gaffney & Schmidt 2008). Grund hierfür ist die geringe Kontrastschärfe zwischen archäologisch relevanten Befunden und dem umgebenden Substrat. Die Kombination aus natürlicher Heterogenität, Bodenbildungsprozessen und potenzieller Vertikalverlagerung macht es zusätzlich schwierig, anthropogene Anreicherungen klar von natürlichen Hintergrundwerten abzugrenzen.

Diese Schwierigkeiten verdeutlichen, dass Erfahrungen aus anderen Landschaftstypen nicht ohne Weiteres übertragbar sind. Vielmehr müssen Methoden und Interpretationsansätze speziell an die besonderen Eigenschaften von Sandstandorten angepasst werden.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfrage

Vor diesem Hintergrund hat sich die vorliegende Arbeit zum Ziel gesetzt, das Potenzial einer angepassten Phosphatkartierung für Sandstandorte systematisch zu untersuchen. Am Beispiel des Siedenbollentiner Waldes in Mecklenburg-Vorpommern soll geklärt werden, ob und unter welchen Bedingungen sich Phosphatanreicherungen auf diesen Substraten zuverlässig nachweisen lassen.

Daraus ergibt sich die zentrale Forschungsfrage:

„Wie lassen sich Phosphatanreicherungen auf Sandböden durch eine angepasste, geoarchäologisch interpretierte Phosphatkartierung erfassen und auswerten?“

Die Verwendung des Begriffs „geoarchäologisch“ anstelle von „siedlungsarchäologisch“ verdeutlicht, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht ausschließlich auf archäologischen Strukturen, sondern auf der Untersuchung von Bodenprozessen im Kontext historischer Landnutzungen liegt. Damit wird die interdisziplinäre Ausrichtung betont, die sowohl bodenkundliche als auch kulturhistorische Aspekte berücksichtigt.

Um diese Frage zu beantworten, werden mehrere methodische Aspekte untersucht. Zunächst wird die Probenahmetiefe untersucht, da Phosphate in sandigen Substraten durch Auswaschung in tiefere Horizonte verlagert werden können. Ebenso ist die Auswahl relevanter Parameter von Bedeutung. Neben dem Phosphatgehalt selbst sind der pH-Wert, der Humusgehalt und weitere bodenchemische Eigenschaften entscheidend für die Interpretation. Schließlich wird das

eingesetzte Laborverfahren sowohl im Hinblick auf Genauigkeit und Reproduzierbarkeit als auch im Vergleich mit alternativen Methoden überprüft.

Die Ergebnisse sollen nicht nur Aufschluss über die Leistungsfähigkeit der Phosphatkartierung auf Sandböden geben, sondern auch Impulse für ihren Einsatz im planerischen und naturschutzfachlichen Kontext liefern.

Damit trägt die Arbeit zur Bewertung von Böden als kulturhistorisches Archiv im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG, 1998) und des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG, 2009) bei.

2. Untersuchungsgebiet: Der Siedenbollentiner Wald

2.1 Naturräumliche Grundlagen

Das Untersuchungsgebiet liegt im Nordosten des Landkreises Mecklenburgische Seenplatte, einem historischen Landesteils Vorpommerns, rund 20 Kilometer nordwestlich von Neubrandenburg und umfasst das Umfeld der Gemeinde Siedenbollentin (vgl. Abb. 1).

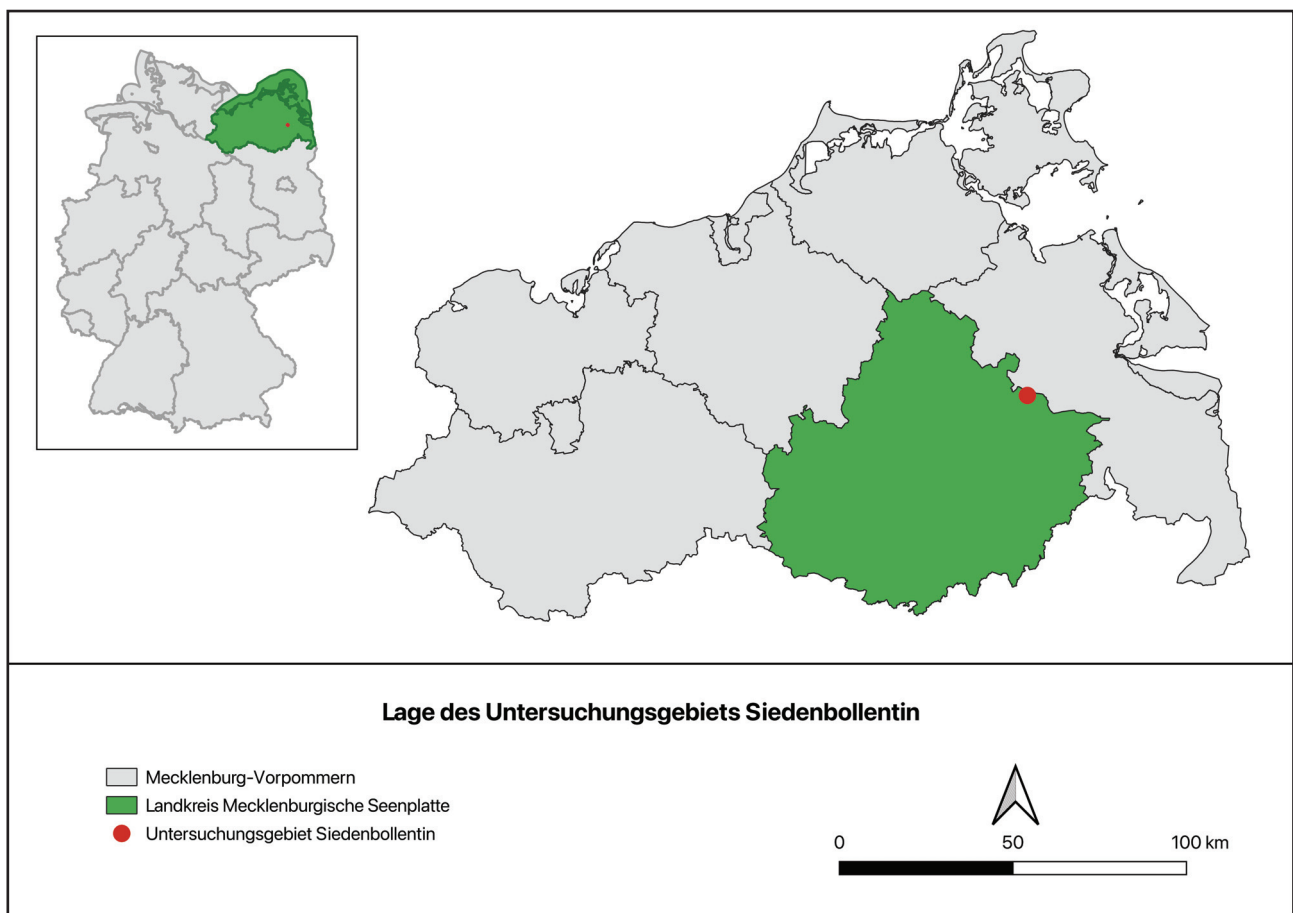


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebiets Siedenbollentin

Naturräumlich gehört es zur Einheit „Oberes Tollensegebiet (Landschaftseinheit 32), das Teil durch die Weichsel-Kaltzeit geprägten norddeutschen Grundmoränenlandschaft ist (BfN, o. J.; LUNG M-V, 2011).

Innerhalb dieses Naturraumes befindet sich Siedenbollentin auf dem Treptower Werder, einer etwa 90 km² großen Erhebung zwischen Tollense, Großem Landgraben und Kleinem Landgraben (Amt Treptower Tollensewinkel, o. J.). Das Relief zeigt kuppige Grundmoränenrücken, vermoorte Senken und ein kleinräumig wechselndes Höhenprofil (BfN, o. J.).

Die geomorphologische Entwicklung wurde während des jüngsten Eisvorstoßes der Mecklenburg-Phase (ca. 15.000 bis 13.000 v. Chr.) entscheidend geprägt, als sich markante Endmoränenzüge und ausgedehnte Grundmoränen bildeten (LBGR, 2018).

Geologisch-bodenkundlich ist das Gebiet sehr heterogen. Auf nährstoffreichen Geschiebelehm dominieren Parabraunerden, auf sauren Sanden Podsole und in schlecht drainierten Senken Pseudogleye (BGR, 2024; Blume et al., 2010).

Kartierungen im Siedenbollentiner Forst belegen zusätzlich kleinflächig Braunerde und Parabraunerde-Komplexe, was ein Hinweis auf hohe Boden-Kleinräumigkeit ist (LUNG M-V, 2020).

Die aktuellen Bestandsaufnahmen im Siedenbollentiner Wald zeigen eine deutliche Überlagerung naturnaher Strukturen durch forstwirtschaftliche Nutzung. Neben Buchenbeständen, die in bodenfrischen Lagen erhalten geblieben sind, finden sich großflächig Kiefern- und Fichtenbestände, die überwiegend durch Aufforstungen entstanden sind. Ergänzend treten Eiche, Birke und Lärche auf, die sowohl in Mischbeständen als auch in kleineren Reinbeständen vorkommen.

Diese Verteilung der Baumarten verdeutlicht den gegenwärtigen Charakter des Waldes als ein Mosaik aus naturnahen Laubwäldern und forstlich dominierten Nadelholzflächen. Auf lichteten oder gestörten Flächen breiten sich zudem Brombeersträucher (*Rubus fruticosus* agg.) aus. Sie gelten als Indikatoren sekundärer Sukzession und prägen vielerorts das Unterholz. Diese aktuelle Waldsituation wirkt sich auf die Aussagekraft der Phosphatkartierung aus. Während Buchenbestände naturnahe Bodenverhältnisse bewahrt haben könnten, haben Aufforstungen mit Kiefer, Fichte oder Lärche sowie die wiederholte forstliche Nutzung zu Bodenstörungen und Nährstoffverlagerungen geführt. Dadurch ist die Trennung zwischen urgeschichtlichen Signalen und neuzeitlicher Überprägung oftmals erschwert.

Von besonderer Bedeutung für die geoarchäologische Forschung im Siedenbollentiner Wald sind die großflächig erhaltenen Spuren sogenannter *Celtic-fields*. Dabei handelt es sich um fossile Parzellierungsspuren, die durch niedrige Wälle, sogenannte Hochraine, eingefasste Feldfluren markieren. Diese Relikte verweisen auf eine intensive landwirtschaftliche Nutzung in der Vorgeschichte und dokumentieren frühe Formen der Flächenorganisation.

Die Bewirtschaftung der Waldflächen erfolgt derzeit durch das Forstamt Neubrandenburg der Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern. Laut offiziellen Angaben orientiert sich die Nutzung an den Grundsätzen einer naturnahen, nachhaltigen Forstwirtschaft, bei der Holzproduktion, Biodiversität, Erholungsfunktion und Kohlenstoffspeicherung gleichermaßen berücksichtigt werden (Landesforst M-V, o. J.).

Das heutige Waldbild ist jedoch maßgeblich durch die forstliche Nutzungsgeschichte geprägt. Insbesondere in der DDR-Zeit wurden in Mecklenburg-Vorpommern großflächig Kiefern- und Fichtenbestände angelegt, da diese Baumarten als schnellwüchsig und ökonomisch vorteilhaft galten (vgl. Forstwirtschaft M-V, o. J.). Diese historisch gewachsenen Monokulturen bestimmen bis heute weite Teile der Bestockung, auch im Siedenbollentiner Wald. Aktuelle forstliche Maßnahmen wie Durchforstungen oder die Anlage von Rückegassen führen weiterhin zu Bodenstörungen, die bei der Bewertung des Untersuchungsraums berücksichtigt werden müssen. Die schrittweise Umgestaltung hin zu naturnäheren Mischwäldern stellt daher eine langfristige Herausforderung für die Landesforstverwaltung dar.

Dies ist besonders relevant für die Prospektion bodengebundener Relikte und die Phosphatkartierung. Bodenverdichtungen, Humusveränderungen und Nährstoffumlagerungen erschweren nicht nur die Sichtbarkeit kleinräumiger historischer Strukturen, sondern beeinflussen auch die chemische Signatur im Boden. Vor diesem Hintergrund ist die gegenwärtige forstliche Nutzung insbesondere im Hinblick auf den Erhalt potenziell archäologisch relevanter und nach dem Bodenschutzgesetz als kulturhistorisches Archiv schutzwürdiger Standorte von Bedeutung.

2.2 *Celtic-fields* als Kulturerbe

Die sogenannten *Celtic-fields* zählen zu den ältesten agrarischen Landnutzungsspuren Mitteleuropas. Es handelt sich um kleinräumige, regelmäßig angelegte Ackerparzellen, die in der Regel durch niedrige Wälle voneinander getrennt sind. Die Nutzung dieser fand in der späten Bronzezeit statt und setzte sich bis in die Eisenzeit fort (Zimmermann 1976; Behre 2008).

Typischerweise variieren die Parzellengrößen in *Celtic-Field*-Systemen im Bereich einiger Dutzend Meter. Oft sind Felder mit Kantenlängen von etwa 25 bis 45 Metern belegt, die großflächig mosaikartig nebeneinander angelegt wurden (Arnoldussen, 2018).

Diese charakteristische Struktur weist auf eine dauerhafte und planmäßige landwirtschaftliche Nutzung hin und unterscheidet sich deutlich von früheren, kleineren Anbauflächen.

Der Siedenbollentiner Wald ist ein bedeutendes Beispiel für solche Ackersysteme in Norddeutschland. Während *Celtic-fields* in intensiv landwirtschaftlich genutzten Regionen häufig

eingeebnet oder überprägt sind, blieben die Strukturen (vgl. Abbildung 2) hier durch die spätere Waldbedeckung vergleichsweise gut erhalten (Schoknecht 1991). Die Wälle und Parzellen sind im Digitalen Geländemodell noch erkennbar, sodass eine direkte Verbindung zwischen morphologischen Befunden und bodenchemischen Analysen hergestellt werden kann (LAKD M-V, 2016).

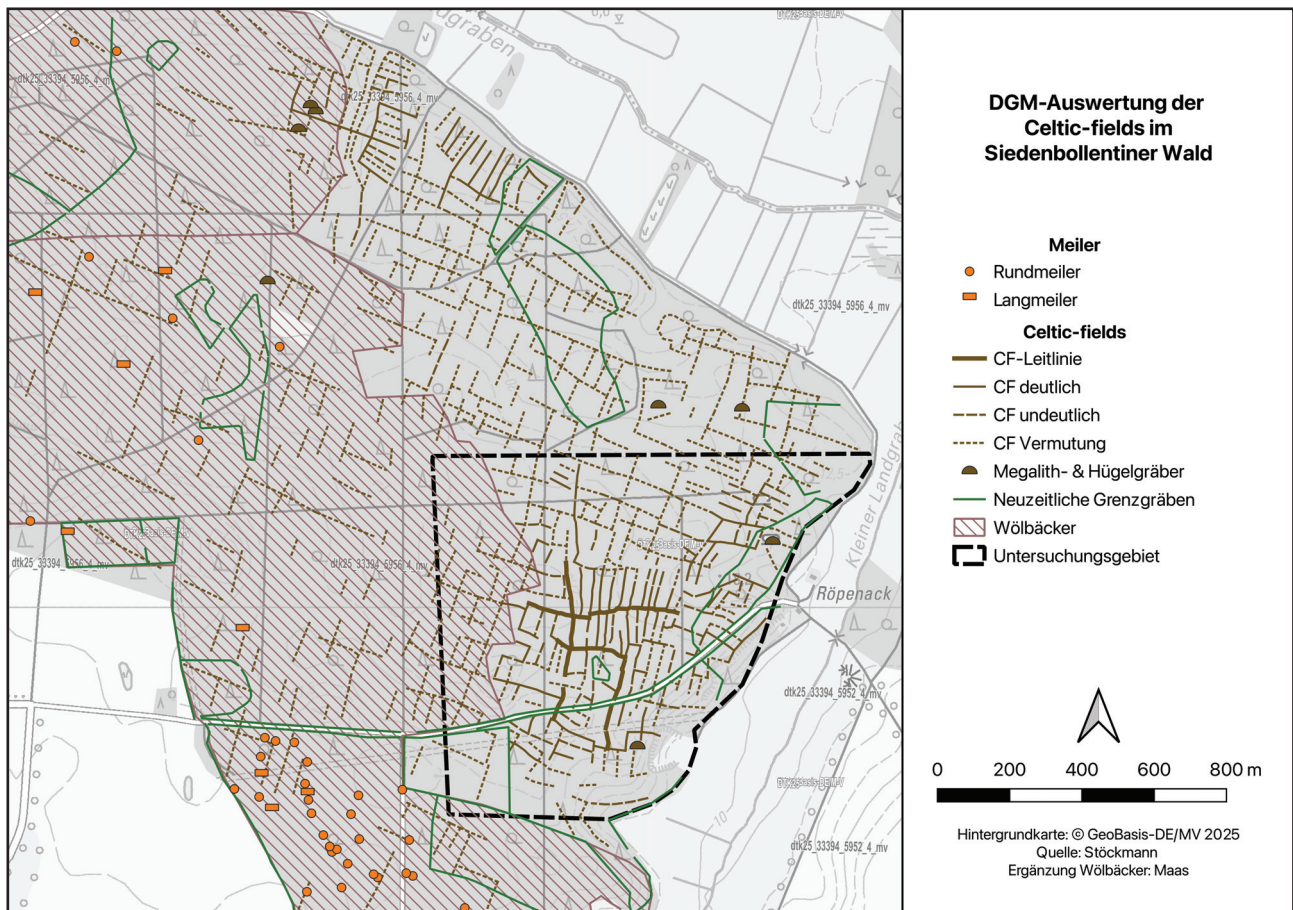


Abb. 2: DGM-Auswertung der *Celtic-fields*

Für die Fragestellung dieser Arbeit ist es von Bedeutung, dass die *Celtic-fields* auf diluvialen Sandböden angelegt wurden. Diese Böden sind durch eine geringe Nährstoffspeicherung, niedrige Pufferkapazitäten und ausgeprägte Podsolierungsprozesse gekennzeichnet (Blume et al., 2010). Unter diesen Bedingungen ist Phosphat im Boden besonders mobil und neigt zur Auswaschung, sodass anthropogene Einträge oft nur schwer nachweisbar sind (Schachtschabel et al., 2014).

Die *Celtic-fields* bieten auf Grund ihrer klar abgegrenzten Wallstrukturen einen Anhaltspunkt, um mögliche landwirtschaftliche bedingte Phosphatanreicherungen von geogenen Hintergrundwerten abzugrenzen. Frühere Studien haben gezeigt, dass sich selbst in nährstoffarmen Sandböden Spuren prähistorischer Bodennutzung anhand erhöhter Phosphatgehalte nachweisen lassen (Schachtschabel et al., 2014).

Damit bieten die *Celtic-fields* im Siedenbollentiner Wald ein besonders geeignetes Fallbeispiel für die Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Phosphatkartierung. Sie verbinden eine außergewöhnlich gut erhaltene morphologische Struktur mit schwierigen bodenchemischen Rahmenbedingungen. Die Untersuchung ermöglicht es daher, methodische Ansätze für die Phosphatkartierung unter den spezifischen Bedingungen diluvialer Sandböden zu erproben und ihre Aussagekraft im Kontext bodengebundener Nutzungsarchive zu bewerten (Holliday & Gartner, 2007).

Für den *Celtic-fields*-Bereich im Nordwesten liegt eine TL-Datierung eines Lesefundes (Keramikscherbe) vor: 635 BCE $\pm$ 372 und damit jüngste Bronzezeit bis ggf. frühe Eisenzeit. Die Datierung fügt sich in das regionale Fundspektrum (u. a. Hügelgräber der Bronzezeit und Megalithgräber der Jungsteinzeit) und belegt eine mindestens spätneolithische bis bronzzeitliche Besiedlung mit wahrscheinlicher landwirtschaftlicher Nutzung des Areals.

3. Methodik

3.1 Probenahme im Gelände

Die Bodenprobenahme erfolgte im Rahmen eines Projektmoduls der Hochschule Neubrandenburg im Sommersemester 2023 und wurde von Studenten unter fachlicher Anleitung durchgeführt. Die Probenahme diente der Phosphatkartierung des Untersuchungsgebiets. Als Mittel zu deren Umsetzung wurde ein regelmäßiges Raster eingesetzt, um die Fläche gleichmäßig und reproduzierbar zu beproben.

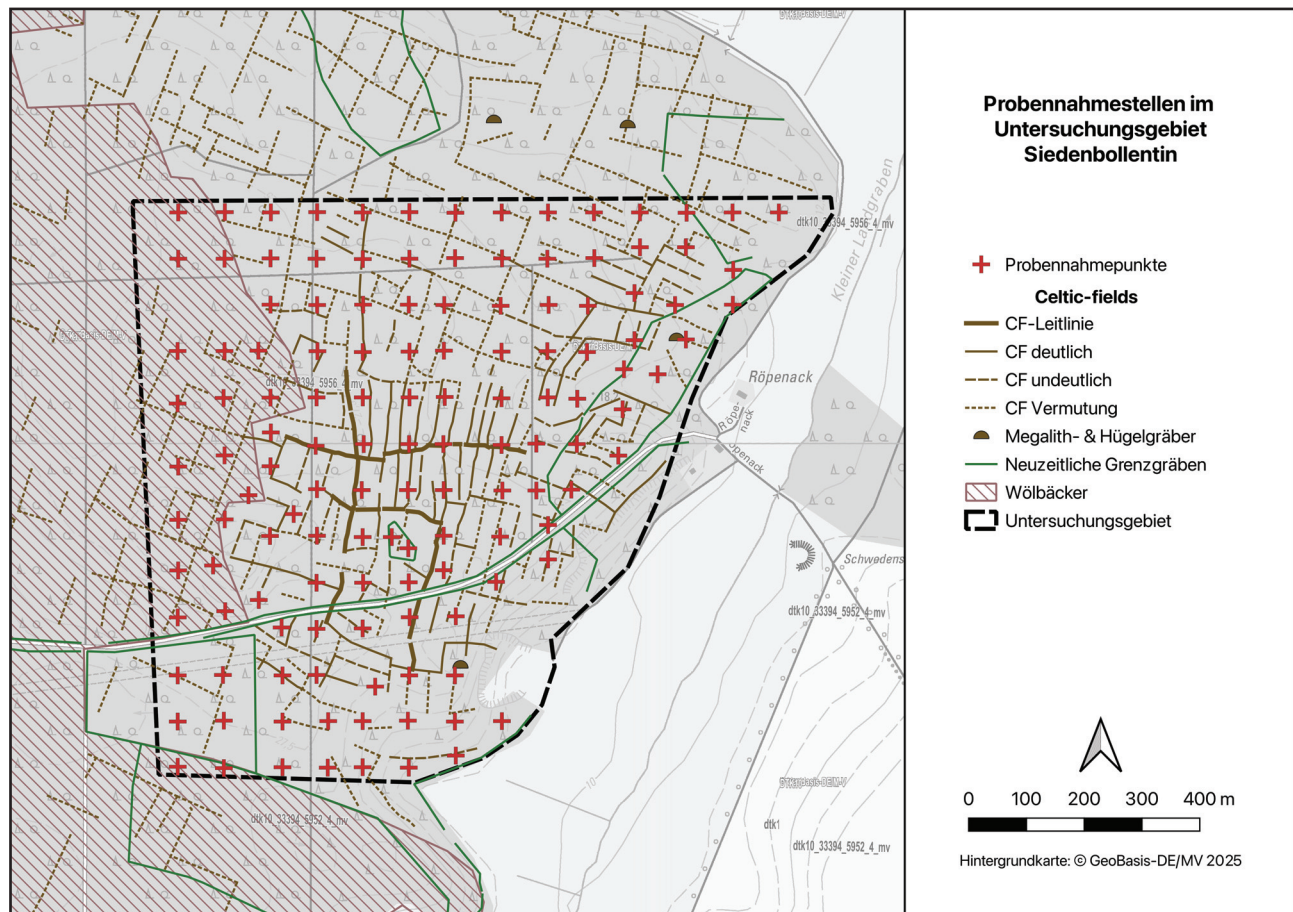


Abb. 3: Probenahmestellen im Untersuchungsgebiet Siedenbollentin

Das Untersuchungsgebiet erhielt ein gleichmäßiges Raster mit einem Abstand von 80 Metern zwischen den Probenpunkten (vgl. Abb. 3). Dieses Raster ermöglichte eine systematische Abdeckung, war jedoch auf Grund der praktischen Rahmenbedingungen, beispielsweise begrenzte Zeit und personelle Ressourcen im Modul, gröber gewählt, als es für die Erfassung kleinräumiger Feinstrukturen ideal wäre. Einzelne Punkte, die auf Privatwaldparzellen lagen, wurden geringfügig verschoben, sodass ausschließlich auf Flächen der Landesforst Mecklenburg-Vorpommern beprobt wurde. Eine spätere Verdichtung des Rasters wäre methodisch problemlos möglich.

Die Bodenproben wurden mit einem Pürckhauer-Bohrstock bis in 100 cm Tiefe entnommen. Um die Vergleichbarkeit der Proben zu gewährleisten, wurden künstliche Horizonte definiert: A (0–30 cm), B (30–65 cm) und C (65–100 cm). Diese Einteilung stellte sicher, dass trotz bodenkundlicher Unterschiede an den einzelnen Punkten einheitliche Tiefenstufen vorlagen. Sichtbare Abweichungen von der Schichtung wurden dokumentiert und die Horizonte zusätzlich gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5/KA6) beschrieben (BGR 2024; BonaRes 2023).

Zur genauen Lokalisierung der Probenpunkte wurde ein GNSS-Empfänger eingesetzt, der über QField mit dem Projekt verbunden war (QField GNSS 2025). Die ermittelten Daten wurden unmittelbar in die digitalen Probenbegleitbögen eingetragen und um Angaben zum Bodenaufschluss ergänzt. Sämtliche Kartiergruppen arbeiteten nach einer einheitlichen Methodik bei Profilbeschreibung und Probenaufnahme.

Wenn geplante Bohrpunkte auf Grund von Bodenverdichtungen, Wurzelwerk oder Hindernissen wie Brombeerbewuchs nicht durchdrungen werden konnten, wurde die Bohrung wenige Zentimeter versetzt erneut angesetzt. Entstandene Abweichungen vom Raster wurden auf den Aufnahmebögen vermerkt, um sie bei der späteren Auswertung berücksichtigen zu können.

Die eigentliche chemische Analyse und Auswertung der Proben erfolgte im Rahmen dieser Bachelorarbeit.

3.2 Prospektion oberirdisch sichtbarer Strukturen

Parallel zur Bodenprobenahme wurde im Rahmen des Projektmoduls eine Prospektion oberirdisch sichtbarer Lesesteinvorkommen durchgeführt. Ziel war es, diese Vorkommen systematisch zu erfassen und ihre räumliche Verteilung sichtbar zu machen. Die Erhebung war methodisch unabhängig von der Flächenauswahl für die Phosphatkartierung, ergänzt jedoch die geoarchäologische Gesamtbewertung des Areal.

Für die Erfassung wurden mehrere Gruppen eingesetzt, die das Gebiet in parallelen Begehungstransekten mit jeweils zehn Metern Abstand durchquerten. Alle auffälligen Steinvorkommen wurden nach Größe klassifiziert (klein, mittel, groß, sehr groß) und mit Hilfe der mobilen GIS-Anwendung *QField* digital dokumentiert (Palmisano 2023; QField Dok. 2024). Die Erfassung erlaubte eine standardisierte Datengrundlage, auf deren Basis eine räumliche Analyse durchgeführt werden konnte.

Zur quantitativen Auswertung der Punktdaten wurde die Methode der Kerndichteschätzung (Kernel Density Estimation, KDE) angewandt, mit der sich punktuelle Funde in eine kontinuierliche Dichteoberfläche überführen lassen (Hinz 2020). Für die Analyse wurde ein Radius von zehn Metern gewählt. Das Ergebnis ist eine farbcodierte Heatmap, die relative Häufungen von Steinvorkommen im Untersuchungsgebiet visualisiert (vgl. Abb. 4). Diese Darstellung lieferte eine

erste Einschätzung möglicher Aktivitätszonen, wenngleich sie unabhängig von der Phosphatkartierung entstand.

Die Ergebnisse dieser Prospektion wurden im weiteren Verlauf mit Reliefdaten und den Ergebnissen der Phosphatkartierung kombiniert, um ein Gesamtbild potenzieller standörtlicher und nutzungstypischer Muster zu gewinnen (vgl. Abb. 8 & 9).

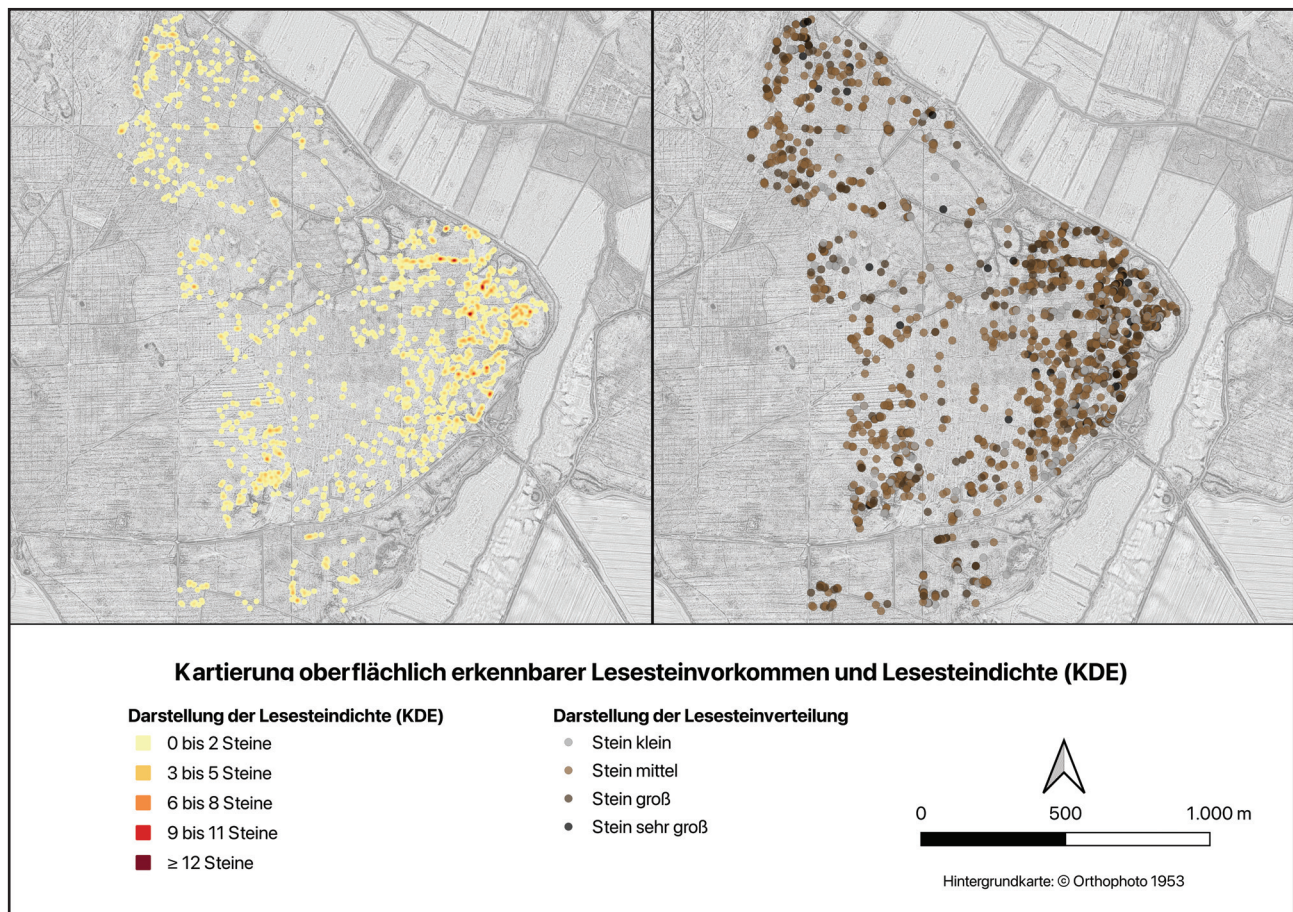


Abb. 4: Kartierung oberflächlich erkennbarer Lesesteinvorkommen und Lesesteindichte (KDE)

3.3 Laborauswertung

3.3.1 pH-Wert-Messung

Der pH-Wert ist ein signifikanter Indikator für den Säure-Basen-Haushalt sowie für die chemischen Eigenschaften des Bodens. Die Messung erfolgte gemäß DIN ISO 10390 (2005) in einer 0,01 M CaCl_2 -Lösung, die durch die Auflösung von 1,47 g Calciumchlorid-Dihydrat in einem Liter Wasser hergestellt wurde. Die Bodenprobe wurde in einer Lösung homogen suspendiert, anschließend fünf Minuten lang gerührt und nach einer Ruhezeit von 15 Minuten gemessen (vgl. Schlichting et al., 1995).

Die Messung des pH-Werts der klaren Bodenlösung erfolgte mit einem pH-Meter, das zuvor mit Pufferlösungen bei pH 4 und 7 kalibriert wurde, um präzise und verlässliche Ergebnisse zu gewährleisten (Blume et al., 2010).

Im Ergebnisteil wird ΔpH als Orientierungsgröße genutzt, um die räumliche Kopplung zu P-Hotspots und Lesesteindichte sichtbar zu machen.

3.3.2 Korngrößenanalyse

Die Bestimmung des Glühverlustes (GV550) diente als Maß für den Gehalt an organischer Substanz im Boden. Hierzu wurden etwa 10 g Bodenmaterial in vorgewogenen Glühtiegeln zunächst bei 105 °C über 24 Stunden im Trockenschrank getrocknet, um das Gesamtwasser zu entfernen. Nach der Abkühlung im Exsikkator erfolgte eine erneute Wägung, bevor die Proben für 3 Stunden bei 550 °C im Muffelofen geglüht wurden. Der anschließende Massenverlust wurde als Glühverlust berechnet. Das Verfahren ist in der Bodenkunde etabliert (DIN EN 15935 (2012); Scheffer/Schachtschabel; Blume et al., 2010) und liefert zuverlässige Hinweise auf den Humusgehalt, wobei auf diluvialen Sandböden meist nur geringe Werte zu erwarten sind.

Die Korngrößenanalyse erfolgte in zwei Schritten. Zunächst erfolgte eine Photosedimentationsanalyse zur Bestimmung der Schluff- und Tonfraktionen, parallel wurde eine Siebanalyse zur Erfassung der Sandfraktionen durchgeführt. Für die Sedimentationsanalyse wurde ein Teil der geglühten Bodenprobe mit einer Dispersionslösung behandelt, um Aggregatstrukturen aufzubrechen und eine vollständige Zerteilung der Bodenpartikel zu gewährleisten.

Die Dispersionslösung bestand aus Natriumhexametaphosphat und Natriumcarbonat, gelöst in demineralisiertem Wasser, wie in der bodenkundlichen Standardliteratur beschrieben (Schlichting et al., 1995; Stahr et al., 2008).

Um eine vollständige Dispersion der Partikel zu erreichen, wurde die Suspension zunächst manuell und anschließend im Ultraschallbad behandelt. Nach einer Ruhezeit von mindestens 12 Stunden wurde die Partikelsedimentation mit einem Photometer (PF-12 Plus) auf Basis der nephelometrischen Trübungsmessung bestimmt. Hierbei wurden mehrere Messzeitpunkte herangezogen, darunter 19 Sekunden, 3:13 Minuten, 32:10 Minuten und etwas über 5 Stunden, um die unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten der Partikelgrößenfraktionen nach dem Stokes'schen Gesetz erfassen zu können. Zur Umrechnung der Trübungswerte in Massenanteile je Korngrößenklasse wurden Korrekturfaktoren angewandt. Analysiert wurden dabei insbesondere die Feinfraktionen Schluff und Ton. Mehrfachmessungen ermöglichten die Ermittlung belastbarer Mittelwerte.

Parallel wurden die Sandfraktionen mittels einer Siebanalyse bestimmt. Dazu kam ein Siebturm mit den Maschenweiten 2 mm, 630 µm, 200 µm und 63 µm zum Einsatz. Nach ungefähr zehn Minuten maschinelltem Schütteln wurden die einzelnen Fraktionen gewogen und in Relation zur Gesamtprobe gesetzt. Dieses Vorgehen entspricht den Empfehlungen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Durch die Kombination von Sedimentation und Siebung wird das gesamte Korngrößenspektrum erfasst, sodass die Bodenart nach bodenkundlicher Systematik bestimmt werden kann. Die Ergebnisse der Glühverlust- und Korngrößenanalyse wurden in einer Labortabelle dokumentiert und dienen als Grundlage für die Charakterisierung der Bodentextur und des Humusgehalts. Während die Textur einen zentralen Faktor für die Speicher- und Pufferkapazität des Bodens darstellt, wirkt Humus im Rahmen der Phosphatanalyse eher störend. Organische Substanz kann Phosphat temporär binden oder bei der Zersetzung freisetzen und somit die Messergebnisse verfälschen (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

3.3.3 Carbonatnachweis

Zur Bestimmung des Carbonatgehalts wurde ein einfacher Salzsäure-Test durchgeführt, der in der Bodenkunde zur schnellen Ansprache von Carbonaten etabliert ist. Hierzu wird ein kleiner Teil der Bodenprobe in eine Petrischale gegeben und mit einigen Tropfen einer 10-prozentigen Salzsäure-Lösung benetzt. Das Ausmaß der Reaktion, erkennbar am Aufschäumen durch die Freisetzung von CO₂, wird visuell bewertet und dient als Indikator für den Carbonatgehalt (Schlichting et al., 1995). Die Reaktion wird in fünf Kategorien eingeteilt, die von „carbonatfrei“ (keine Reaktion) bis „carbonatreich“ (starkes Aufschäumen) reichen.

Dieses quantitative Verfahren ermöglicht eine schnelle Einschätzung des Carbonatgehalts im Boden, auch wenn keine exakte quantitative Bestimmung erfolgt. Der Carbonatgehalt ist von besonderer Bedeutung für die Beurteilung der Pufferkapazität und der chemischen Eigenschaften des Bodens, da Carbonate die Bodenreaktion stabilisieren und gleichzeitig als Calciumquelle wirken können (Blume et al., 2010; Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Für die Phosphatanalyse stellt er jedoch einen potenziellen Störfaktor dar, da Carbonatoberflächen Phosphat häufig sogar stärker binden können als Eisenoxide. Dadurch kann es zu einer Überprägung oder Maskierung anthropogener Signale kommen. Auf diluvialen Sandböden wie im Untersuchungsgebiet sind die Carbonatgehalte in den oberen Horizonten zwar in der Regel sehr gering oder nicht nachweisbar, doch wenn Carbonat vorhanden ist, kann es die Interpretation der Phosphatwerte erheblich beeinflussen.

3.3.4 Siebung der Proben

Zur Probenvorbereitung wurde eine Trockensiebung durchgeführt, um grobe Bestandteile zu entfernen und eine einheitliche Korngröße für die anschließenden chemischen und physikalischen Analysen zu erreichen. Dazu wurden ca. 15 g der getrockneten Bodenprobe nacheinander durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 100 µm gegeben. Auf diese Weise konnten die gröberen Fraktionen abgetrennt und insbesondere die feinkörnigen Anteile, also die Schluff- und Tonfraktionen, für die Analysen gesichert werden.

In der bodenkundlichen Praxis gilt die Probenvorbereitung durch Siebung als Standardverfahren, wobei üblicherweise ein 2 mm-Sieb eingesetzt wird (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Im vorliegenden Projekt wurde bewusst eine engere Fraktionierung mit 100 µm gewählt. Hintergrund dieser Entscheidung war, die erhobenen bodenchemischen Parameter besser mit den Phosphatwerten korrelieren zu können, da sich Phosphate überwiegend an feinkörnige Bodenbestandteile wie Schluff und Ton binden. Die gezielte Auswahl der <100 µm-Fraktion gewährleistete somit eine erhöhte Vergleichbarkeit der Proben und eine präzisere Aussagekraft im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit (vgl. Schlichting et al., 1995; Stahr et al., 2008).

3.3.5 Bestimmung der Bodenfarbe

Die Bodenfarbe ist ein zentrales Kriterium der bodenkundlichen Beschreibung, da sie Rückschlüsse auf die Mineralbestandteile, den Humusgehalt und die Redoxbedingungen ermöglicht. Traditionell wird die Farbe mit Hilfe der „Munsell Soil Color Charts“ beschrieben. Diese ermöglichen eine standardisierte Erfassung von Farbton, Helligkeit und Sättigung (USDA 2014).

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ergänzend ein digitaler Ansatz gewählt. Die Proben wurden in Petrischalen gefüllt und mit einem „NIX-Spectro 2“-Photospektrometer erfasst. Dieses bestimmt die Farbwerte im CIELAB-Farbraum. Dabei wurde insbesondere der L*-Wert herangezogen, der die Helligkeit der Probe beschreibt (0 = schwarz, 100 = weiß). Zahlreiche Studien zeigen, dass der L*-Wert eng mit bodenchemischen Eigenschaften, insbesondere dem Humusgehalt, korreliert (Viscarra Rossel et al., 2006; Sánchez-Marañón et al., 1995).

Dunklere Böden mit niedrigen L*-Werten (< 40) weisen in der Regel höhere Gehalte an organischer Substanz auf, während helle Böden mit Werten > 50 typisch für humusarme, mineralische Substrate sind. Für die Interpretation von Phosphatwerten ist dies jedoch nur eingeschränkt nutzbar, da Humus hier weniger als Speicher- und eher als Störfaktor wirkt. Die Farbmessung dient daher vor allem der quantitativen Einordnung des Humusgehaltes und der Mineralzusammensetzung, nicht jedoch der direkten Ableitung des Phosphatgehalts. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Messergebnisse in Helligkeitsklassen eingeteilt, die sich sowohl an der Standardansprache nach Munsell als auch an den genannten Referenzstudien orientieren.

Dieses Vorgehen ermöglicht eine standardisierte Einordnung der Bodenfarbe und erleichtert die Einbettung in die Gesamtauswertung bodenchemischer Parameter wie den Glühverlust.

3.3.6 Bestimmung des rezenten Phosphates

Die Bestimmung des leicht pflanzenverfügbaren Phosphatgehalts, auch rezent Phosphat genannt, erlaubt Rückschlüsse auf die aktuelle Nährstoffversorgung sowie die Mobilität von Phosphat im Boden.

Für die Analyse wurden 10 g der getrockneten Bodenprobe mit einer 0,3-prozentigen Salzsäure versetzt. Durch die Ansäuerung und intensives Mischen wurde Phosphat aus den Bodenpartikeln gelöst und in die Lösung überführt, die anschließend photometrisch bestimmt werden konnte.

Die Analyse des Phosphatgehalts im Filtrat erfolgte kolorimetrisch nach dem Molybdänblau-Prinzip. Dabei reagiert gelöstes Phosphat mit einer Ammoniummolybdat-Lösung zu einem charakteristisch blau gefärbten Komplex. Für die praktische Durchführung wurde der VISOCOLOR®-Test von Macherey-Nagel eingesetzt, der auf diesem Verfahren basiert und eine photometrische Bestimmung des Phosphatgehalts erlaubt.

Die Farbintensität wurde mit einem Photometer gemessen und direkt in die Konzentration des löslichen Phosphats umgerechnet (Murphy & Riley, 1962; Schlichting et al., 1995). Dieses Verfahren ist in der Bodenkunde etabliert und erlaubt eine zuverlässige Quantifizierung des verfügbaren Phosphats.

Die Methode ist besonders für die Bewertung von Standorten relevant, da sie den kurzfristig pflanzenverfügbaren Phosphatgehalt widerspiegelt.

In landwirtschaftlichen Kontexten wird sie häufig als Grundlage für Düngeempfehlungen und Standortbewertung genutzt (Blume et al., 2010). Für archäologische Fragestellungen ermöglicht die Bestimmung des rezenten Phosphats die Erfassung von Mobilität und Abbauprozessen in anthropogen beeinflussten Böden.

3.3.7 Bestimmung des totalen Phosphatgehalts und des Eisengehalts

Zur Bestimmung des totalen Phosphatgehalts und des Eisengehalts wurde das in der Laborhandreichung des Umweltlabors der Hochschule Neubrandenburg (FB Landschaftswissenschaften und Geomatik, unveröffentlicht) beschriebene Verfahren angewendet.

Vor der Extraktion wurden die Proben zur Aufschlievorbereitung in einem Muffelofen bei 800 °C geglht. Grundlage bildete anschließend ein vollständiger Aufschluss der getrockneten Proben durch eine stark saure Behandlung. Hierfür wurden definierte Mengen der Proben in Reaktionsgefäße überführt, mit Salzsäure (HCl) versetzt und 60 Minuten in einem Ultraschallbad behandelt. Durch die Kombination aus Ansäuerung und Ultraschallbehandlung wurden sowohl organisch gebundene als auch schwerlösliche mineralische Phosphat- und Eisenverbindungen in lösliche Formen überführt.

Nach Abschluss der Extraktion wurden die Proben mit Natronlauge (NaOH) neutralisiert, sodass eine stabile Matrix für die anschließende photometrische Analyse vorlag. Die quantitative Bestimmung des freigesetzten Phosphats erfolgte mit einem VISOCOLOR®-Test (Macherey-Nagel) auf kolorimetrischer Basis. Der Eisengehalt wurde analog mit einem entsprechenden VISOCOLOR®-Test desselben Herstellers ermittelt. In beiden Fällen wurde nach Zugabe spezifischer Reagenzien die Farbtintensität photometrisch gemessen und proportional zur Konzentration des jeweiligen Elements gesetzt.

Zur Sicherung der Genauigkeit wurden pro Probe jeweils zwei Reaktionsansätze parallel angesetzt und die Ergebnisse gemittelt. Zusätzlich kamen Blindproben und Kalibrierlösungen zum Einsatz, um methodische Fehlerquellen zu minimieren und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Auf diese Weise konnten sowohl der totale Phosphatgehalt als auch der Gesamtgehalt an Eisen in den Proben zuverlässig bestimmt und für die weitere Auswertung aufbereitet werden.

3.3.8 Standardisierung der Bodenprofile

Die während der Geländearbeiten erhobenen Feldbögen bildeten die Grundlage für die weitere Aufbereitung der Bodendaten. Die Beprobung wurde wie bereits oben erwähnt, im Rahmen eines Projektmoduls der Hochschule Neubrandenburg von Studenten durchgeführt. Auf Grund der heterogenen Arbeitsweise und unterschiedlicher Detailgrade bei der Dokumentation war eine nachträgliche Überarbeitung notwendig, um eine konsistente Datengrundlage zu schaffen.

Zu diesem Zweck wurden die Feldbögen zunächst redaktionell vereinheitlicht. Handschriftliche Einträge wurden systematisch übertragen, Unstimmigkeiten korrigiert und die verwendeten Begriffe an die Systematik der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) angepasst (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Dieser Schritt diente dazu, eine nachvollziehbare und vergleichbare Datenbasis zu gewährleisten, die den Vergleich zwischen einzelnen Profilen ebenso wie die Integration in digitale Arbeitsprozesse ermöglicht.

Im Anschluss erfolgte die Digitalisierung der Feldbögen. Sämtliche relevanten Kenngrößen – wie Horizontabfolge, Mächtigkeit, Farb- und Strukturmerkmale sowie besondere Horizonteigenschaften (z. B. Rost- und Bleichmarmorierungen, Tonbänder, Humus- oder Manganflecken) – wurden in eine standardisierte Attributtabelle übertragen. Damit lagen die Daten in einer klar strukturierten und maschinenlesbaren Form vor. Sie konnten nicht nur für tabellarische Auswertungen genutzt werden, sondern standen zugleich für räumliche Analysen in GIS-Anwendungen bereit.

Ein weiterer Schritt war die Integration ergänzender Informationen wie forstlicher Kartierkürzel, die in der Standorterkundung Verwendung finden. Dadurch wurde die Vergleichbarkeit mit bestehenden Standortkarten und Datenbanken verbessert. Die digitalisierten Profile wurden abschließend mit den Georeferenzen der Probenstandorte verknüpft. So entstand ein konsistenter Datensatz, der Geländebeobachtungen, Laborergebnisse und GIS-Anwendungen methodisch verbindet. Dieser Datensatz bildet die Grundlage für die Analyse der Phosphatverteilung und sichert die Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

Da für den A-Horizont keine Korngrößenanalyse vorliegt, werden Bodenarten nur für B und C ausgewertet. Genau diese Einschränkung wird in den Ergebnispassagen aufgegriffen.

3.4 GIS-gestützte Datenauswertung

Zur Auswertung der bodenchemischen und bodenkundlichen Daten wurde das Geoinformationssystem QGIS (Version 3.14) eingesetzt. Damit war es möglich, punktuell erhobene Labor- und Felddaten mit den räumlichen Strukturen des Untersuchungsgebiets zu verknüpfen und analytisch auszuwerten. GIS-gestützte Verfahren haben sich in der Geoarchäologie vielfach bewährt, da sie die Integration heterogener Datensätze erlauben und die Rekonstruktion großflächiger Muster ermöglichen (Oonk, Slomp & Huisman 2009).

Kategorie	Beispiele für Felder
Identifikations- und Metadaten	CName, CX, CY, Bodentyp, Horizont_1–4
Basisparameter	pH, P_rezent, P_total, P_fossil, Fe, P/Fe-Verhältnis, Carbonat %
Humus- und Texturparameter	GV550, GV800, Korngrößen (Sand %, Schluff %, Ton %)
Farb- und Spektralparameter	L*, a*, b*, C*, h°, Reflexionswerte 400–700 nm (%)
Ergänzende Angaben	Kommentare, Steingewicht (g), Leergewicht (g), Trockengewicht (g)

Tab. 1: Struktur der GIS-Attributtabelle für Boden- und Laborparameter

Die Laborparameter (Phosphat [rezent, total, fossil], Eisen, pH-Wert, Glühverlust, CIELAB-Farbwerte u. a.) wurden in einer standardisierten Attributtabelle organisiert. Diese ist hierarchisch aufgebaut und gliedert sich nach den drei Schichten A (0–30 cm), B (30–65 cm) und C (65–100 cm). Jeder Wert trägt einen entsprechenden Präfix (A_, B_, C_), sodass die Zuordnung eindeutig möglich ist. Die Struktur der Attributtabelle lässt sich in fünf Hauptgruppen zusammenfassen (Tab. 1).

4. Ergebnisse

4.1 Schichtgliederung

Die Schichtgliederung orientiert sich an der bodenkundlichen Ansprache nach der *Bodenkundlichen Kartieranleitung* (KA5; Ad-hoc-AG Boden, 2005) und berücksichtigt die im Gelände beobachteten Horizontgrenzen. Für die Auswertung und den Vergleich der Proben wurde zusätzlich eine Einteilung in künstliche Horizonte mit festen Tiefenintervallen vorgenommen (A: 0 bis 30 cm; B: 30 bis 65 cm; C: 65 bis 100 cm). Diese standardisierte Tiefengliederung erhöht die Vergleichbarkeit zwischen den Probepunkten, insbesondere dort, wo natürliche Horizontgrenzen variieren oder unscharf ausgebildet sind.

Schicht A (0 bis 30 cm) umfasst den obersten Profilbereich mit Humusauflage und dem oberen mineralischen Bodenhorizont und ist auf Grund der unmittelbaren Lage an der Oberfläche den stärksten Einflüssen von Vegetation, Durchwurzelung und Witterung ausgesetzt (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

Schicht B (30–65 cm) repräsentiert den Unterbodenbereich, der durch Veränderungen in Struktur, Farbe und Materialzusammensetzung gekennzeichnet ist. Typisch sind Prozesse wie Auswaschung, Anreicherung und die Ausbildung von Übergangsbereichen, die die bodenchemischen Eigenschaften prägen (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Schicht C (65–100 cm) bildet den unteren Profilabschnitt und entspricht dem weniger stark veränderten mineralischen Substrat. Hier treten häufig Merkmale auf, die Rückschlüsse auf die geologische Ausgangssituation zulassen (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

Die parallele Nennung der Geländeansprache (KA5) und der künstlichen Tiefengliederung ermöglicht sowohl eine fachlich korrekte Beschreibung der Bodenentwicklung als auch eine systematische, standortübergreifende Auswertung der chemischen und physikalischen Parameter zwischen Oberboden, Unterboden und Substrat.

4.2 pH-Werte

Die Auswertung der pH-Werte zeigt, dass alle untersuchten Horizonte überwiegend im sauren Bereich liegen. Dabei zeichnen sich Unterschiede zwischen den Schichten ab. In Schicht A (vgl. Abb. A1 & A2) erreichen die pH-Werte in Wasser einen Mittelwert von 3,9 und im CaCl_2 -Extrakt wurde ein durchschnittlicher Wert von 3,5 gemessen. Die Spannweite reicht hier bis zu einem Maximalwert von 5,3, sodass sich insgesamt ein deutlich saures Bild ergibt.

In Schicht B (vgl. Abb. A3 & A4) liegen die gemessenen pH-Werte etwas höher. Der Mittelwert beträgt 4,2 in Wasser und 3,9 in CaCl_2 . Auffällig ist, dass einzelne Probenwerte bis zu 6,2

erreichen. Dadurch ist die Variabilität innerhalb dieser Schicht größer als im Oberboden. Trotz dieser Streuung bleibt der überwiegende Teil der Messungen im sauren Bereich.

Schicht C (vgl. A5 & A6) weist die insgesamt höchsten pH-Werte auf. Der Mittelwert liegt bei 4,5 in Wasser und bei 4,1 in CaCl_2 . Während die Mehrzahl der Proben ebenfalls im sauren Bereich liegt, erreichen einzelne Werte neutrale bis schwach alkalische Bereiche von über 7,0.

Damit zeigt sich in der Gesamtbetrachtung der Messungen eine Zunahme der pH-Werte mit zunehmender Tiefe. Sowohl die mittleren Werte als auch die Spannbreite der Ergebnisse vergrößern sich dabei von Schicht A über Schicht B bis hin zu Schicht C.

4.3 pH-Differenzen

Im A-Horizont dominieren positive ΔpH -Werte (vgl. Abb. A7), was die Mehrzahl der Messpunkte in den Klassen 0,2 bis 0,6 zeigt. Hohe Differenzen ($\geq 0,6$) treten dagegen nur punktuell auf, bevorzugt dort, wo das Raster der *Celtic-fields* engmaschig ausgebildet ist, oder wo Weg- und Parzellenstrukturen dichter auftreten. Die Verteilung legt nahe, dass oberflächennahe Ionenstärke (organische Substanzen) die pH-Messung stärker beeinflussen als in Bereichen mit geringer struktureller Dichte. Zwar sind Werte von $< 0,2$ vorhanden, jedoch flächenmäßig untergeordnet.

Der B-Horizont weist das breiteste ΔpH -Spektrum (vgl. Abb. A8) sowie die höchste Häufigkeit mittlerer bis hoher Klassen (0,4–0,8 bzw. $> 0,8$) auf. Dieses Muster überlagert die klartrennbaren *Celtic-fields*-Teilungen. In Abschnitten mit deutlichen Parzellen häufen sich erhöhte ΔpH -Werte stärker als in Bereichen mit undeutlichen oder nur vermuteten *Celtic-fields*-Elementen. Damit weist der B-Horizont auf eine stärkere bodenchemische Überprägung im Zusammenhang mit der parzellenbezogenen Nutzung hin. Einzelne Punkte mit einem ΔpH -Wert von über 1,0 treten als Ausreißer auf. Sie wurden im Rahmen der Qualitätssicherung gesondert geprüft.

Im C-Horizont bleiben die ΔpH -Werte (vgl. Abb. A9) überwiegend moderat (0,2–0,6), wobei hohe Differenzen ($\geq 0,8$) seltener und dispers verteilt. Der Bezug zu den Strukturen der *Celtic-fields* ist schwächer als im B-Horizont und die Anomalien erscheinen hier eher punktuell statt flächenhaft. Das spricht für ein tiefer liegendes Grundsignal mit geringerer anthropogener Überprägung und betont die Tiefenabhängigkeit der Prozesse.

4.4 Räumliche Synthese

Die Synthesekarte des B-Horizonts setzt die zuvor eingeführten Größen ΔpH , Gesamt-P und P/Fe in Beziehung zu Lesesteindichte und Parzellenstruktur, um Nutzungsschwerpunkte abzugrenzen. Die Synthesekarte des B-Horizonts (vgl. Abb. 8) bündelt bodenchemische Messgrößen und Strukturelemente der Reliktlandschaft. Kartiert sind zum einen die fossilen Phosphatgehalte in mg/kg (250–400 mg/kg; ≥ 400 mg/kg). Zusätzlich werden die, auf die reaktive Oberfläche bezogenen Phosphat-Gehalte in $\mu\text{m}/\text{m}^2$ ausgewiesen, um extreme Anreicherungen deutlicher zu differenzieren. Höhere Gehalte treten clusterartig, besonders im südlichen Untersuchungsbereich auf und schneiden bzw. säumen abschnittsweise die deutlich ausgeprägten Parzellen der *Celtic-fields*. Die Extremklassen in $\mu\text{m}/\text{m}^2$ liegen überwiegend dort, wo auch die mg/kg-Klassen hoch sind; sie schärfen somit die Abgrenzung nutzungsnaher Hotspots (Parzellenränder, Wegeverläufe). In Bereichen undeutlicher oder vermuteter Parzellierung erscheinen Phosphatanomalien eher vereinzelt. Die Lesesteindichte (KDE) fungiert als räumlicher Strukturgeber; Verdichtungen von Phosphat (mg/kg) und die $\mu\text{m}/\text{m}^2$ -Extremklassen treten bevorzugt in Zonen mittlerer bis hoher Lesesteindichte auf.

Die pH-Differenz $\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{CaCl}_2)$ weist überwiegend positive Klassen auf (0,6–0,8 und $\geq 0,8$), die sich entlang intensiv strukturierter *Celtic-fields*-Segmente sowie nahe einzelner Lesestein-Hotspots konzentrieren. Vereinzelt treten sehr kleine ($\leq 0,2$) und sehr große ($\geq 0,8$) ΔpH -Werte auf. Diese Extremwerte sind kartiert, räumlich sehr lokal begrenzt und entsprechend vorsichtig zu interpretieren. Insgesamt deutet das Muster auf anthropogen verstärkte Signale im B-Horizont hin, die mit Nutzung und Umgestaltung der Parzellen korrespondieren; die $\mu\text{m}/\text{m}^2$ -Klassen markieren dabei die intensivsten Eintragsbereiche.

Daneben treten, wenn auch weniger ausgeprägt, erhöhte Phosphatgehalte insbesondere im Bereich bzw. Umfeld der mutmaßlichen Siedlungsstellen am östlichen Talrand auf (vgl. Abb. 8 & 9).

Im C-Horizont (vgl. Abb. 9) sind die fossilen Phosphatgehalte insgesamt niedriger. Hohe Klassen treten seltener und flächig diffuser auf als in B. Die Extremklassen in $\mu\text{m}/\text{m}^2$ (40.000–70.000; ≥ 70.000) erscheinen punktuell und bleiben flächenhaft untergeordnet. Die Lesesteindichte (KDE) bleibt als Strukturrahmen erkennbar, die räumliche Kopplung zwischen Phosphatanomalien und Elementen der *Celtic-fields* ist jedoch schwächer. Die ΔpH -Werte erreichen ebenfalls positive Klassen (0,2–0,4; 0,6–0,8; $\geq 0,8$), erscheinen jedoch punktueller und weniger zusammenhängend. Auch hier fallen einzelne extrem kleine und extrem große Werte als lokal begrenzte Ausreißer auf. Das spricht für ein überwiegend fossiles Hintergrundsignal mit geringer jüngerer Überprägung im C-Horizont. Einzelne $\mu\text{m}/\text{m}^2$ -Spitzen deuten auf langfristige Einträge in strukturell begünstigten Teilbereichen hin.

4.5 Phosphat (rezent, fossil, total)

Für die Auswertung der Phosphatgehalte wurden drei unterschiedliche Fraktionen unterschieden, die jeweils spezifische Aussagen über die Bindungsform und die Verfügbarkeit des Elements im Boden erlauben.

„Rezentes Phosphat“ bezeichnet den aktuell löslichen und damit potenziell pflanzenverfügbaren Anteil. Diese Fraktion ist stark von den gegenwärtigen Standortbedingungen abhängig und kann durch Prozesse wie Auswaschung, Mineralisierung oder mikrobiellen Umsatz kurzfristig variieren (Schachtschabel et al., 2014).

„Fossiles Phosphat“ umfasst dagegen den langfristig gebundenen Anteil, der in mineralischer Form oder sorptiv an Eisen- und Aluminiumoxiden fixiert vorliegt. Unter natürlichen Bedingungen ist diese Fraktion nur sehr schwer mobilisierter, weshalb sie häufig als Indikator für historische Akkumulationsprozesse herangezogen wird (Parfitt, 1989; Blume et al., 2010).

„Totales Phosphat“ gibt schließlich die gesamte im Boden vorhandene Phosphatmenge an.

Der fossile Anteil wird dabei aus der Differenz von Total- minus Rezentgehalt berechnet (Schachtschabel et al., 2014).

Durch die Differenzierung dieser drei Parameter kann zwischen der gegenwärtigen Verfügbarkeit und der langfristigen Bindung unterschieden werden und die Verteilungsmuster im Bodenprofil können differenziert erfasst werden.

In Schicht A liegen ausschließlich Werte für rezentes Phosphat vor. Der überwiegende Teil der Proben weist 0 mg/kg auf, sodass in vielen Fällen kein nachweisbarer Gehalt vorliegt. Einzelne Proben zeigen jedoch messbare Konzentrationen. Probe 536/571 erreicht mit 114 mg/kg den höchsten Wert, weitere Proben liegen zwischen 21 mg/kg (Probe 584/608) und 68 mg/kg (Probe 544/584). Auch bei den Proben 614/624 (32 mg/kg), 574/600 (48 mg/kg), 534/579 (48 mg/kg) und 546/552 (33 mg/kg) konnte rezent verfügbares Phosphat nachgewiesen werden. Damit zeigt Schicht A überwiegende sehr geringe, punktuell jedoch auch erhöhte Gehalte an mobilem Phosphat an.

In Schicht B wurden sowohl rezentes (vgl. Abb. A10) als auch totales (vgl. Abb. A11) und fossiles (vgl. Abb. A12) Phosphat erfasst. Die meisten Proben zeigen beim rezenten Phosphat einen Wert von 0 mg/kg, jedoch treten mehrere Ausnahmen auf. Nachweisbare Werte reichen von 28 mg/kg (Probe 546/552) bis 198 mg/kg (Probe 536/571). Weitere Proben mit erhöhten rezenten Phosphatwerten liegen beispielsweise bei 38 mg/kg (Probe 584/624), 47 mg/kg (Probe 614/624), 58 mg/kg (Probe 536/587), 104 mg/kg (Probe 544/584), 42 mg/kg (Probe 534/579), 45 mg/kg (Probe 576/560) und 52 mg/kg (Probe 576/552).

Die Totalgehalte bewegen sich zwischen 24 mg/kg (Probe 552/640) und 166 mg/kg (Probe 552/632). Das fossile Phosphat liegt in einem Bereich von 0 mg/kg (Proben mit ausschließlich rezentem Anteil) bis 166 mg/kg. Insgesamt zeigt Schicht B eine deutliche Spannweite der

Phosphatwerte, die von Proben ohne nachweisbaren rezenten Anteil bis hin zu Proben mit hohen fossilen und gleichzeitig hohen rezenten Werten reicht.

Die Totalgehalte in Schicht C (vgl. Abb. 10) weisen die größte Streuung aller Horizonte auf. Sie liegen zwischen 20 mg/kg (Probe 528/560) und 998 mg/kg (Probe 576/640). Damit reicht die Spannweite von sehr niedrigen bis zu außergewöhnlich hohen Werten, was die Variabilität des Materials in dieser Schicht widerspiegelt.

Im Gegensatz zu Schicht B treten in Schicht C zahlreiche Proben mit nachweisbarem rezenten Phosphat (vgl. Abb. 11) auf. Die Werte liegen zwischen 7 mg/kg (Probe 536/552) und 156 mg/kg (Probe 536/571). Weitere markante Befunde sind 128 mg/kg (Probe 574/608), 57 mg/kg (Probe 624/640) und 54 mg/kg (Probe 596/592). Außerdem wurden mehrere Proben mit Werten zwischen 20 und 50 mg/kg festgestellt, darunter 23 mg/kg in Probe 584/624, 42 mg/kg in Probe 592/586 und 49 mg/kg in Probe 528/560. Damit zeigt Schicht C eine deutlich höhere Präsenz von rezentem Phosphat als die oberen Horizonte.

Die fossilen Gehalte (vgl. A14) zeigen große Schwankungen. Sie reichen von negativen Werten (z.B. -83 mg/kg), die auf Messunsicherheiten oder Rundungsabweichungen zurückzuführen sind, bis zu 1152 mg/kg. Die meisten Proben liegen insgesamt im Bereich von mehreren Dutzend bis mehreren Hundert mg/kg. Besonders hohe fossile Anteile treten dort auf, wo die Totalgehalte sehr hoch und die rezenten Anteile gleichzeitig gering sind.

Aus methodischer Sicht ist die C-Schicht für weitere Phosphatkartierungen nicht prioritär geeignet, die höchste Aussagekraft liegt demnach im B-Horizont.

4.6 Eisen und P/Fe

Zur Bewertung des Zusammenhangs zwischen Phosphat und Eisen wurden zwei Kenngrößen herangezogen. „Total-Fe“ beschreibt den im gesamten Boden vorhandenen Eisengehalt und umfasst sowohl in Mineralstrukturen gebundenes Eisen als auch frei verfügbare Oxide. Dieser Parameter gibt Auskunft über das Potenzial der Böden, Phosphat über sorptive Prozesse an Eisen(hydr)oxide zu binden (Schachtschabel et al., 2014; Blume et al., 2010).

Das P/Fe-Verhältnis gibt das Mengenverhältnis von Phosphat zu Eisen wieder und dient als Indikator dafür, ob die vorhandenen Eisenoxide gesättigt sind oder noch Kapazität für zusätzliche Phosphatbindungen besitzen. Niedrige P/Fe-Werte weisen auf eine starke Bindungskapazität hin, während höhere Verhältnisse darauf hindeuten, dass bereits ein größerer Anteil des verfügbaren Eisens gebunden ist. Diese Zusammenhänge wurden insbesondere von Parfitt (1989) beschrieben, der zeigen konnte, dass Phosphat über Ligandenaustauschmechanismen stark an Goethit- und Hämatitflächen fixiert wird.

Die Gesamtgehalte an Eisen (total_Fe) in Schicht B (vgl. Abb. A14) liegen zwischen 1.067 mg/kg (Probe 552/640) und 19.940 mg/kg (Probe 544/584). Auffällig ist die große Spannweite der Werte, die auf deutliche Unterschiede zwischen den Proben hindeuten. Das Verhältnis von Phosphat zu Eisen (P_pro_Fe) bewegt sich im Bereich von 0,003 (Probe 624/630) bis 0,345 (Probe 560/544). Besonders niedrige P/Fe-Verhältnisse treten in Proben mit hohen Eisengehalten auf, während Proben mit niedrigen Eisenwerten höhere P/Fe-Verhältnisse aufweisen.

Die Gesamtgehalte an Eisen (total_Fe) in Schicht C (vgl. Abb. A15) variieren zwischen 180 mg/kg (Probe 565/584) und 19.320 mg/kg (Probe 528/578). Auch hier zeigen sich deutliche Streuungen der Werte. Das Verhältnis von Phosphat zu Eisen (P_pro_Fe) reicht von 0,002 (Probe 528/578) bis 0,5844 (Probe 565/584). Damit zeigen die Proben der Schicht C insgesamt eine etwas größere Spannweite der P/Fe-Verhältnisse als die Proben der Schicht B.

4.7 Glühverluste

Zur Charakterisierung der Böden wurden zwei verschiedene Glühverluste ermittelt der GV550 beschreibt den Massenverlust bei der Erhitzung auf 550 °C. Da Humus und andere organische Bestandteile bei dieser Temperatur vollständig oxidiert werden, erfasst dieser Parameter vor allem den Gehalt an organischer Substanz (Schachtschabel et al., 2014; Blume et al., 2010).

GV800 hingegen bezeichnet den Massenverlust bei einer Erhitzung auf 800 °C. Neben der organischen Substanz werden hierbei auch Anteile aus der Entwässerung und Zersetzung mineralischer Komponenten erfasst, insbesondere Carbonate und Tonminerale, die bei höheren Temperaturen instabil werden (Schachtschabel et al., 2014).

Während GV550 somit primär Rückschlüsse auf den Humusgehalt und die Nährstoffspeicherung zulässt, liefert GV800 zusätzliche Hinweise auf die mineralische Zusammensetzung und die thermische Stabilität des Bodens.

Die Werte für den Glühverlust 550 °C der Schicht B (GV550) (vgl. Abb. A17) bewegen sich um den Nullpunkt. Beispiele sind -0,19 % (Probe 528/640), -0,08 % (Probe 536/640) oder -0,34 % (Probe 544/632).

Die Werte für den Glühverlust 800 °C der Schicht B (vgl. Abb. A18) zeigen dagegen eine deutlich größere Spannweite. Sie reichen von -0,18 bis 5,2 Prozent, wobei die meisten Proben im Bereich von etwa 2 bis 5 Prozent liegen. Beispielhaft seien genannt: 2,196 % (528/640), 2,449 % (536/640), 5,226 % (552/640) und 4,385 % (528/632).

Die Werte vom Glühverlust 550 °C (GV550) in der Schicht C (vgl. Abb. A19) liegen zwischen -0,65 und 0,19 Prozent und sind damit ebenfalls sehr niedrig. Auch hier bewegen sich die Werte

überwiegend um den Nullpunkt, wie etwa -0,11 % (528/640), -0,09 % (536/640) oder -0,45 % (544/640).

Für den Glühverlust 800 °C (GV800) in selbiger Schicht (vgl. Abb. A20) reicht die Spannweite von -0,197 bis 8,069 Prozent. Damit treten in Schicht C insgesamt die höchsten Werte auf. Beispiele sind 4,615 % (528/640), 4,205 % (536/640), 6,358 % (552/640) und 8,069 % (528/632).

4.8 Carbonat

Carbonatvorkommen im Boden sind ein wichtiger Indikator für dessen mineralische Zusammensetzung sowie für den Pufferkapazität gegenüber Versauerung. In Mitteleuropa stammen Carbonate meist aus kalkhaltigem Ausgangsmaterial oder wurden im Verlauf der Bodengenese aus tieferen Schichten verlagert.

Auf Grund ihrer Fähigkeit, Säuren zu neutralisieren, wirken sie stark pH-regulierend und sind daher entscheidend für die chemischen Standortbedingungen (Schachtschabel et al., 2014; Blume et al., 2010). Zudem beeinflussen Carbonate die Verfügbarkeit von Phosphat. Unter neutralen bis alkalischen Bedingungen kann Phosphat durch Ausfällung mit Calcium gebunden werden, während es unter sauren Bedingungen weitgehend gelöst ist und somit für die Phosphatspeicherung unbedeutend wird (Parfitt, 1989).

Die Carbonatgehalte in Schicht A (vgl. Abb. A16) liegen zwischen 0,0 und 2,0 Prozent. Der überwiegende Teil der Proben weist 0,0 % auf, einzelne Proben zeigen jedoch nachweisbare Carbonatanteile von bis zu 2,0 %. Nachweisbare Carbonatanteile im A-Horizont (bis 2 %) sind auf den sauren Sanden pedogenetisch unerwartet und sprechen im Verbund mit den P- und Farbhinweisen, für anthropogene Einträge bzw. umgelagerte/abgetragene Profile (z. B. Kalkung, Mergel, Bauschutt, Kolluvium).

In Schicht B (vgl. Abb. A17) reichen die Werte ebenfalls von 0,0 bis 2,0 Prozent. Auch hier sind die meisten Proben carbonatfrei, während nur wenige Proben geringe Carbonatanteile aufweisen. Die vereinzelt nachgewiesenen Carbonate im B-Horizont lassen sich eher durch Umlagerung (Kolluvation), Bioturbation oder nachträgliche Kalkzufuhr erklären als durch in-situ-Bildung; die Befunde sind daher als Hinweise auf Störungen/Mischungen zu werten.

Die Carbonatwerte der Schicht C (vgl. Abb. A18) weisen die größte Variabilität auf. Sie bewegen sich zwischen 0,0 und 4,0 Prozent. Während viele Proben keine Carbonate enthalten, kommen in einigen Fällen Anteile von 2,0 % (z.B. Probe 528/632) oder sogar 4,0 % vor. Die höheren Anteile in C (bis 4 %) deuten auf heterogenes, carbonathaltiges Ausgangsmaterial bzw. umgelagerten

Sedimenteintrag hin. Sie bilden die geogene Referenz und begrenzen die Interpretation anthropogener Ca-Phosphat-Bindungen in diesen Bereichen.

4.9 Bodenfarben (CIELAB)

Zur Charakterisierung der Bodenfarben wurden in dieser Untersuchung die Parameter L^* , a^* , b^* , C^* und h° nach dem CIELAB-Farbraum den Schichten A, B und C erhoben. Die Messung erfolgte mit einem Nix Spectro 2 als Reflexionsmessung im sichtbaren Bereich (ca. 400–700 nm, Schrittweite ~ 10 nm). Die CIELAB-Parameter wurden aus den Spektren rechnerisch abgeleitet und nicht direkt gemessen.

Der Parameter L^* beschreibt die Helligkeit einer Farbe und reicht von 0 (schwarz) bis 100 (weiß). Dunkle Böden mit niedrigen L^* -Werten sind oft durch hohen Humusgehalt oder reduzierte Bedingungen geprägt, während hohe L^* -Werte auf helle, humusarme Horizonte mit stärker oxidierten Mineralphasen hinweisen. Der Parameter a^* beschreibt die Farbkomponente zwischen Grün (negative Werte) und Rot (positive Werte), während b^* die Farbkomponente zwischen Blau (negative Werte) und Gelb (positive Werte) erfasst. Aus a^* und b^* werden rechnerisch die Farbsättigung C^* (Chroma) und der Farbtonwinkel h° abgeleitet, der die Einordnung der Farben in grundlegende Farbrichtungen ermöglicht.

Die Kombination dieser Parameter liefert ein umfassendes Bild der Bodenfarbe und erlaubt Rückschlüsse auf bodenbildende Prozesse. Während L^* vor allem Hinweise auf den Humusgehalt und die Mineralzusammensetzung gibt, stehen b^* und C^* eng mit der Präsenz von Goethit in Verbindung, und höhere a^* -Werte deuten auf Hämatit hin. Damit können Unterschiede zwischen den Schichten sowohl in Bezug auf Humus und Redoxbedingungen als auch hinsichtlich der Eisenoxid-Mineralogie interpretiert werden (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

Für die räumliche Einordnung wurde ausschließlich für den B-Horizont eine Karte erstellt. Visualisiert ist der Farbton h° in acht 45° -Klassen. Punkte mit sehr geringer Farbsättigung ($C < 5^*$) sind als „blass/ohne Farbe“ ausgeblendet, damit farbneutrale Messungen die Muster nicht überdecken (vgl. Abb. A23). Die Karte ergänzt die tabellarischen Kennwerte und ermöglicht die flächenhafte Einordnung der Farbmuster im Verhältnis zu Parzellenstrukturen, pH, Δ pH, Eisen und Phosphat.

Die a^* -Werte des A-Horizonts liegen zwischen 1,88 und 5,97, die b^* -Werte zwischen 3,64 und 16,53. Die daraus abgeleitete Farbsättigung C^* variiert von 4,10 bis 17,58, der Farbtonwinkel h° zwischen 59,07 und 73,68. Insgesamt zeigt Schicht A überwiegend geringe a^* - und moderate b^* -Ausprägungen bei mittleren C^* -Werten und Farbtonwinkeln im gelblichen Bereich. Ergänzend

liegen die Helligkeitswerte L^* zwischen 20 und 34, was eine insgesamt eher dunklere Grundtönung widerspiegelt. Die häufig blassen Signale und die humose Überprägung erklären die im Vergleich zu B geringere Trennschärfe.

Die im B-Horizont liegenden a^* -Werte reichen von 2,70 bis 7,93, b^* von 7,77 bis 21,21, entsprechend liegen C^* zwischen 8,23 und 22,50 und die Farbtonwinkel h° zwischen 67,40 und 75,19. Die Helligkeit L^* liegt zwischen 25 und 40. In der Karte des B-Horizonts (vgl. Abb. A23) dominieren gelbliche Klassen (45 bis 90°). Lokale Kontraste häufen sich entlang strukturierter Parzellenzüge. Die höhere Sättigung und Helligkeit deuten auf stärker oxidische Bedingungen hin und sind zusammen mit pH/ Δ pH und Fe, für die Interpretation der P-Bindung besonders aussagekräftig.

Im C-Horizont variiert a^* von 4,32 bis 9,36, b^* von 11,74 bis 23,95 und C^* von 12,58 bis 25,67. h° liegt zwischen 67,49 und 75,85, L^* zwischen 30 und 45. Schicht C weist damit die stärkste Farbsättigung und die höchsten b^* -Werte auf, bei ähnlichen Farbtonwinkeln wie in B. Räumlich sind die Muster diffuser; der Anteil blasser Punkte nimmt gegenüber B wieder zu – konsistent mit substratnäheren Milieus, in denen Mineralogie und pH-Puffer (inkl. Carbonat) die Farbwirkung stärker steuern als Nutzungseinflüsse.

Insgesamt machen die Daten deutlich, dass die farbmtrischen Signale im B-Horizont am stärksten strukturiert sind, während A durch humose Überprägung gedämpft und C durch substratbedingte Heterogenität geprägt ist. Diese Muster korrespondieren mit den chemischen Befunden (pH, Δ pH, Fe, P/Fe) und unterstützen die Interpretation, dass pH-gesteuerte Bindung an Fe-Oxide und die reaktive Oberfläche im B-Horizont die Phosphat-Retention am deutlichsten strukturieren; im C-Horizont überlagern Mineralogie, pH-Puffer und lokal Carbonat die Texturdominanz.

4.10 Bodenstofffarben

Die Farbansprache ist ein zentrales Kriterium in der Bodenkunde, da sie unmittelbare Hinweise auf den Humusgehalt, die Mineralogie und die Redoxprozesse liefert. Dabei wird zwischen der Bodenfarbe und der Bodenstofffarbe unterschieden, die jeweils unterschiedliche Aspekte der Färbung erfassen. Die Bodenstofffarbe bezieht sich ausschließlich auf das mineralische Substrat. Außerdem erlaubt sie Rückschlüsse auf die langfristig pedogene Entwicklung und die Zusammensetzung der mineralischen Matrix. (Ad-hoc-AG Boden, 2005; Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

Die in Schicht A bestimmten Bodenstofffarben zeigen insgesamt ein homogenes Bild mit überwiegend helleren bis gelblich-braunen Tönungen. Diese sind typisch für sandige Substrate mit

geringeren Geladen an farbgebenden Mineralen. Die Grundwerte bewegen sich in einem engen Bereich und deuten auf eine gleichmäßige Färbung des mineralischen Materials hin. Auffällige Abweichungen treten kaum auf, was die relative Einheitlichkeit der Schicht unterstreicht. Auch die zusätzlich berechnete erste Ableitung weist nur geringe Schwankungen zwischen den Prozentpunkten auf. Dies bestätigt, dass die Bodenstofffarbe in Schicht A nur in geringem Maße variiert und es innerhalb der Schicht keine abrupten Übergänge gibt. Lediglich an einzelnen Punkten lassen sich leichte Veränderungen feststellen, die möglicherweise auf lokal unterschiedliche Eisenkonzentrationen oder kleinräumige Redoxprozesse zurückzuführen sind.

Insgesamt dominieren jedoch konstante Farbwerte, die die homogene Ausprägung des Substrats in Schicht A widerspiegeln.

Die Untersuchung der Bodenstofffarben in Schicht B zeigt eine deutliche Heterogenität innerhalb der Proben. Während mehrere Messpunkte im Bereich von 528/640 bis 552/632 relativ konstante Reflexionswerte im Spektrum von 100 bis 140 Einheiten zeigen, treten daneben auch auffällig Ausreißer auf. So weist die Probe 592/640 mit Werten von bis zu 173 Einheiten einen besonders hohen Reflexionsgrad auf. Dies deutet auf eine intensive Ausprägung oxidischer Mineralphasen, bei beispielsweise Hämatit, hin. Proben wie 592/624 (Werte unter 100) oder 607/626 markieren demgegenüber vergleichsweise niedrige Reflexionswerte. Diese lassen auf gebleichte Substrate oder reduzierende Bedingungen schließen.

Die erste Ableitung macht deutlich, dass innerhalb von Schicht B nicht nur kontinuierliche Übergänge, sondern auch abrupte Änderungen der farbwerte auftreten. Diese Schwankungen deuten auf kleinräumige Unterschiede in der mineralischen Zusammensetzung und den Redoxverhältnissen hin. Besonders auffällig sind hierbei die Kontraste zwischen stark oxidischen und reduzierenden Problembereichen, die eine mosaikartige Ausprägung innerhalb der Schicht nahelegen.

Insgesamt zeigt Schicht B somit ein wesentlich variables Farbbild als die relativ homogene Schicht A. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass in dieser Schicht sowohl Prozesse der Eisenoxidbildung als auch reduzierende Bedingungen wirksam wäre. Dies erklärt die farbliche Differenzierung im Substrat.

Die Analyse der Bodenstofffarben in Schicht C zeigt eine ausgeprägte Variabilität. Diese hebt sich deutlich von den homogenen Verhältnissen in Schicht A sowie der bereits stärker differenzierten Schicht B ab. Mehrere Proben weisen mit Werten von über 180 Einheiten sehr hohe Reflexionswerte auf. Dies ist beispielsweise bei den Prozentpunkten 542/616 und 544/608 der Fall. Solche hohen Werte deuten auf eine intensive Ausprägung oxidischer Mineralphasen, insbesondere Hämatit oder Goethit, hin. Diese sind für die rötlich- bis gelb-braunen Farbtöne verantwortlich. Daneben finden sich Proben mit deutlich niedrigeren Reflexionswerten von 90 bis 110 Einheiten, wie etwa Probe 592/624 und 596/592. Sie lassen eher auf gebleichte oder reduzierend geprägte Substrate schließen.

Die Berechnung der ersten Ableitung verdeutlicht, dass innerhalb der Schicht abrupte Farbwechsel auftreten. Vor allem in den Problembereichen mit reduzierten Reflexionswerten lassen sich starke Schwankungen erkennen. Diese weisen auf kleinräumige Unterschiede in den Substraten und auf wechselnde Redoxbedingungen hin. Im Gegensatz dazu erscheinen die Proben mit sehr hohen Reflexionswerten vergleichsweise stabil, was auf gleichmäßig oxidierte Substrate schließen lässt.

Zusammenfassend zeigt Schicht C eine deutliche Heterogenität der Bodenstofffarben mit einer Koexistenz von stark oxidierten und reduzierten Bereichen. Damit weist diese Schicht die größte Spannweite an Farbvariabilität auf und verdeutlicht die kleinteiligen Unterschiede im Untergrund. Diese sind sowohl für die Interpretation der Standortbedingungen als auch für die Ableitung pedogener Prozesse von Bedeutung.

4.11 Bodentypen

Die Einordnung der Bodenprofile in definierte Bodentypen gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, Ad-hoc-AG Boden, 2005) ist eine wesentliche Grundlage, um die erhobenen Daten in einen bodengenetischen und standortkundlichen Kontext einzuordnen. Mit Hilfe der Bestimmung von Horizontabfolgen, typischen Übergangsbereichen sowie Merkmalen wie Marmorierungen, Tonverlagerungen oder Staunässezeichen lassen sich die Profile systematisch klassifizieren. So wird eine Verbindung zwischen den gemessenen Parametern (z.B. pH-Wert, Phosphat- und Eisenkonzentrationen) und den bodenbildenden Prozessen hergestellt. Da die Bodentypen nicht schichtweise, sondern punktwise erhoben wurden, spiegeln sie die standortspezifische Variabilität des Untersuchungsgebiets wider. Unterschiede zwischen den einzelnen Profilkunkten lassen sich somit direkt auf unterschiedliche Substratbedingungen, Wasserverhältnisse oder pedogenetische Entwicklungen zurückführen. Die Bodentypisierung ergänzt somit die chemisch-physikalischen Analysen um eine morphologische Perspektive und ermöglicht eine verlässliche Einordnung in die bodenkundliche Nomenklatur.

Die bodenkundliche Ansprache der Profile ergab eine deutliche Dominanz von Parabraunerden verschiedener Ausprägung (vgl. Abb. 5). Während einige Standorte Bt-Horizonte aufweisen, die auf Tonverlagerungen hindeuten, sind andere durch Merkmale der Staunässe geprägt und wurden als Stauwasser-Parabraunerden oder Pseudogley-Parabraunerden klassifiziert. Daneben konnten Braunerden identifiziert werden, die teilweise podsolige Eigenschaften aufweisen. Somit kommen auch Podsol-Braunerden und Podsol-Parabraunerden vor. Einzelne Profile zeigen Übergangsformen wie Humore Braunerden oder pararendzinaähnliche Ausbildungen.

Die Vielfalt der Standorte spiegelt sich auch in den zugeordneten Standorttypen wider. Am häufigsten treten Al-Parabraunerden (B6) auf, daneben finden sich stauwassergeprägte Ausprägungen (B7) sowie nährstoffarme, podsolig geprägte Sandstandorte (BP, PZ). Damit wird

deutlich, dass das Untersuchungsgebiet durch eine erhebliche kleinräumige Variabilität geprägt ist, die von tiefgründigen, tonverлагerten Parabraunerden bis hin zu flachgründigeren, podsoligen oder stauwasserbeeinflussten Böden reicht.

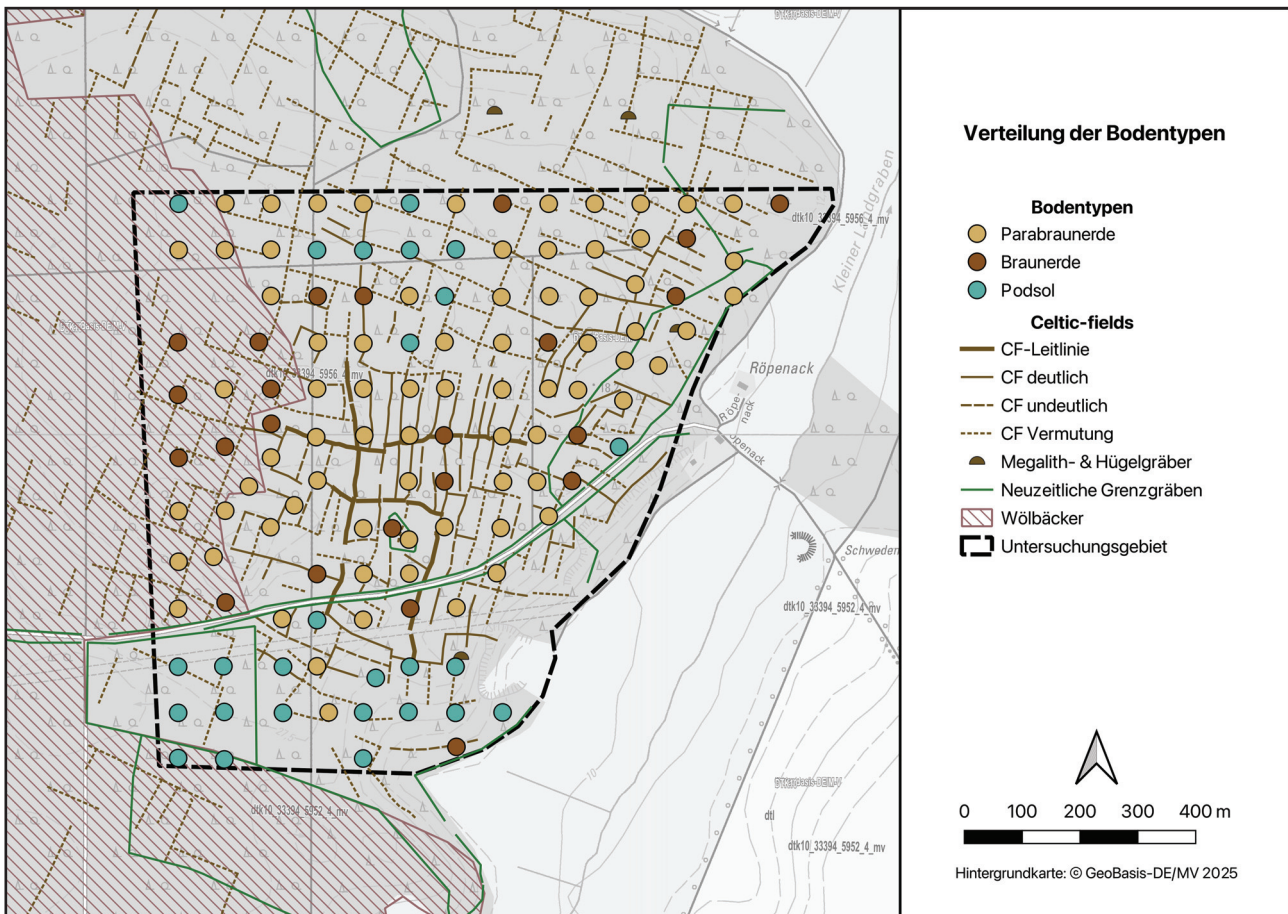


Abb. 5: Verteilung der Bodentypen

Konkrete Beispiele einzelner Profile verdeutlichen diese Bandbreite. So wurde die Probe 528/640 beispielsweise als Parabraunerde mit podsoligen Merkmalen klassifiziert. Dies spiegelt die Übergangssituation zwischen tonverlagerten und podsoligen Bereichen wider. Die Probe 552/624 weist typische Merkmale einer Stauwasser-Parabraunerde auf, was auf eingeschränkte Durchlässigkeit und Staunässebedingungen hindeutet. Am Standort 574/616 wurde eine Podsol-Parabraunerde identifiziert, die auf intensive Auswaschungs- und Verlagerungsprozesse schließen lässt. Demgegenüber wurde das Profil 607/618 als typische Parabraunerde ohne stark ausgeprägte Staunässe- oder Podsolierungsmerkmale eingestuft.

Insgesamt zeigt sich, dass die Böden des Untersuchungsgebietes stark durch diluviale Sandablagerungen geprägt sind. Deren unterschiedliche Wasser- und Nährstoffverhältnisse haben zur Ausbildung einer breiten Palette an Bodentypen geführt. Die punktweise Kartierung nach Rasterform macht diese kleinräumige Heterogenität sichtbar und liefert einen wichtigen Rahmen für die Einordnung der chemischen und physikalischen Parameter.

4.12 Bodenarten

Zur besseren Lesbarkeit werden zunächst die Abkürzungen beschrieben:

Ss = Sand (feinkornarm), Su2 / Su3 = schluffiger Sand, Si2 = sandiger Schluff (Silt), Si2 = lehmiger Sand, St2 / St3 = toniger Sand.

Im B-Horizont (vgl. Abb. A21) dominiert ein sandgeprägtes Bild. Weite Bereiche werden von Ss getragen, begleitet von Su2, das als Bänder und Inseln in das Parzellenraster eingestreut ist. Si2 und St2 treten punktuell bis kleinflächig auf, häufig an Strukturgrenzen oder entlang einzelner *Celtic-fields*-Linien. Sie markieren feinkörnigere Einschlüsse in einem insgesamt sandigen Substrat. Der B-Horizont zeigt somit ein heterogeneres Texturmosaik mit lokalen Anreicherungen von Schluff bzw. Ton, ohne großräumige Texturumstellungen.

Im C-Horizont (vgl. Abb. A22) bleibt die Texturlandschaft sandbetont, jedoch gleichförmiger als im B-Horizont. Ss und Su2 stellen den Hauptanteil. Si2 und St2 erscheinen seltener und räumlich diskret. Vereinzelt kommen Su3 und St3 vor, die kleinmaßstäbliche Linsen mit stärkerem Feinkornanteil andeuten. Insgesamt bewahrt der C-Horizont ein substratnäheres, ruhigeres Muster.

4.13 Fossiles Phosphat bezogen auf die reaktive Oberfläche

Um texturbedingte Effekte zu reduzieren, wurde das fossile Phosphat (P_{fossil}) auf die reaktive Oberfläche normiert. Diese wird durch den Feinanteil (Schluff & Ton) als Stellvertreter für die spezifische Oberfläche angenähert und steht damit in engem Bezug zur potenziellen Sorptionskapazität. Die Normalisierung beschränkt sich auf den B- und C-Horizont, da für diese Tiefen Korngrößeninformationen vorliegen.

Im B-Horizont (vgl. Abb. 6) bleiben die zuvor identifizierten Cluster erhalten und treten nun schärfer hervor. Die höchsten Klassen konzentrieren sich weiterhin in den südlichen und südwestlichen Parzellenfeldern und schneiden abschnittsweise die Ränder der *Celtic-fields*.

Bereiche mit grobsandiger Textur schwächen sich dagegen sichtbar ab. Insgesamt deutet dies auf robuste Nutzungssignale hin, die nicht primär aus texturinduzierten Retentionseffekten resultieren.

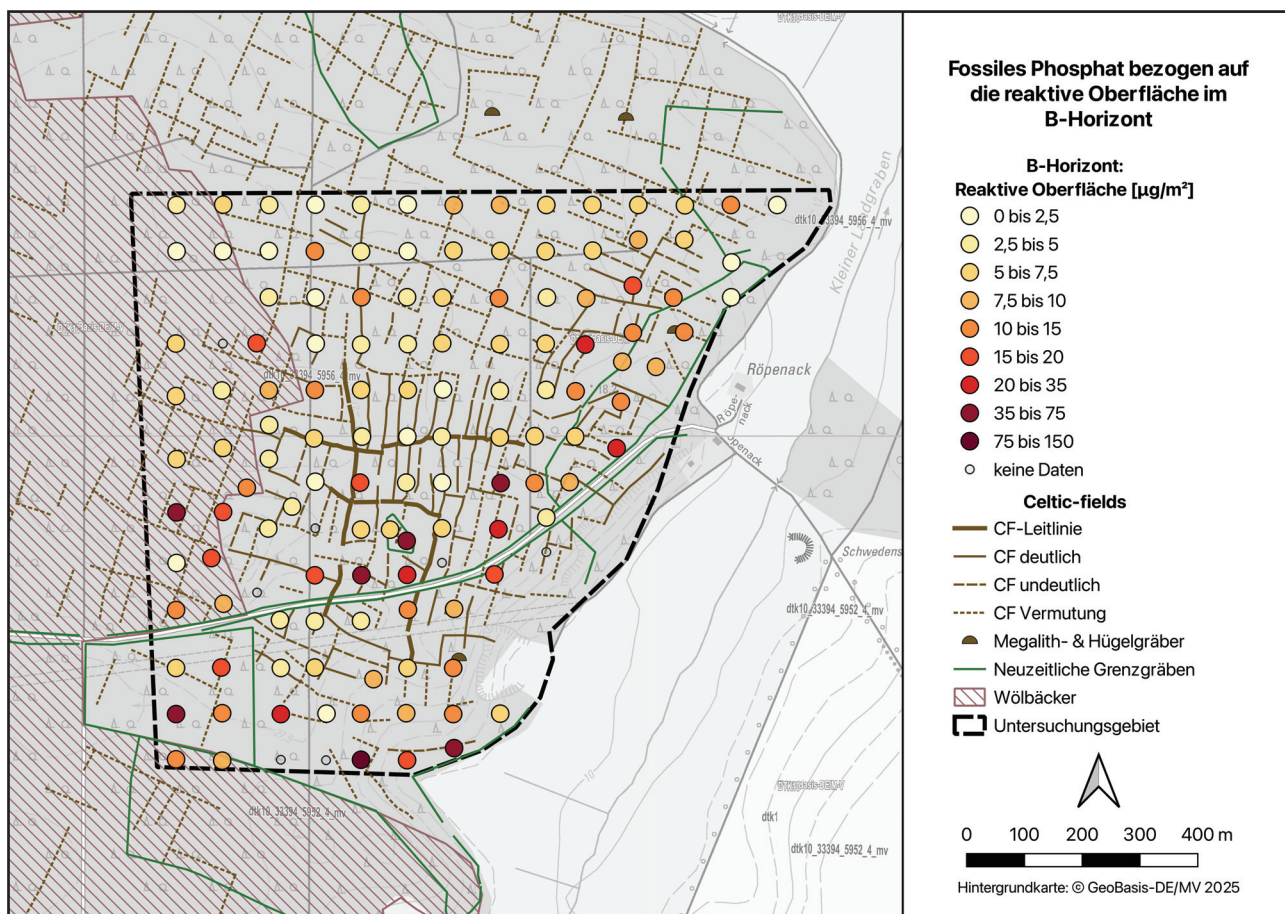


Abb. 6: Fossiles Phosphat bezogen auf die reaktive Oberfläche im B-Horizont

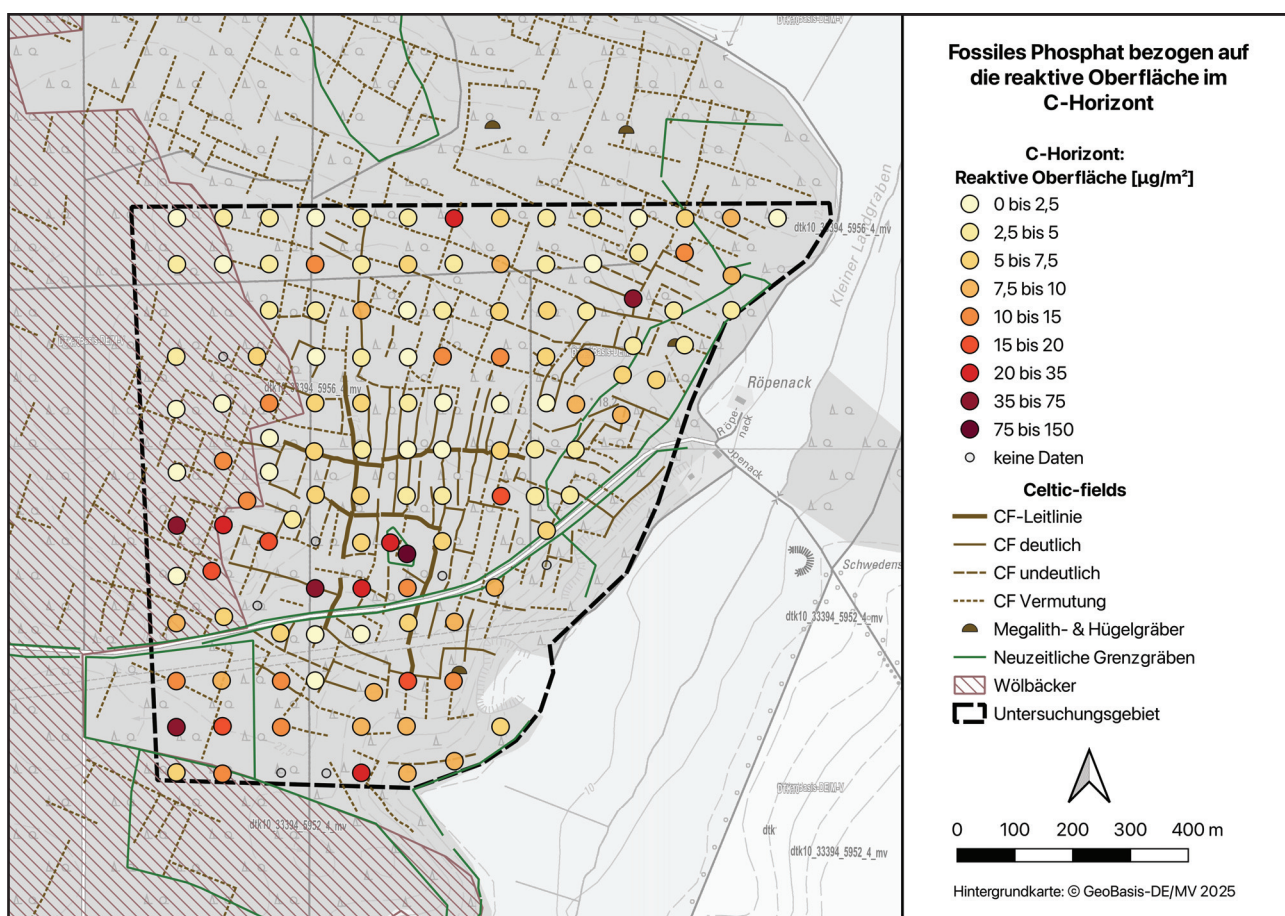


Abb. 7: Fossiles Phosphat bezogen auf die reaktive Oberfläche im C-Horizont

Im C-Horizont (vgl. Abb. 7) zeigt die Normalisierung ein gedämpfteres, diffuseres Bild. Hohe Einzelpunkte bleiben bestehen, verlieren jedoch an Flächenanteil. Dies passt zu einem substratnäheren Hintergrund, in dem Bindung und Ausfällung stärker von der Mineralogie (Fe-/Ca-Bindungen) und dem pH-Milieu als von der Textur dominiert werden. Lokale Maxima im Umfeld der frühneuzeitlichen ‚Nachtkoppel‘ (östlicher Talrand) bestätigen die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Methode im C-Horizont, wenngleich die Signale auf Grund des langen Zeitraums und pedogener Prozesse insgesamt abgeschwächt auftreten (vgl. Abb. 7).

Die Normalisierung bestätigt interpretativ, dass die Hotspots im B-Horizont nicht nur ein Produkt erhöhter Feinfraktionen sind und die Normalisierung im C-Horizont nivellierend wirkt, wodurch die Rolle der alternativen Bildungspfade (beispielsweise von Fe-Oxiden oder Ca-Phosphaten) unterstrichen wird.

5. Diskussion

5.1 pH-Werte

Die pH-Werte der unterschiedlichen Profile liegen überwiegend im stark bis mäßig sauren Bereich und bestätigen somit die für diluviale Sandböden typischen Standortbedingungen (Ad-hoc-AG Boden, 2005; Blume et al., 2010). Unter diesen Bedingungen ist die Verfügbarkeit von Phosphat stark durch die Bindung an Eisen- und Aluminiumoxide beeinflusst.

Parfitt (1989) zeigt, dass die Sorption von Phosphat an Eisenoxiden wie Goethit und Hämatit überwiegend durch einen schnellen Ligandenaustausch an den Hydroxylgruppen der Mineraloberfläche erfolgt. Dadurch entstehen stabile innere Oberflächenkomplexe, die eine starke Fixierung des Phosphats bewirken. Dieser Prozess ist besonders unter sauren Bedingungen ausgeprägt, da die Oxidoberflächen in diesem Milieu stark protoniert sind und dadurch eine hohe Affinität zu Phosphat-Ionen aufweisen. Goethit gilt auf Grund seiner meist größeren spezifischen Oberfläche und zahlreicher reaktiver Hydroxylgruppen als besonders effektiv in der Bindung. Hämatit reagiert zwar langsamer, ermöglicht aber ebenfalls eine dauerhafte Fixierung. Insgesamt verdeutlicht dies, dass gelöstes Phosphat in Böden bei pH-Werten unter 5,0 rasch und nachhaltig an Fe-Oxide gebunden wird (Parfitt, 1989).

Die extrem niedrigen Werte in Schicht A ($\bar{\varnothing}$ 3,8 in H_2O) (vgl. Abb. A1) deuten auf eine sehr hohe Bindungsneigung hin. Dies trägt dazu bei, dass rezent Phosphat in dieser Schicht nur begrenzt mobil bleibt und in großem Umfang sorptiv fixiert werden kann.

In Schicht B ($\bar{\varnothing}$ 4,2 in H_2O) (vgl. Abb. A3) liegen die pH-Werte leicht höher, wodurch die Sorptionsstärke etwas abnimmt. Gleichzeitig nimmt jedoch die Variabilität der Ergebnisse zu. Dies könnte erklären, warum in dieser Schicht Unterschiede zwischen rezentem und totalem Phosphat stärker hervortreten.

Besonders interessant sind die Ausreißer in Schicht C (vgl. Abb. A5 & A6). Hier erreichen einzelne Proben pH-Werte über 7,0. Unter neutralen bis schwach alkalischen Bedingungen verschiebt sich das Bindungssystem und Phosphat kann verstärkt an Calcium gebunden oder als sekundäres Phosphatmineral ausgefällt werden. Damit unterscheiden sich diese Proben von den übrigen sauren Standorten. Sie zeigen dass kleinräumige Substratunterschiede die Phosphatverteilung wesentlich beeinflussen können.

Insgesamt unterstreichen die pH-Werte die zentrale Rolle der chemischen Milieubedingungen für die Interpretation der Phosphatdaten. Die ausgeprägte Verlagerung in den Ober- und Mittelschichten schafft ein Milieu, in dem Phosphat stark an Eisenoxide gebunden wird. In tieferen Schichten mit neutraleren Bedingungen sind hingegen alternative Bindungsmechanismen möglich. Dieses Ergebnis ist für die Bewertung der Phosphatakkumulation in den *Celtic-fields* von

wesentlicher Bedeutung, da es den Zusammenhang zwischen bodenchemischer Differenzierung und der Stabilität von P-Einträgen verdeutlicht.

5.2 Vergleich der Horizonte (ΔpH)

Im Vergleich zu den Horizonten A (vgl. Abb. A7) und C (vgl. Abb. A9) zeigt der B-Horizont (vgl. Abb. A8) die deutlichste Häufung erhöhter ΔpH -Werte und die größte räumliche Kohärenz zu den *Celtic-fields*-Strukturen. Dies stützt die Interpretation, dass eine parzellennahe Nutzung durch den Eintrag organischer Reststoffe, Verdichtung und Umlagerung, zu einer höheren Ionenstärke beziehungsweise variablen Oberflächenladungen führt.

Im C-Horizont bleibt die Kopplung schwächer, was auf die geringe Prozessnähe und das tiefer liegende, weniger durchmischte Material verweist. Der A-Horizont liegt zwischen beiden, denn dort sind oberflächennahe Effekte zwar sichtbar, dennoch werden sie durch rezente Pedogenese und Durchmischung nivelliert.

ΔpH -Werte $< 0,2$ sind zu erwarten und umfassen Messunsicherheit, sowie Standortsituationen mit geringer Differenz zwischen Wasser- und Dispersionslösung. Ausreißer $> 1,0$ wurden geprüft. Die räumlich Wiederkehr erhöhter ΔpH in *Celtic-fields*-Segmenten spricht gegen reine Zufallseffekte.

5.3 Funktionale Deutung der Synthese

Die Synthesekarten zeigen im B-Horizont ein deutlich anthropogen geprägtes Muster, das mit der Parzellierung der *Celtic-fields* und Zonen erhöhter Lesesteindichte (KDE) korrespondiert. Auffällig ist die wiederkehrende Häufung von Phosphat-Clustern im Umfeld der mutmaßlichen vorgeschichtlichen Hofstelle am östlichen Talrand (vgl. Abb. 7), was die geoarchäologische Plausibilität der Befunde zusätzlich stützt. Die räumliche Nähe von Phosphatclustern zu klar ausgeprägten Parzellen lässt auf wiederkehrende Nutzungsschwerpunkte schließen (z. B. Ablagerungs- oder Stallplätze, Wege, Randbereiche von Anbauflächen). Im C-Horizont bleibt die Lesesteindichte zwar strukturstiftend, die Kopplung zwischen Phosphat und *Celtic-fields*-Elementen wird jedoch schwächer, lokal erhöhte Werte am östlichen Talrand (Nachtkoppel) sind jedoch erkennbar (vgl. Abb. 7). Dies spricht für ein überwiegend fossiles Signal, dessen vertikale Weitergabe in sandigen Substraten durch Auswaschung oder Verlagerung begrenzt ist. Dass hohe Phosphatgehalte im B-Horizont stärker und kohärenter auftreten als im C-Horizont, passt zu standnahen Einträgen und nachfolgender, aber räumlich begrenzter Retention (u. a. Bindung an Fe/Al-Oxide oder organische Substanz).

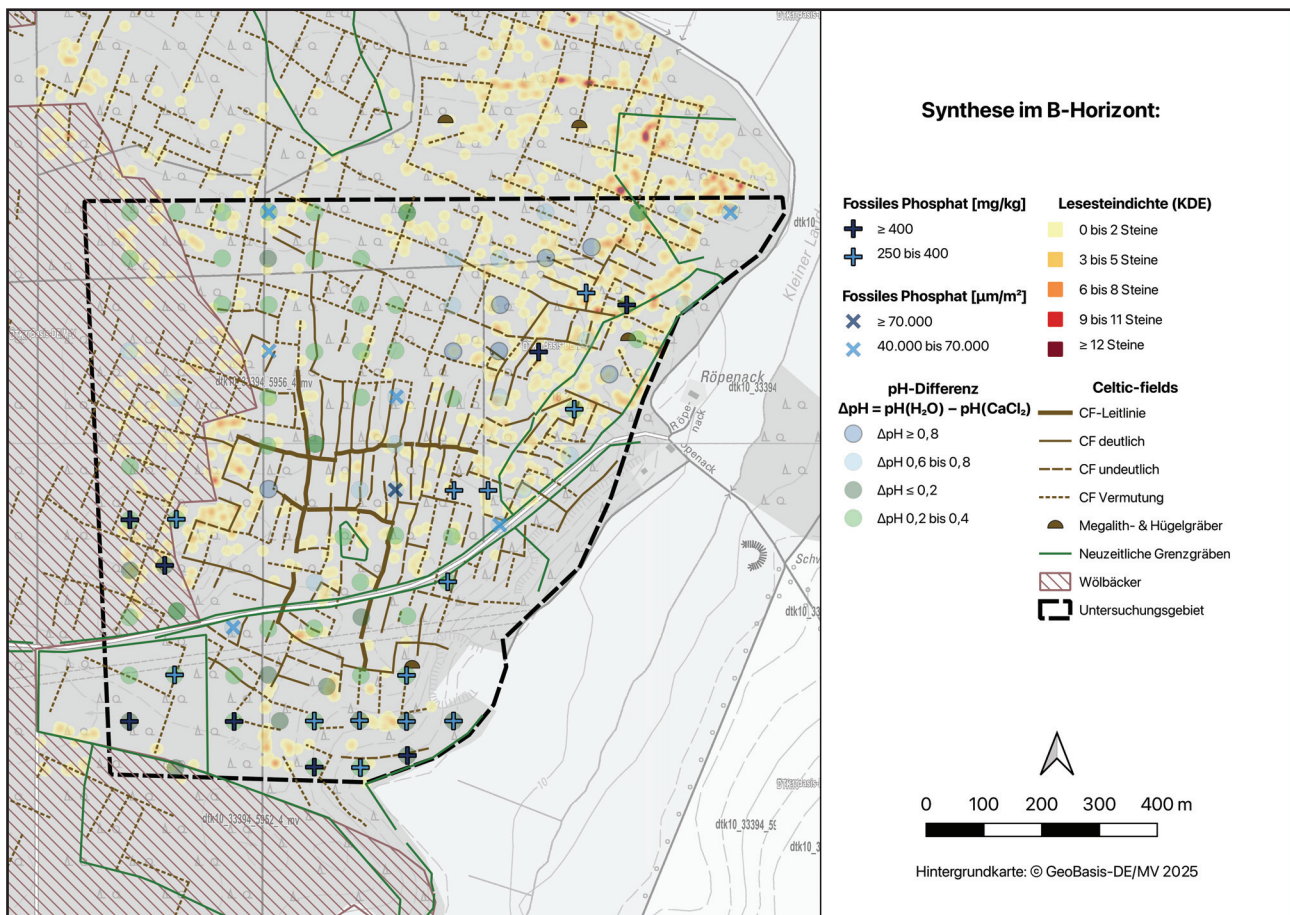


Abb. 8: Synthese im B-Horizont

Die Klasse $\geq 70.000 \mu\text{m}/\text{m}^2$ markiert Ausnahmesituationen mit außergewöhnlich hoher fossiler P-Akkumulation bezogen auf die reaktive Oberfläche. Dass diese Spitzen im B-Horizont clusterartig an Parzellenrändern oder Wegelementen auftreten und mit hohen mg/kg-Klassen zusammenfallen, spricht gegen eine rein textur- oder messbedingte Ursache. Vielmehr deuten sie auf intensive, wiederholte Einträge (Stall-/Ablagerungsnähe, Randnutzung) unter sauren, Fe-oxidreichen Bedingungen hin, unter denen Phosphat langfristig sorptiv fixiert wird. Im C-Horizont bleiben Extremklassen punktuell und sind unter Einbezug pH/Carbonat zurückhaltend zu interpretieren (lokale Milieueffekte, Substratheterogenität). Die Kombination aus mg/kg-Symbolen, ΔpH , Fe/P-Fe und Lesesteindichte ist hier entscheidend, um Nutzungssignal vs. Milieueffekt zu trennen.

Die ΔpH -Muster sind überwiegend positiv, was dem üblichen Unterschied zwischen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ und $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ entspricht. Die kartierten Extremwerte (sehr klein $\leq 0,2$ bzw. sehr groß $\geq 0,8$) sind räumlich punktuell. Sie können auf lokale chemische Besonderheiten (Carbonatnester, Ascheinträge oder stark variierende organische Substanz), wechselnde Feuchte, bzw. Ionenstärke bei der Feld- oder Laborbestimmung oder kleinräumige Bodendiskontinuitäten zurückgehen. Fachlich sollten diese Ausreißer daher nicht überinterpretiert, sondern als Hinweise

auf kleinmaßstäbliche Heterogenität verstanden werden, da für die Nutzungsgeschichte maßgeblich das flächige, mit den *Celtic-fields*-Segmenten übereinstimmende ΔpH -Signal ist. Die Lesesteindichte (KDE) fungiert in beiden Tiefen als stabiler räumlicher Rahmen. Verdichtungen von Steinen entlang Parzellenkanten und Wegeverläufen können sowohl ursprüngliche Bau- oder Grenzstrukturen als auch spätere Umlagerungen (Pflugwurf, Erosion) markieren. Die Bevorzugung mittlerer bis hoher Lesesteindichte durch Phosphatcluster spricht dafür, dass Steinkonzentrationen Nutzungsschwerpunkte konservieren könnten. Methodisch ergeben sich drei Begrenzungen. Die Aussagekraft der KDE hängt von Probandichte und Kernbandbreite ab. Dies bedeutet, dass zu glatte Oberflächen lokale Maxima verschmieren können und zu „scharfe“ Parameter zufällige Peaks überbetonen.

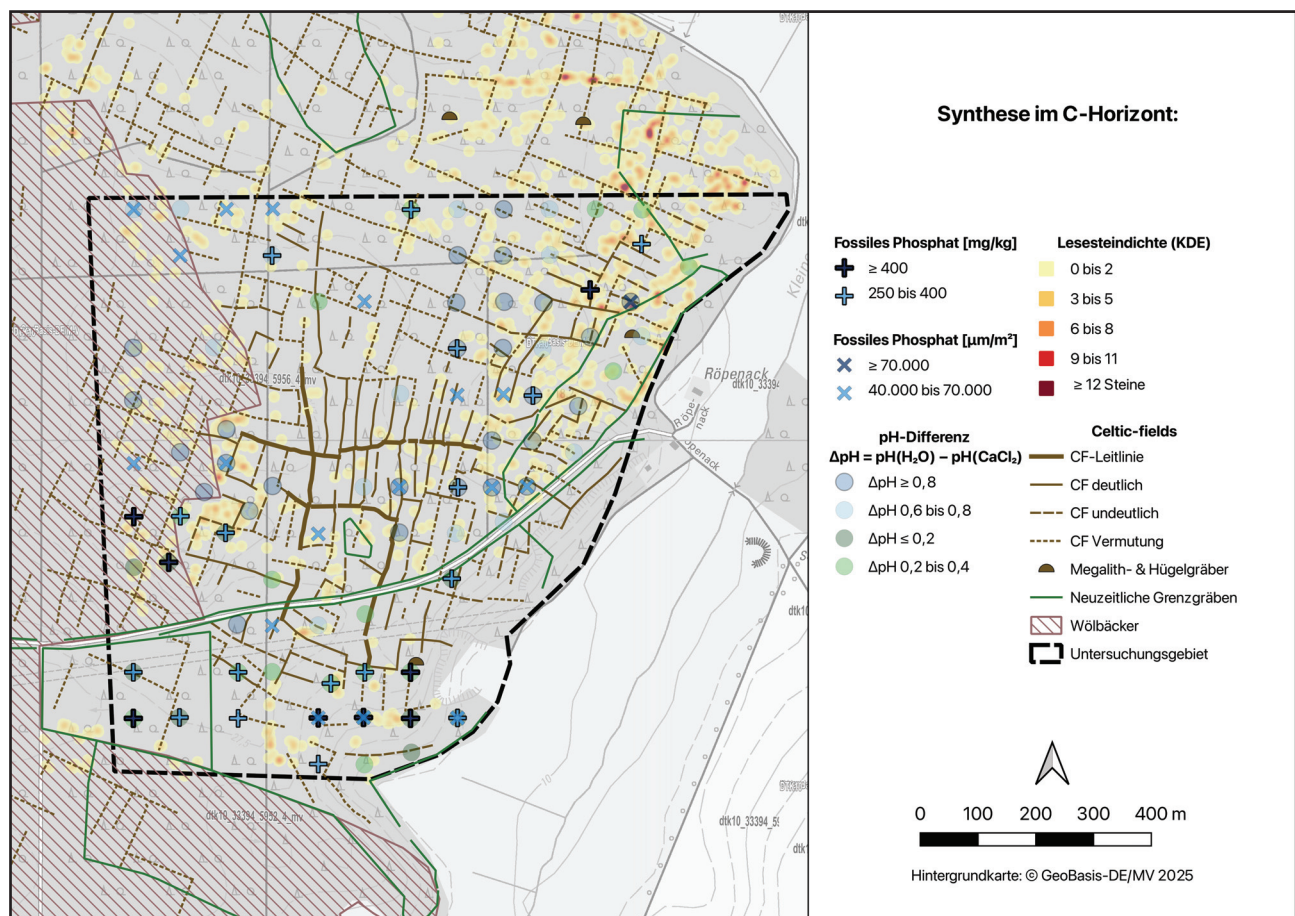


Abb. 9: Synthese im C-Horizont

Klassengrenzen für Phosphat und ΔpH steuern die visuelle Dominanz, wodurch Sensitivitätsprüfungen (z. B. alternative Jenks/Quantil-Breaks) sinnvoll sind.

ΔpH ist ein hilfreicher, aber unspezifischer Proxy, jedoch lässt sich ohne mineralogische/ karbonatische Einordnung die Prozessursache nur bedingt ableiten.

Insgesamt stützen die Karten die Interpretation einer teilweise intensiv genutzten, parzellenbezogenen Landschaft, in der sich Signale im B-Horizont am deutlichsten

niederschlagen, während der C-Horizont ein gedämpftes, überwiegend fossiles Hintergrundmuster bewahrt.

5.4 Phosphat (rezent, fossil, total)

Die Verteilung der Phosphatfraktionen in den drei untersuchten Schichten verdeutlicht die enge Kopplung von Phosphatbindung, Mobilität und Standortbedingungen. In Schicht A konnte rezent verfügbares Phosphat überwiegend nicht nachgewiesen werden, denn es wurden lediglich in einzelnen Proben messbare Konzentrationen bis zu 114 mg/kg festgestellt. Dies ist unter den stark sauren Bedingungen dieser Horizonte (vgl. pH-Werte Abb. A1 bis A6) erwartungsgemäß, da gelöstes Phosphat rasch an die Oberflächen von Eisen- und Aluminiumoxiden gebunden wird (Parfitt, 1989). Die wenigen Proben mit nachweisbarem rezentem Phosphat deuten auf kleinräumige Unterschiede beim Eintrag oder bei der Sorptionskapazität hin.

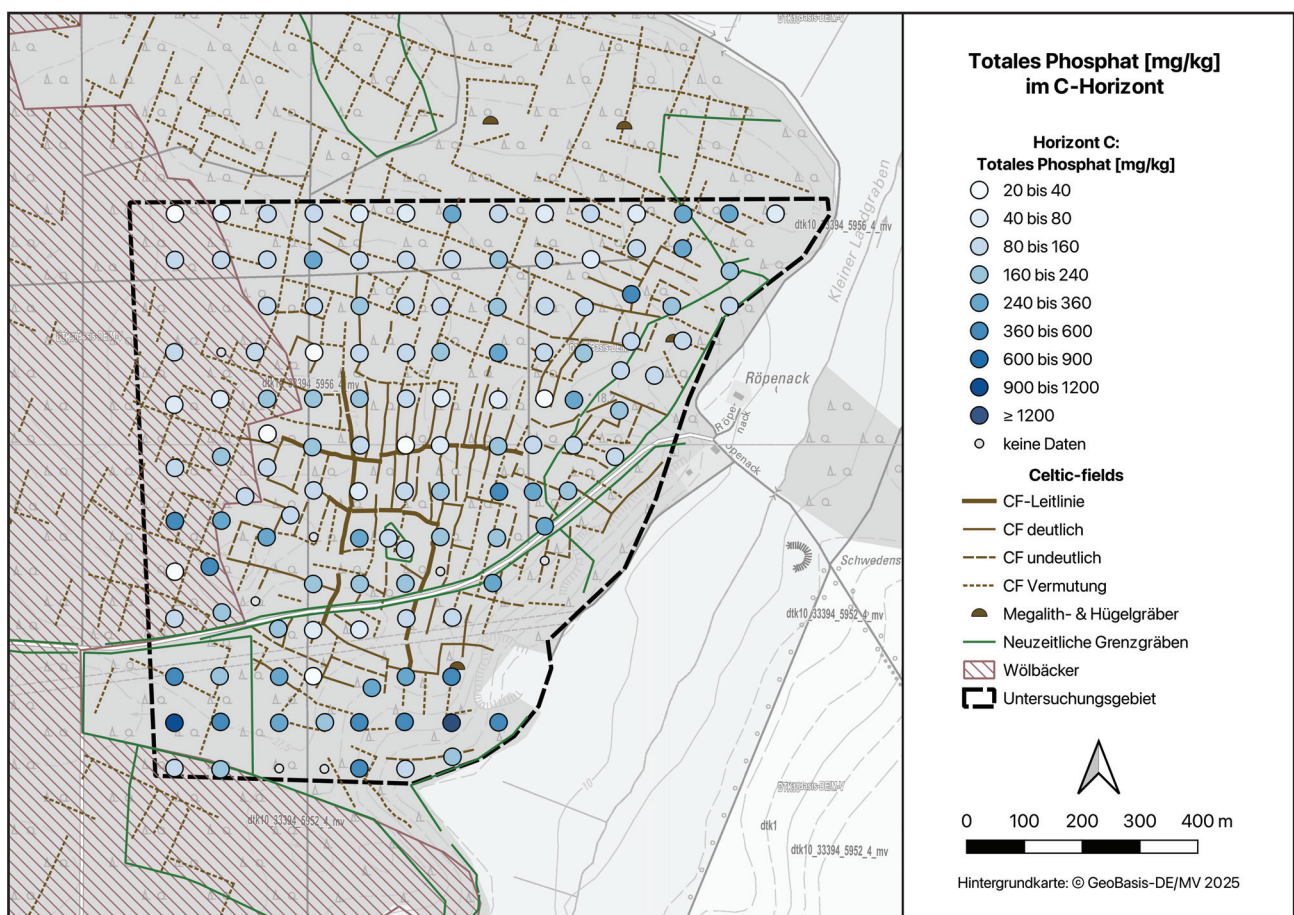


Abb. 10: Totales Phosphat im C-Horizont

In Schicht B liegt der Schwerpunkt der Phosphatgehalte im fossilen (vgl. Abb. A12) Bereich. Zwar konnten auch hier in einzelnen Proben rezent verfügbare Anteile zwischen 0 und 198 mg/kg

gemessen werden, der überwiegende Teil der Werte entfällt jedoch auf die langfristig gebundene Fraktion. Die Totalgehalte (vgl. Abb. A11) bewegen sich zwischen 24 und 948 mg/kg und zeigen damit eine geringere Streuung als in Schicht C.

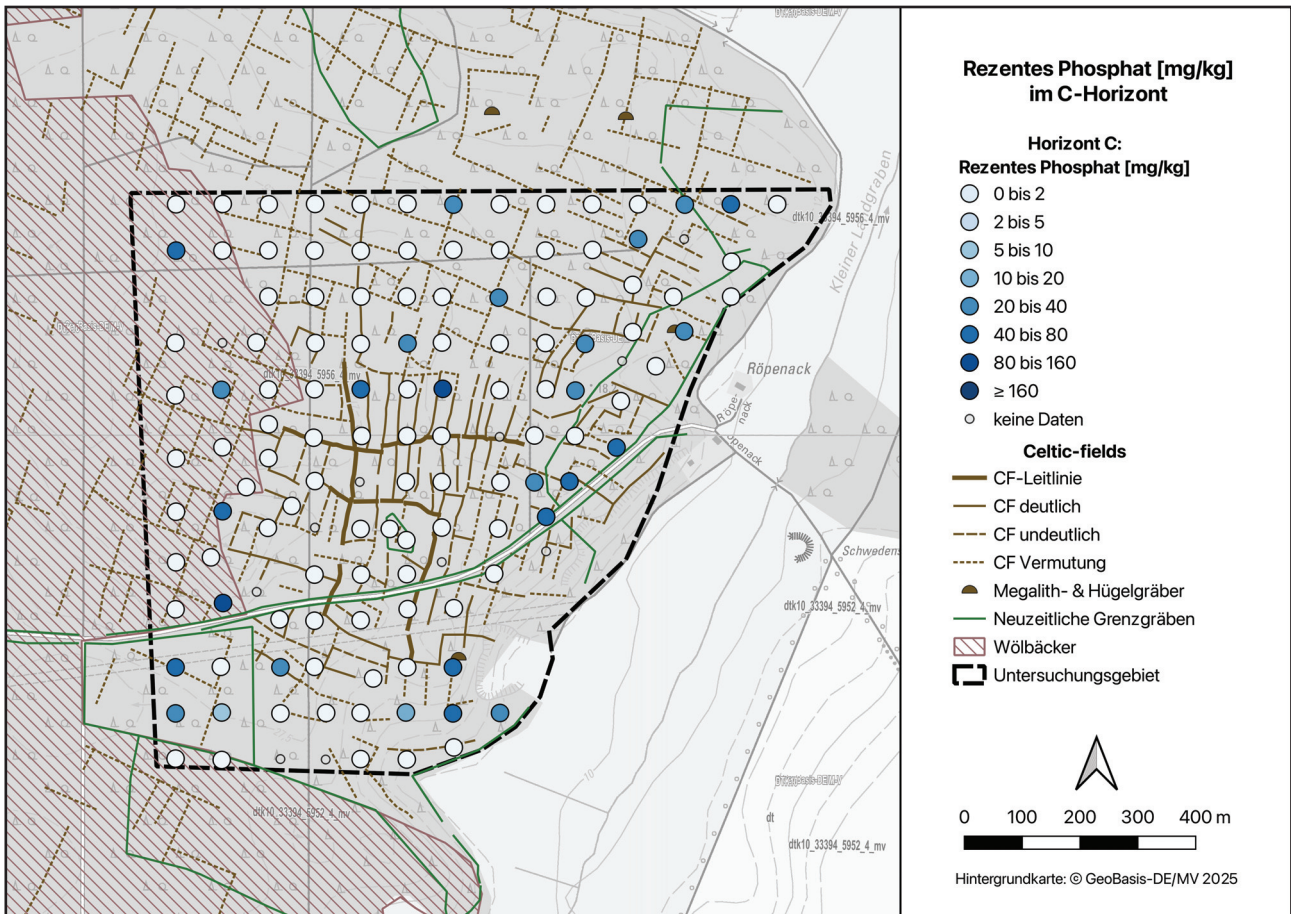


Abb. 11: Rezentes Phosphat im C-Horizont

Dass der rezent verfügbare Anteil in den meisten Proben ausbleibt, unterstreicht die starke Immobilisierung von Phosphat im Unterboden, wie sie für stark verwitterte Sandböden charakteristisch ist (Schachtschabel et al., 2014; Blume et al., 2010).

Die größte Variabilität tritt in Schicht C auf (vgl. Abb. 10 & 11). Hier reichen die Totalgehalte von 20 bis 998 mg/kg, während rezente Anteile zwischen 0 und 156 mg/kg auftreten. Entsprechend stark schwankt der fossile Anteil und erreicht in einzelnen Proben mehr als 1000 mg/kg. Diese ausgeprägte Streuung weist auf eine heterogene Zusammensetzung der Substrate hin. Neben der Sorption an Fe-Oxiden können hier auch weitere Bindungsmechanismen, wie die Ausfällung von Calcium-Phosphaten, eine Rolle spielen (Blume et al., 2010). Gerade die hohen fossilen Gehalte belegen, dass Phosphat in dieser Schicht langfristig akkumuliert wurde und in großen Mengen fixiert vorliegt.

Insgesamt zeigt sich somit ein eindeutiges Muster. Während in Schicht A und B überwiegend keine oder nur geringe Mengen an rezent verfügbarem Phosphat vorhanden sind, dokumentiert die fossile Fraktion die dauerhafte Bindung und damit die historische Signatur der Böden.

Schicht C nimmt eine Sonderstellung ein, da hier sowohl sehr hohe Totalgehalte als auch beträchtliche rezente Anteile auftreten. Für die Interpretation der Nutzungsdynamik bedeutet dies, dass die Phosphatverteilung nicht nur die frühere Nutzung der *Celtic-fields* widerspiegelt, sondern zugleich die aktuelle Standortdynamik sichtbar macht. Insbesondere das Verhältnis zwischen fossilem und rezentem Phosphat liefert wertvoll Hinweise auf die Stabilität der Einträge und die Wechselwirkung mit dem chemischen Milieu.

Die Ergebnisse zeigen also, dass sich die Phosphatanalyse als bewährte Methode zur Identifizierung ehemaliger Siedlungs- und Nutzungsflächen eignet. Ihre Aussagekraft ist jedoch eingeschränkt, da sie stark vom pH-Wert, der Bodenart und den jeweiligen Redoxbedingungen beeinflusst wird. Wie Helt-Nielsen und Kristiansen (2013) bereits zeigen konnten, reicht eine alleinige Betrachtung der Phosphatwerte häufig nicht aus, um historische Düngungspraktiken zuverlässig zu identifizieren. Insbesondere in Böden mit hoher Auswaschungsdynamik oder starker Fixierung an Eisen- oder Aluminiumoxide sind ergänzende multielementare Analysen erforderlich, um Nutzungsmuster eindeutig zu erkennen. Dies wird besonders in sauren, sandigen Substraten wie im vorliegenden Untersuchungsgebiet im Siedenbollentiner Wald deutlich, da hier sowohl Mobilisierung als auch Fixierung von Phosphat zusammen auftreten können.

5.5 Eisen und P/Fe

Die gemessenen Eisenwerte und die daraus abgeleiteten P/Fe-Verhältnisse machen deutlich, dass Eisen in den untersuchten Schichten eine zentrale Rolle bei der Bindung und Verteilung von Phosphat spielt.

In Schicht B (vgl. Abb. A14) liegen die Eisenkonzentrationen zwischen etwa 1.000 und 19.940 mg/kg. Diese Spannbreite deutet auf ein heterogenes Vorkommen von Eisenoxiden hin, das sowohl durch Geogene Prozesse als auch durch kleinräumige Bodendifferenzierungen bedingt sein kann. Die gleichzeitig sehr niedrigen bis mittleren P/Fe-Verhältnisse (0,003 bis 0,345) (vgl. Abb. A19) deuten darauf hin, dass der überwiegende Teil des Phosphats im Verhältnis zum vorhandenen Eisen stark gebunden ist. Unter den sauren Bedingungen dieser Schicht (vgl. Abb. A3 & A4) verstärkt sich dieser Effekt zusätzlich, da Fe-Oberflächen protoniert sind und eine hohe Affinität zu Phosphat aufweisen (Parfitt, 1989).

In Schicht C liegen die Eisenwerte mit 180 bis 19.320 mg/kg (vgl. Abb. A15) insgesamt niedriger. Gleichzeitig zeigen die P/Fe-Verhältnisse (vgl. Abb. A20) eine noch größere Spannweite von 0,002

bis 0,584. Diese Werte deuten darauf hin, dass neben stark gebundenem Phosphat auch Proben existieren, in denen das Verhältnis von Phosphat zu Eisen höher ausfällt und somit mehr Phosphat relativ zum Bindungspotenzial von Eisen vorhanden ist.

In Kombination mit den pH-Werten dieser Schicht, die teilweise bis in den neutralen Bereich reichen, lassen sich alternative Bindungsmechanismen wie die Ausfällung von Calcium-Phosphaten, nicht ausschließen (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

Ein Vergleich der beiden Horizonte zeigt, dass in beiden Schichten ausreichend Eisen vorhanden ist, um als dominanter Sorbent für Phosphat zu wirken. Die Unterschiede in den P/Fe-Verhältnissen spiegeln jedoch wider dass die Effizienz dieser Bindung durch das chemische Milieu und die Substratheterogenität beeinflusst wird. Für die Interpretation historischer Nutzungsschwerpunkte bedeutet dies, dass hohe fossile Phosphatgehalte nicht als direkte Nutzungssignatur betrachtet werden müssen. Insbesondere die niedrigen P/Fe-Verhältnisse in Schicht B belegen eine starke Immobilisierung von Phosphat unter sauren Bedingungen. Die höhere Variabilität in Schicht C deutet hingegen darauf hin, dass neben der langfristigen Bindung auch Remobilisierungsprozesse und alternative Fixierungsformen eine Rolle spielen.

5.6 Glühverluste

Die Ergebnisse der Glühverlustanalysen zeigen deutliche Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Temperaturen. Bei GV550 liegen die Werte in beiden Schichten überwiegend bei null und erreichen maximal 0,2 %. Somit ist eindeutig erkennbar, dass die Böden nur sehr geringe Mengen an organischer Substanz enthalten. Dies entspricht den Erwartungen für diluviale Sandböden, die typischerweise nährstoff- und humusarm sind (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

Der geringe Humusgehalt erklärt, warum organische Bindungsmechanismen für Phosphat nur eine untergeordnete Rolle spielen und die Fixierung überwiegend durch Eisen- und Aluminiumoxide gesteuert wird (Parfitt, 1989).

Die Werte von GV800 sind hingegen deutlich höher und erreichen in Schicht B bis zu 5,2 %, in Schicht C sogar 8,1 %. GV800 spiegelt somit nicht nur den Abbau organischer Substanz, sondern auch die Zersetzung und Entwässerung mineralischer Bestandteile, insbesondere Carbonate und Tonminerale, wider (Schachtschabel et al., 2014). Die höheren Werte in Schicht C deuten auf eine größere Heterogenität und einen höheren Gehalt an solchen mineralischen Komponenten hin. Dies deckt sich mit den ebenfalls beobachteten pH-Werten, die in dieser Schicht teilweise in den neutralen Bereich reichen und auf carbonatische Einschlüsse hinweisen.

Im Vergleich der beiden Horizonte verdeutlichen die Glühverluste somit einerseits die geringe Bedeutung organischer Substanz und andererseits die Rolle mineralischer Bestandteile bei der Steuerung der chemischen Eigenschaften der Böden.

Während GV550 kaum relevante Mengen anzeigt, zeigt GV800 eine deutliche Differenzierung zwischen den Schichten. Dies ist sowohl für die Interpretation der Bodengenese als auch für die Bewertung der Bindungsmechanismen von Phosphat von Bedeutung.

5.7 Carbonat

Die gemessenen Carbonatgehalte bestätigen die insgesamt geringe Bedeutung von Carbonat in den untersuchten diluvialen Sandböden. In Schicht A (vgl. Abb. A16) und Schicht B (vgl. Abb. A17) liegen die Werte überwiegend bei 0 %, lediglich einzelne Proben erreichen bis zu 2 %. Damit wird deutlich, dass Carbonate in den oberflächennahen und mittleren Profilbereichen weitgehend ausgewaschen sind. Dies entspricht den typischen Verhältnissen stark versauerter Sandböden, bei denen Carbonat als Puffer weitgehend entfernt wurde (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

In Schicht C (vgl. Abb. A18) treten dagegen vereinzelt höhere Carbonatgehalte von bis zu 4 % auf. Diese Werte deuten darauf hin, dass im tieferen Profilabschnitt noch carbonatische Einschlüsse oder heterogene Substrate vorhanden sind. Dies erklärt auch die höheren pH-Werte einzelner Proben in dieser Schicht, die bis in den neutralen Bereich reichen können. In solchen Fällen verändert sich die Bindungsform von Phosphat. Während in den sauren Schichten A und B die Sorption an Eisen und Aluminiumoxiden dominiert, kann es in carbonathaltigen Proben der Schicht C zur Ausfällung von Calcium-Phosphaten kommen (Parfitt, 1989).

Dies bedeutet für die Interpretation der Phosphatverteilung, dass Carbonat vor allem in den tieferen Bereichen als zusätzlicher Steuerungsfaktor zu berücksichtigen ist. Während die oberen Horizonte die typische Signatur versauerter, humusarmer Sandböden zeigen, spiegelt Schicht C eine größere Heterogenität wider.

Neben Eisenoxiden schließt sie auch Carbonat als Bindungspartner für Phosphat ein. Die Betrachtung der Carbonatgehalte trägt somit wesentlich dazu bei, die Unterschiede zwischen den Schichten und die langfristige Stabilität der Phosphatakkumulation in den *Celtic-fields* zu verstehen.

5.8 Bodenfarben (CIELAB)

Die Ergebnisse der Farbmessungen zeigen, dass sich die Proben aller drei Schichten im gelblichen Bereich des CIELAB-Farbraumes befinden. Dies zeigen die Farbtonwinkel h° , die konsistent zwischen etwa 59° und 76° liegen und damit eindeutig dem gelben Sektor zugeordnet sind (Blume et al., 2010). Grundlegend zeigen die Ergebnisse jedoch deutliche Unterschiede in allen drei Schichten und liefern wertvolle Hinweise auf bodenbildende Prozesse und chemische Rahmenbedingungen.

In Schicht A liegen die a^* , b^* und C^* -Werte im unteren Bereich, während die L^* -Werte von 20 bis 34 auf eine insgesamt dunklere Grundfärbung hinweisen. Die dunkleren Töne sind typisch für oberflächennahe Horizonte, die trotz des insgesamt geringen Humusgehalts (vgl. GV550) noch stärker durch organische Substanzen oder reduzierende Bedingungen beeinflusst sind. Die relativ niedrigen b^* - und C^* -Werte zeigen zudem, dass die Farbgebung weniger durch oxidische Eisenverbindungen als vielmehr durch Humusanteile geprägt ist (Blume et al., 2010).

In Schicht B steigt die Helligkeit (L^*) auf Werte zwischen 25 und 40 an. Dies bedeutet eine insgesamt hellere Erscheinung im Vergleich zu Schicht A. Gleichzeitig nehmen b^* und C^* zu, was eine stärkere Gelbfärbung und Farbsättigung anzeigt. Diese Entwicklung lässt sich durch eine verstärkte Präsenz von Goethit erklären, das für gelblich Töne verantwortlich ist und sich bevorzugt unter leicht sauren, oxidierenden Bedingungen bildet (Schachtschabel et al., 2014). Der nahezu konstante h° -Wert im Bereich zwischen 67° und 75° bestätigt die Dominanz gelblicher Farbtöne.

In Schicht C sind schließlich die höchsten Werte für b^* , C^* und L^* (30 bis 45) zu beobachten. Dies weist auf eine insgesamt hellere und stärker gesättigte Farbgebung hin, die auf eine ausgeprägte Dominanz von Eisenoxiden zurückzuführen ist. Diese Interpretation wird durch die hohen Eisenwerte (Total-Fe), die teilweise neutralen pH-Bedingungen und den Nachweis von Carbonat unterstützt. Carbonat trägt zur Stabilisierung oxidischer Mineralphasen bei. Die höheren a^* -Werte in dieser Schicht deuten zudem auf eine verstärkte Präsenz von Hämatit hin, das rötlich Farbanteile beisteuern kann.

Die Karte des B-Horizonts (vgl. Abb. A23) zeigt ein räumlich klar gegliedertes Muster gelb-sättigter Farbtöne und höherer Farbsättigung, das mit den Parzellenzügen korrespondiert. Diese Muster stimmen mit den chemischen Befunden (pH, Fe, P/Fe) überein und stützen die Ableitung, dass im B-Horizont vor allem oxidische Bedingungen und die spezifische Oberfläche die P-Retention strukturieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Farbmessungen die Ergebnisse der chemischen Analysen ergänzen und visuell erfassbar machen. Während Schicht A eher dunkle, humus- und

redoxgeprägte Farbtöne dominieren, zeigen die Schichten B und C eine zunehmende Aufhellung und Farbsättigung, die eng mit der Anreicherung und Stabilisierung von Eisenoxiden verknüpft ist. Somit spiegeln die Bodenfarben die Übergänge zwischen organisch beeinflussten und mineralisch dominierten Schichtbereichen wider und bestätigen die Ergebnisse der pH- Eisen- und Carbonat-Analysen.

5.9 Bodensstofffarben

Die Analyse der Bodensstofffarben zeigt einen klaren Trend von relativ homogenen Verhältnissen in Schicht A über zunehmende Variabilität in Schicht B bis hin zu einer ausgeprägten Heterogenität in Schicht C ist alles dabei. Diese Entwicklung lässt sich durch die Kombination aus mineralischer Zusammensetzung, Redoxprozessen und Standortbedingungen erklären.

Die homogene Ausprägung der Bodensstofffarben in Schicht A weist auf ein relativ eindeutiges Substrat hin, das durch diluviale Sandablagerungen geprägt ist. Die geringen Schwankungen der Messwerte und die nahezu konstanten Ableitungen deuten darauf hin, dass farbgebende Minerale wie Eisenoxide nur in geringem Maße vorhanden sind. Die gleichmäßig helle gelblich-braune Färbung kann gleichzeitig auch durch den Einfluss von Humusaufträgen und reduzierten pedogenen Prozessen erklärt werden. Diese haben den Substratuntergrund bisher nur schwach verändert (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

In Schicht B treten deutlich stärkere Unterschiede auf. Die Kombination aus hohen Reflexionswerten in einigen Proben und sehr niedrigen Werten in anderen deutet auf das Nebeneinander oxidischer und reduzierender Bedingungen hin. Diese Heterogenität ist typisch für Böden, die durch Staunässe oder wechselnde Grundwasserstände beeinflusst sind. Während gebleichte Zonen durch Sauerstoffarmut entstehen, treten unmittelbar daneben durch Eisenoxidation rötliche bis braune Färbungen auf (Ad-hoc-AG Boden, 2005). Die abrupte Variabilität, die sich in der ersten Ableitung zeigt, stützt die Interpretation, dass innerhalb der Schicht stark unterschiedliche, kleinräumige Standortbedingungen wirken.

Schicht C weist schließlich die größte Spannweite an Farbwerten auf. Hier sind sowohl stark oxidische als auch stark reduzierende Substrate nachweisbar, was auf eine komplexe und kleinräumig differenzierte Pedogenese schließen lässt. Die stark ausgeprägte Heterogenität kann durch die unterschiedliche Durchlässigkeit des Substrats, variierende Wasserstände und die Präsenz von Carbonat erklärt werden. Diese Faktoren beeinflussen lokal die Stabilität von Eisenoxiden. Jene Prozesse führen zu einem Mosaik aus oxidierten, gebleichten und reduzierten Bereichen, das sich in den gemessenen Reflexionswerten widerspiegelt (Blume et al., 2010; Schachtschabel et al., 2014).

Darüberhinaus ist zu berücksichtigen, dass die heutigen Bodenstofffarben nicht nur das Ergebnis natürlicher Bodenbildungsprozesse sind, sondern auch durch aktuelle Landnutzung beeinflusst sein können. Wie bereits bei den Bodentypen erwähnt, kann durch die forstwirtschaftliche Nutzung saurer Nadelstreu die Podsolierung und damit eine Aufhellung bestimmter Horizonte verstärken. Beweidung kann dagegen durch Tritteinfluss und Nährstoffeinträge lokal zu Veränderungen in der Pigmentierung führen. Diese Einflüsse überlagern die natürlichen Prozesse und tragen zur kleinräumigen Heterogenität der Farbwerte bei (Blume et al., 2010).

Zusammenfassend zeigen die Bodenstofffarben, dass die unteren Horizonte (Schicht B und insbesondere Schicht C) durch ein Vorhandensein oxidischer und reduzierender Prozesse geprägt sind, welche zu einer hohen Variabilität in der Farbgebung führen. Damit ergänzen die Ergebnisse die chemischen Analysen zu Eisen, pH-Wert und Carbonat und verdeutlichen, dass die Bodenstofffarbe ein sensibler Indikator für die Standortbedingungen und deren kleinräumige Unterschiede ist.

5.10 Bodentypen

Die Ergebnisse der bodenkundlichen Kartierung verdeutlichen, dass im Untersuchungsgebiet vor allem Parabraunerden in unterschiedlichsten Ausprägungen dominieren. Diese Böden sind typische Vertreter nährstoffarmer Sandlandschaften, in denen Lessivierungsprozesse zur Ausbildung von Bt-Horizonten geführt haben (Ad-hoc-AG Boden, 2005; Blume et al., 2010). Auf Grund ihrer mineralischen Zusammensetzung besitzen Parabraunerden ein hohes Potenzial zur Phosphatfixierung, da sowohl Tonminerale als auch Eisen- und Aluminiumoxide wirksam zur Sorption beitragen können.

Die punktwise erfassten Sonderformen, wie Stauwasser-Parabraunerden oder Pseudogley-Parabraunerden, deuten auf eine eingeschränkte Durchlässigkeit und Staunässe hin. Diese Bedingungen begünstigen Redoxprozesse, die sich auch in den chemischen Ergebnissen widerspiegeln. Parameter wie niedrige pH-Werte und hohe Eisenkonzentration zeigen, dass Phosphat in solchen Böden in hohem Maße an Eisenoxide gebunden wird. Gleichzeitig sind die landwirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten durch Staunässe eingeschränkt, was auch für die historische Bewirtschaftung der sogenannten *Celtic-fields* von Bedeutung gewesen sein dürfte. Podsolige Ausbildungen (Podsol-Braunerden, Podsol-Parabraunerden) weisen auf intensive Auswaschungsprozesse in den sandigen Substraten hin. Sie bestätigen die sehr niedrigen pH-Werte und die geringe Nährstoffverfügbarkeit, die in den chemischen Analysen sichtbar wurden (Parfitt, 1989; Schachtschabel et al., 2014). Unter diesen Bedingungen ist die Phosphatverfügbarkeit stark reduziert, da Phosphat an Aluminium- und Eisenoxide fixiert wird.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die heutige Bodenausprägung nicht nur auf natürliche Prozesse zurückgeht, sondern auch durch die aktuelle Landnutzung beeinflusst sein kann. Eine forstwirtschaftliche Nutzung führt häufig zu einer zusätzlichen Versauerung durch Nadelstreu und kann die Podsolierung verstärken. Beweidung kann hingegen zu einer lokalen Anreicherung organischer Substanzen und Nährstoffe beitragen, was in einzelnen Profilen die Dunkelfärbung oder leicht erhöhte P-Gehalte erklärt. Diese anthropogenen Einflüsse überlagern die bodengenetischen Prozesse teilweise, was deutlich macht, dass die heutigen Befunde sowohl natürliche als auch nutzungsbedingte Prägungen widerspiegeln.

Zusammenfassend zeigen die Bodentypen (vgl. Abb. 5) eine hohe kleinräumige Variabilität zwischen relativ stabilen Parabraunerden, podsolig geprägten und staunassen Standorten. Für die archäologische Interpretation bedeutet dies, dass die landwirtschaftliche Nutzung in den *Celtic-fields* wahrscheinlich auf den günstigeren Parabraunerden konzentriert war, während podsolige und stauwasserbeeinflusste Standorte nur eingeschränkt nutzbar gewesen sein dürften.

5.11 Bodenarten

Die in den Ergebnissen gezeigte Dominanz von Ss/Su2 und die punktuellen Si/SI/St-Linsen erklären, warum C ein gedämpftes Hintergrundmuster bewahrt.

Die Verteilung der Bodenarten mit den Klassen Ss, Su2, Si2, SI2 sowie St2 bis St3 spiegelt die sandigen Ausgangssubstrate der Region wider und folgt der Nomenklatur der Bodenkundlichen Kartieranleitung in der fünften und sechsten Auflage. Ss kennzeichnet weit verbreitete sandige Lagen, während Su2 und punktuell Su3 schluffreichere Varianten markieren. Si2 weist auf sandigen Schluff hin, SI2 auf lehmigen Sand, und St2 bis St3 zeigen lokal erhöhte Tonanteile.

Diese Terminologie und die diagnostischen Merkmale sind fachlich etabliert und werden durch die aktualisierte KA6 sowie bodenkundliche Standardwerke gestützt, wodurch eine konsistente Einordnung der beobachteten Texturen möglich ist (Ad-hoc-AG Boden 2005; Schachtschabel et al. 2014).

Die Dominanz von Ss und Su2 in beiden Tiefenebenen lässt sich mit der quartärgeologischen Entwicklung des norddeutschen Tieflands erklären, in dem weichselzeitliche Deck und Flugsande sowie fluvioglaziale Sedimente großflächig anstehen. Feinkornreichere Klassen wie Si2 SI2 und St2 bis St3 treten daher überwiegend kleinräumig als „Linsen und Zwickel“ auf und häufen sich an Mikroreliefkanten oder internen Strukturgrenzen, ohne die sandbetonte Grundtendenz zu überformen. Regionale Synthesen und Landschaftssteckbriefe beschreiben dieses Muster wiederholt und ordnen es den Sandlandschaften des oberen Tollensegebiets und der

angrenzenden glazialen Formationen zu, was die hier beobachtete Texturverteilung plausibilisiert (BfN o. J.; LUNG M-V 2011 / 2020).

Vertikal zeigt sich die größere Heterogenität im B-Horizont (vgl. Abb. A21), wo pedogene Durchmischung und ehemalige Bodenbearbeitung feinkörnige Beimengungen aus Schluff und Ton bandartig oder inselartig anreichern können. Der C-Horizont (vgl. Abb. A22) bleibt näher am geogenen Substrat und bewahrt ein ruhigeres Muster, in dem Ss und Su₂ überwiegen und feinkörnige Klassen diskret verteilt sind. Diese Differenzierung entspricht bodenkundlichen Erwartungswerten zur Gefügebildung und zum Porenspektrum in Sandlandschaften und wird in Lehrbüchern und Feldhandbüchern konsistent dargestellt. Dadurch lässt sich erklären, warum feinere Klassen in B sichtbarer zutage treten, während C die substratnahe Sandigkeit stärker beibehält, ohne dass eine grundlegende Texturumstellung erfolgt (Schachtschabel et al. 2014; USDA 2014).

Die fachliche Bedeutung dieser Texturkontraste liegt in den unterschiedlichen bodenphysikalischen Eigenschaften der Klassen. Bereits moderate Erhöhungen von Schluff und Ton verändern die Wasserhaltefähigkeit, die spezifische Oberfläche und die Aggregatstabilität und modulieren damit die standörtlichen Bedingungen, während rein sandige Bereiche durch hohe Durchlässigkeit und geringere Bindigkeit geprägt bleiben. Diese Zusammenhänge sind in der Standortlehre und in der Kartieranleitung verankert und liefern einen stimmigen Rahmen für die Interpretation der beobachteten Muster in einer sanddominierten, parzellenweise differenzierten Kulturlandschaft des norddeutschen Tieflands (Ad-hoc-AG Boden 2005; BGR 2024).

5.12 Normalisierung auf reaktive Oberfläche

Die Normierung des fossilen Phosphats auf die reaktive Oberfläche zielt darauf ab, texturbasierte Retentionseffekte zu reduzieren, die bei sanddominierten Standorten sonst zu Über- oder Unterbewertungen führen können. Als Proxy für die reaktive Oberfläche dient der Feinanteil (Schluff und Ton), wie in den bodenkundlichen Leitlinien (KA5/KA6) festgelegt. Diese verankern systematisch die Textur, die Horizontansprache und die Probenahme. Methodisch ist diese Vorgehensweise anschlussfähig an die standardisierte pH-Bestimmung, die für die Interpretation der Phosphatbindung zentral ist, sowie an die etablierte photometrische Bestimmungsmethodik für Phosphat (Murphy & Riley, 1962; vgl. praxisnahe Anwendungen in der Feld- und Grabungssituation bei Klamm et al., 1998). Dass die Phosphat-Bindung in mineralischen Böden stark von pH-Wert und Fe-Oxid-Phasen abhängt, ist bodenchemisch gut belegt (Schachtschabel et al. 2014; Stahr et al. 2008). Mechanistisch wird die Affinität zu Ferrihydrit/Goethit durch Ligandenaustausch und innere Komplexbildung erklärt (Parfitt 1989; Holliday & Gartner 2007).

Die Auflösung in 40.000 bis 70.000 und $\geq 70.000 \mu\text{m}/\text{m}^2$ erhöht die Trennschärfe gegenüber rein mg/kg-basierten Karten. Im B-Horizont bleiben die Hotspots nach Normalisierung bestehen bzw. werden schärfer, was die nutzungsgesteuerte Signatur stützt. Im C-Horizont wirkt die Normalisierung nivellierend, sodass einzelne Spitzen als lokale Besonderheiten und nicht als flächige Nutzung interpretiert werden.

Vor diesem Hintergrund ist das Ergebnis im B-Horizont aussagekräftig. Die den *Celtic-fields* nahen Cluster bleiben nach der Normierung bestehen beziehungsweise treten schärfer hervor. Damit spricht die Evidenz gegen eine rein texturinduzierte Erklärung und für eine geochemisch getragene Signatur, bei der die pH-gesteuerte Bindung an Fe-Oxide maßgeblich ist (Parfitt 1989; Holliday 2004; Schachtschabel et al. 2014).

Dies ist archäologisch bedeutsam, da Phosphat als Nutzungsmarker bewährt ist, jedoch ohne Kontextprüfung anfällig für Fehldeutungen bleibt (Eidt 1977; Oonk et al. 2009). Der gewählte Normalisierungsschritt unterstützt somit die Trennung zwischen texturbedingt hoher Retention und tatsächlichen Nutzungsschwerpunkten innerhalb der Parzellenfelder.

Im C-Horizont wirkt die Normierung hingegen nivellierend, da Einzelspitzen bestehen bleiben, während der Flächenanteil hoher Klassen jedoch sinkt. Dies ist konsistent mit einem substratnäheren Regime, in dem neben der Fe-gebundenen Sorption auch pH-abhängige Ausfällungen sowie Carbonateinflüsse an Bedeutung gewinnen und Texturunterschiede relativieren (Holliday & Gartner, 2007; Schachtschabel et al., 2014). Solche Milieueffekte erklären, warum die reine Flächennormalisierung im C-Horizont weniger differenziert ausfällt als im B-Horizont. Die Steuergrößen liegen hier stärker in der Mineralogie und im pH-Puffer als in der spezifischen Oberfläche. Die Übereinstimmung erhöhter fossiler Phosphat-Gehalte mit der frühneuzeitlichen ‚Nachtkoppel‘ spricht dafür, dass kartierte Anreicherungen reale Nutzungsimpulse abbilden. Zugleich zeigt die insgesamt geringe Amplitude im C-Horizont, dass landwirtschaftlich bedingte Einträge über Jahrhunderte bis Jahrtausende durch Umlagerung und Auswaschung weitgehend nivelliert werden.

Folgender Vergleich verschiedener phosphatbasierter Prospektionsansätze belegt, warum der gewählte Korrekturschritt fachlich sinnvoll ist.

Klassische Phosphat-Prospektionen liefern zwar robuste Nutzungshinweise, reagieren aber sensibel auf Standort- und Nutzungsgeschichte (Eidt 1977; Holliday 2004). Multi-Element-Analysen können zwar zusätzliche Kontraste hervorheben oder landwirtschaftliche Überprägungen identifizieren, sind jedoch methodisch aufwändiger (Helt-Nielsen & Kristiansen 2013; Wilson et al. 2009). Die Normalisierung auf die reaktive Oberfläche stellt hier einen pragmatischen Mittelweg dar. Sie bleibt im Phosphat-Paradigma, reduziert aber Textur-Bias und stärkt die Vergleichbarkeit, insbesondere dort, wo die Strukturen der *Celtic-fields* als raumwirksame Nutzungssysteme belegt sind (Zimmermann 1976; Schoknecht 1991; Arnoldussen 2018; LAKD M-V 2016).

Für die räumliche Einordnung der Cluster und ihre Abgrenzung gegenüber Hintergrundmustern ist der ergänzende Einsatz dichtebasierter Verfahren (zum Beispiel von KDE/Heatmaps) sinnvoll, um lokale Überkonzentrationen gegenüber flächigen Trends zu prüfen (Hinz, 2020). Gleichzeitig mahnen Fallstudien aus modernen Agrarräumen zur Vorsicht, da Düngung und Stallwirtschaft Phosphat-Signale überprägen und somit archäologische Lesarten verfälschen können (Weihrauch et al. 2017). Dass die Hotspots auch nach der Normalisierung im B-Horizont bestehen bleiben, spricht gegen eine methodische Verzerrung durch Textur oder aktuelle Nutzungseinflüsse und stützt die Deutung als historisches Nutzungssignal in den *Celtic-fields*.

Zusammenfassend ergibt sich, dass durch die Normalisierung auf die reaktive Oberfläche sich die Trennschärfe der P-Signale erhöht. Im B-Horizont bleibt das Nutzungssignal mit pH-/Fe-gesteuerter Bindung belastbar und konsistent, während im C-Horizont Milieu- und Mineralogieeffekte (pH-Puffer, Carbonat, Fe-System) die Texturdominanz überlagern.

Damit fügt sich das Ergebnis in das etablierte Verständnis zur Phosphat-Fixierung sowie in die kulturhistorische Interpretation der *Celtic-fields*-Landschaften ein (Eidt, 1977; Oonk et al., 2009; Arnoldussen, 2018).

5.13 Schichtspezifische Aussagekraft der Kenngrößen

In der Interpretation ist neben der Bewertung einzelner Parameter auch ihre schichtspezifische Aussagekraft entscheidend (vgl. Tab. 2). In Schicht A, die durch Humusauflage, forstliche Nutzung und frühere Beweidung deutlich anthropogen geprägt ist, dominieren kurzlebige Prozesse, wodurch tiefenchemische Analysen wie Carbonat oder GV800 hier nur eingeschränkt interpretierbar sind. Für den A-Horizont liegen zudem nur wenige Messwerte vor, sodass er in dieser Arbeit nur orientierend ausgewertet wird. Belastbare Aussagen, insbesondere zu nutzungsbedingten Signalen, werden daher nicht aus dem A-, sondern primär aus dem B-Horizont abgeleitet.

Im A-Horizont dienen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2)$ und der Farbparameter L^* (Ansprache nach Munsell 2009) als Screening-Indikatoren. Rezente Phosphatwerte werden auf Grund ihrer Anfälligkeit gegenüber aktuellen Einträgen und Durchmischung zurückhaltend interpretiert und nicht alleinentscheidend herangezogen (Eidt 1977; Holliday 2004; Holliday & Gartner 2007; Helt-Nielsen & Kristiansen 2013; Wilson et al. 2009; Weihrauch et al. 2017).

In Schicht B erweist sich das gesamte Parameterspektrum als aussagekräftig, da hier die Übergangszone zwischen humos geprägter Oberfläche und mineralischer Matrix liegt. Besonders die enge Kopplung von pH-Wert, Eisen und Phosphat macht diesen Bereich zu einem

Schlüsselfaktor der Nährstoffdynamik. Ebenso weisen deutlich variablere Bodenstofffarben auf Redoxprozesse hin, die sich in der Chemie widerspiegeln (Schachtschabel et al. 2014; Stahr et al. 2008). Die Bodenarten nach KA5 liefern einen stabilen Texturrahmen, denn neben Ss und Su2 treten lokal Si2, Sl2 sowie St2–St3 auf: Feinkornreichere Einschlüsse erklären ein höheres potenzielles Rückhaltevermögen und damit kohärentere Phosphat- und ΔpH -Muster als im A-Horizont (Ad-hoc-AG Boden 2005; USDA 2014).

Die Kombination aus Chemie, Farbe und Textur unterstützt die Abgrenzung von Nutzungsschwerpunkten und Übergangszonen; die methodische Einordnung folgt den einschlägigen Standards (Ad-hoc-AG Boden 2005). Mechanistisch ist die starke Phosphat-Bindung an Fe-Oxide (Ferrihydrit/Goethit) über Ligandenaustausch konsistent mit dem beobachteten Muster (Parfitt 1989; Holliday & Gartner 2007; Schachtschabel et al. 2014).

In Schicht C treten vor allem Parameter hervor, die die mineralische Substanz kennzeichnen. Eisen, Carbonat, GV800 und Bodenstofffarben geben Hinweise auf tieferliegende pedogenetische Prozesse und die Stabilität der Substrate. Punktuell beobachtete neutrale bis leicht alkalische pH-Ausreißer unterstreichen die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung. Die Bodenarten wirken hier erklärend, da der C-Horizont näher am geogenen Substrat bleibt und Ss sowie Su2 überwiegen, während Si2, Sl2 und St-Klassen diskret und linsenartig auftreten. Das daraus resultierende ruhigere, substratnahe Muster hilft, Hintergrundsignale von oberflächennahen Überprägungen zu trennen (Ad-hoc-AG Boden 2005; Schachtschabel et al. 2014).

Die Normalisierung des fossilen Phosphats auf die reaktive Oberfläche reduziert texturinduzierte Retentionseffekte und erhöht so die Trennschärfe zwischen Textur-Retention und tatsächlichen Nutzungsschwerpunkten. Im B-Horizont bleiben auf die *Celtic-fields*-bezogene Hotspots nach der Normalisierung bestehen, oder treten klarer hervor und sprechen gegen eine rein texturbedingte Erklärung. Im C-Horizont wirkt die Normalisierung nivellierend, was die größere Bedeutung von Milieu- und Mineralogieeffekten (pH-Pufferung, Fe-System, Carbonat) gegenüber der Textur unterstreicht (Parfitt 1989; Holliday & Gartner 2007; Schachtschabel et al. 2014). Dies ist im Sinne einer sorgfältigen Kontextprüfung wichtig, da Phosphat als klassischer Nutzungsmarker zwar robust, zugleich aber gegenüber Oberbodenstörungen und rezenten Einträgen sensibel ist (Eidt 1977; Oonk et al. 2009; Helt-Nielsen & Kristiansen 2013; Weihrauch et al. 2017).

Zur einheitlichen Beurteilung der Befunde wird eine Wertungsmatrix herangezogen, die alle relevanten Parameter bündelt und ihnen eine Aussagepriorität zuweist. Erfasst sind $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$, $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ und ΔpH mit definierten Schwellen, die Klassen für rezentes, fossiles und totales Phosphat, Referenzbereiche für Gesamt-Eisen und P/Fe sowie die Kontextlayer Lesesteindichte (KDE) und die Bodenarten nach KA5. Zudem wird das fossile Phosphat bezogen auf die reaktive Oberfläche ($\mu\text{g m}^{-2}$) berücksichtigt, um texturinduzierte Retentionseffekte zu reduzieren und die Vergleichbarkeit zwischen Punkten zu erhöhen. Jener Indikator wird stets im Verbund mit pH, ΔpH , Fe und P/Fe interpretiert.

Die Matrix operationalisiert die spätere Interpretation und stellt Reproduzierbarkeit sowie Vergleichbarkeit zwischen Profilen sicher. Methodisch anschlussfähig sind die standardisierte pH-Bestimmung, die photometrische Phosphat-Analytik (Murphy & Riley 1962) sowie die horizont-beziehungsweise texturbasierte Ansprache nach KA5/KA6 (Ad-hoc-AG Boden 2005; BGR 2024).

Die texturbereinigte Auswertung folgt dem Grundgedanken des vorsorgenden Bodenschutzes. Bewertungen sollen standortangemessen und methodisch belastbar sein, um Fehldeutungen und daraus resultierende unnötige Eingriffe zu vermeiden. Die Normalisierung erhöht die Treffsicherheit bei der Abgrenzung tatsächlich relevanter Teilflächen und trägt so zur sachgerechten Bewertung vor Planung und Maßnahmen bei (BBodSchG 1998).

Insgesamt fügen sich die Ergebnisse in das etablierte Verständnis der Phosphat-Fixierung ein und sind kompatibel mit der kulturhistorischen Interpretation der *Celtic-fields*-Landschaften, in denen Parzellenstrukturen und langdauernde Nutzungssysteme charakteristische, räumlich stabile Signaturen hinterlassen (Eidt 1977; Oonk et al. 2009; Zimmermann 1976; Schoknecht 1991; Arnoldussen 2018; LAKD M-V 2016).

Kategorie	Parameter/ Methode	Funktion & Aussagekraft	Methodische Rolle im Standardisierungsprozess	Empfehlung für die Praxis
Obligatorisch	pH-Wert (H ₂ O + CaCl ₂)	- Steuergröße für alle chemischen Prozesse (Sorption, Mobilität, Ausfällung)	- muss als erster Schritt bestimmt werden - entscheidet über Interpretierbarkeit aller weiteren Parameter	- immer erfassen - Kalibrierung nach DIN ISO 10390
	Eisen (Total-Fe)	- Hauptsorbent für Phosphat - zeigt Bindungskapazität über Fe-Oxide	- Grundlage zur Berechnung des P/Fe-Verhältnisses - wichtig zur Abgrenzung zwischen geogenen und anthropogenen Signalen	- immer erfassen - mind. photometrische Bestimmung
	Phosphat (rezent / fossil / total)	Kernparameter: - rezent = mobil - fossil = historisch gebunden - total = Gesamtsumme	- nur die Kombination aller Fraktionen erlaubt die Differenzierung zwischen aktuellen und historischen Einträgen	- duales Extraktionsverfahren verbindlich
	P/Fe-Verhältnis	- Verhältnis zeigt Sättigung der Bindungsplätze - Indikator für Stabilität der Signatur	- ergänzt die Einzelparameter - hilft, Überprägung durch Eisenfixierung zu erkennen	- immer berechnen und auswerten
	pH-Differenz ΔpH = pH(H₂O) – pH(CaCl₂)	- Indikator für Ionenstärke, Oberflächenladung/ Doppelschicht und Pufferung - ergänzt die Einzelwerte - hilft, Messartefakte (Kalibrierung/CO ₂ /Temperatur) von standorttypischen Effekten zu trennen	- abgeleiteter Kernparameter aus den ohnehin gemessenen pH-Werten - erleichtert Vergleichbarkeit zwischen Profilen/Studien	- immer berechnen
Wichtig / Optional	Bodenfarbe (CIELAB + visuell)	- Indikator für Humus, Redoxprozesse und Eisenoxide (Goethit = gelblich, Hämatit = rötlich)	- macht Prozesse sichtbar, die sich in chemischen Werten nur indirekt zeigen - dient als visuelle Kontrolle	- empfohlen - CIELAB-Werte standardisieren

Kategorie	Parameter/ Methode	Funktion & Aussagekraft	Methodische Rolle im Standardisierungsprozess	Empfehlung für die Praxis
	Glühverluste (GV ₅₅₀ , GV ₈₀₀)	- GV₅₅₀ = Humusgehalt - GV₈₀₀ = Carbonat- und Mineralzerfall	- zeigt, ob organische Bindungen oder Carbonatanteile Phosphat beeinflussen - ergänzt pH- und Eisenanalyse	- empfohlen
	Carbonatnachweis (HCl-Test)	- zeigt Puffereigenschaften und Bindung an Calciumphosphate	- wichtig bei neutralen bis alkalischen pH-Werten - erklärt Abweichungen im P/Fe-Muster	- optional - nur bei Carbonatverdacht
	Fossiles Phosphat / reaktive Oberfläche (µg m ⁻²)	- normalisiert P auf texturbedingte Retention (Feinanteil) - erhöht die Vergleichbarkeit zwischen Punkten/Teilflächen	- Validierung von P-Hotspots - Trennung Nutzungsschwerpunkt vs. Textur (nur nutzen, wenn Korngrößen (Schluff/Ton) vorliegen!)	- empfohlen in B/C, sofern Korngrößen verfügbar - nicht im A einsetzen -> nur Orientierung - nicht alleinentscheidend nutzen (Entscheidungsstütze zusammen mit pH/Fe/P-Indikatoren)
Kontext-bezogen	Bodentypisierung (nach KA5/KA6)	- ordnet chemische Befunde in pedogenetischen Kontext ein (z.B. Parabraunerde, Podsol)	- wichtig für standörtliche Variabilität und Vergleichbarkeit - macht Unterschiede zwischen Profilen erklärbar	- empfohlen, wenn Geländeprofile erhoben werden
	GIS-gestützte Auswertung (QGIS)	- verknüpft Punktdaten mit räumlichen Mustern - macht anthropogene Signale sichtbar	- zentrale Schnittstelle zwischen Labor- und Geländedaten - essenziell für die Interpretation der <i>Celtic-fields</i>	- sehr empfohlen - sollte Standard bei allen Studien sein
	Lesesteindichte (KDE)	- liefert räumlichen Kontext zur Deutung archäologischer Strukturen (<i>Celtic-fields</i>) und unterstützt die Hotspot-Detektion - erklärt räumliche Muster von P und ΔpH	- Kartogramm-Ebene zur räumlichen Synthese - kein chemischer Parameter, aber wichtiger Strukturgeber für Multilayer-Auswertung	- sehr empfohlen, wenn Geländepunktdaten (Steinpunkte) vorliegen
	Bodenarten nach KA5	- Texturrahmen des Standorts - Indikator für Wasserhaltevermögen, Durchlässigkeit und P-Retention	- Kontextvariable zur Interpretation von P-Signalen und ΔpH-Mustern	- immer erheben und in B- und C-Horizont getrennt dokumentieren

Tab. 2: Wertungsmatrix der relevanten Parameter

5.14 Vorgehensweise

Aus den Beobachtungen ergibt sich eine abgestufte Reihenfolge, die sich bei Phosphatkartierungen auf diluvialen Sandböden bewährt hat.

Den Auftakt bilden die pH-Messungen in Wasser und in 0,01 M Calciumchlorid. Daraus wird die pH-Differenz als $\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{CaCl}_2)$ berechnet. Die Berechnung von ΔpH schärft die Interpretation, da sie Hinweise auf die Ionenstärke, die Oberflächenladung und das Pufferverhalten liefert und somit alle Folgemessungen kontextualisiert. Sehr kleine ΔpH -Werte ($\leq 0,2$) und sehr große ΔpH -Werte ($\geq 0,8$) werden als lokal begrenzte Ausreißer behandelt und bei Bedarf im Gelände geprüft. Grundlage hierfür sind die einschlägige Norm zur pH-Bestimmung sowie bodenkundliche Standardwerke, die die Differenzmessung und ihre Aussagekraft beschreiben (Schachtschabel et al., 2014; Stahr, Bender & Lang, 2008; USDA, 2014).

Im zweiten Schritt folgen Gesamt-Eisen und das Verhältnis Phosphat/Eisen (P/Fe). Beide Größen dienen der Einordnung von Fixierung und Mobilisierung des Phosphats über Eisenoxide und Redoxprozesse. Erst danach ist eine differenzierte Auswertung der Phosphatfraktionen sinnvoll, bei der rezente, fossile und totale Phosphatgehalte herangezogen werden. Die Einordnung stützt sich auf klassische und neuere Arbeiten zu Phosphat-Signaturen in Aktivitätszonen sowie auf das etablierte kolorimetrische Bestimmungsverfahren (Eidt, 1977; Holliday & Gartner, 2007; Helt-Nielsen & Kristiansen, 2013; Murphy & Riley, 1962). Sofern Korngrößen vorliegen, wird im B- und C-Horizont das fossile Phosphat zusätzlich auf die reaktive Oberfläche normiert. Dadurch wird texturinduzierte Retention reduziert und die Vergleichbarkeit zwischen den Punkten erhöht. Die Interpretation erfolgt gemeinsam mit pH, Δ pH, Fe und P/Fe (Ad-hoc-AG Boden, 2005; BGR, 2024; Schachtschabel et al., 2014).

Ergänzend werden Carbonat und der Glühverlust bei 800 °C als Hinweise auf Pufferung und Mineralstabilität genutzt. Der Glühverlust erfolgt gemäß der entsprechenden Norm. Zusammen mit optischen Parametern können damit organische Anteile und thermisch stabile Phasen voneinander abgegrenzt werden. Farbmétrische Größen im CIELAB-Farbraum sowie Bodenstofffarben nach Munsell unterstützen die Interpretation von Redoxmustern und Eisenoxidausfällungen und dienen als visuelle Kontrollgröße der chemischen Analyse (DIN EN 15935: 2012; Munsell 2009; Schachtschabel et al. 2014).

Zur räumlichen Verankerung der chemischen Befunde werden die Vektoren der *Celtic-fields* und die Lesesteindichte aus einer Kerndichteschätzung (KDE) einbezogen. Beide Ebenen helfen dabei, Hotspots, Parzellenränder und Wegelemente zu präzisieren, und bilden die Grundlage für Synthesekarten. Die Sensitivität der KDE gegenüber Probendichte und Bandbreite wird beachtet und bei Bedarf mit Parameterläufen geprüft. Die räumliche Kontextualisierung stützt sich auf regionale Beispiele und methodische Leitfäden zur Dichteanalyse in der Archäologie (LAKD M-V 2016; Hinz 2020).

Die bodentypologische Einordnung erweitert die Auswertung in den tieferen Schichten. Da für den A-Horizont keine Korngrößenanalyse vorliegt, werden Bodenarten nur im B- und C-Horizont herangezogen. Die Ansprache folgt KA5 und der aktualisierten KA6, wodurch ein stabiler Texturrahmen entsteht, der Unterschiede in Durchlässigkeit und potenzieller Retention erklärt und die Interpretation von Phosphat- und Δ pH-Mustern absichert. In B und C dominieren häufig Sand (Ss) und schluffiger Sand (Su2). Lokal treten sandiger Schluff (Si2), lehmiger Sand (Si2) sowie toniger Sand (St2–St3) als linsenartige Feinkornanreicherungen auf. Die Verwendung der Bodenarten richtet sich nach den Kartieranleitungen und Feldhandbüchern, was die Vergleichbarkeit zwischen Profilen und Teilflächen erhöht (Ad-hoc-AG Boden 2005; BGR 2024).

Zusammengefasst folgt die Auswertung einer schichtbezogenen, multiparametrischen Logik: Zunächst wird Δ pH als Orientierungsgröße ermittelt, anschließend Fe und P/Fe und schließlich die Phosphatfraktionen (mit Normierung auf die reaktive Oberfläche in B/C, sofern möglich). Carbonat,

Glühverlust und Farbe dienen der Absicherung der chemischen Muster. Den Abschluss bilden die räumliche Kontextualisierung über *Celtic-fields* und Lesesteindichte sowie die bodentypologische Einordnung in B und C. Dieses Vorgehen verbindet Standardisierung und Anpassungsfähigkeit und trägt dazu bei, Fehlinterpretationen zu vermeiden und die Vergleichbarkeit zwischen Untersuchungsgebieten zu gewährleisten (Ad-hoc-AG Boden, 2005; Schachtschabel et al., 2014; Hinz, 2020).

5.15 Gesamtwertung

Die Ergebnisse sind eindeutig. Phosphatkartierung funktioniert auf den untersuchten Sandböden, sobald Phosphatwerte zusammen mit pH, Δ pH und Eisen ausgewertet werden. Die Textur allein erklärt die Muster nicht.

Der stärkste Befund liegt im B-Horizont. Hier überlagern sich erhöhte P-Werte mit passenden pH- und Δ pH-Klassen sowie einer Eisenausstattung, die zur Bindung von Phosphat passt. Dadurch entstehen stabile Cluster, die sich deutlich vom geogenen Hintergrund abheben. Dass diese Cluster auch nach methodischen Prüfungen bestehen bleiben, spricht gegen eine bloß texturbedingte Erklärung und für eine geochemisch getragene Signatur, bei der die pH-gesteuerte Bindung an Eisenoxide eine zentrale Rolle spielt.

Der C-Horizont bestätigt die Befunde, allerdings schwächer und punktueller. In tieferen Schichten ist das Milieu stärker vom Ausgangssubstrat geprägt; Mineralogie, pH-Puffer und lokale Carbonate wirken deutlicher mit. Einzelne Spitzen bleiben sichtbar, auch in der Nähe bekannter Strukturen, doch flächig hohe Klassen nehmen ab. Für Routinekartierungen ist die C-Schicht daher nachrangig, da sie das Gesamtbild ergänzt, jedoch nicht die höchste Aussagekraft liefert.

Wesentlich für die Vergleichbarkeit ist die Normierung der P-Werte auf die reaktive Oberfläche mit Angabe in $\mu\text{m}/\text{m}^2$. Diese Umrechnung reduziert Verzerrungen durch unterschiedliche Korngrößen und macht Ergebnisse zwischen Proben und Profilen besser vergleichbar. Auf den hier untersuchten Sandstandorten führt das zu klareren Karten und nachvollziehbaren Vergleichen zwischen B- und C-Horizont.

Die ergänzende Lesestein-Prospektion mit digitaler Erfassung und Kerndichteschätzung stützt die bodenchemischen Ergebnisse. Dichtezonen entlang von Rändern, Wegen oder Parzellen korrespondieren mit Bereichen erhöhter P-Werte. Wo archäologische Hinweise vorliegen, etwa am östlichen Talrand („Nachtkoppel“), finden sich passende Bestätigungen im Datensatz. So entsteht ein stimmiges Gesamtbild aus Chemie, Kartierung und Feldbeobachtung.

Für die praktische Anwendung bedeutet das, Beprobungen unterhalb des A-Horizonts anzusetzen. Der B-Horizont hat Priorität, da sehr tiefe Proben in der Regel keinen Zusatznutzen bringen. Die Auswertung sollte multiparametrisch erfolgen, also Phosphat stets im Verbund mit pH, Δ pH und

Eisen betrachten und bei Bedarf durch Farbe, Glühverlust, Carbonat und räumliche Kontextlayer ergänzen. Die Normierung auf die reaktive Oberfläche sollte beibehalten werden, da sie die Vergleichbarkeit deutlich verbessert, und die Karten sollten stets im Zusammenspiel der Parameter interpretiert werden.

Gleichzeitig bleiben Grenzen zu beachten. Moderne Düngung, Stallwirtschaft oder Umlagerungen können Phosphatsignale überprägen. Solche Einflüsse wurden berücksichtigt, können in künftigen Arbeiten aber noch genauer abgegrenzt werden, etwa durch Wiederholungsbeprobungen, einfache Mehr-Element-Analysen oder gezielte Profilvergleiche. Geophysikalische Verfahren können die Befunde ergänzen, liefern auf sandigen, steinarmen Substraten aber häufig nur geringe Kontraste, sodass die Bodenchemie in solchen Lagen der tragende Pfeiler bleibt.

Zusammenfassend gilt: Für Sandstandorte liefert eine multiparametrische Phosphatkartierung mit Fokus auf den B-Horizont und Normierung auf $\mu\text{m}/\text{m}^2$ die klarsten und verlässlichsten Hinweise auf historische Nutzung. Der Ansatz ist praktisch umsetzbar, gut vergleichbar und für weitere Anwendungen in ähnlichen Landschaftsräumen geeignet.

5.16 Limitation und Ausblick

Die Auswertung zeigt, dass tragfähige Aussagen erst aus dem Zusammenspiel mehrerer Parameter entstehen, denn einzelne Kenngrößen sind für sich genommen nicht hinreichend aussagekräftig. Einschränkungen ergeben sich aus der Probenauflösung und der kleinräumigen Heterogenität der diluvialen Sande, aus der fehlenden Korngrößenansprache im A-Horizont, aus punktuellen ΔpH -Ausreißern ($\leq 0,2$ bzw. $\geq 0,8$) sowie aus der Sensitivität der Kerndichteschätzung gegenüber Bandbreite und Probendichte. Hinzu treten prozessuale Unschärfen durch jahreszeitliche Feuchte- und Redoxwechsel, die sich in Farbe, Eisen und Phosphat niederschlagen, sowie analytische Streuungen, die trotz Standardisierung (pH nach DIN ISO 10390 2005; Phosphat kolorimetrisch nach Murphy & Riley 1962) nicht vollständig vermeidbar sind. Die Nutzung der Bodenarten blieb bewusst auf B und C beschränkt. Dadurch ist die Oberbodeninterpretation limitiert, zugleich wird jedoch eine klarere Trennung zwischen oberflächennahen Überprägungen und substratnahen Signalen möglich.

Im Ausblick deuten die Befunde auf mehrere Anschlusslinien hin. So erscheint eine höhere Stichprobendichte in Bereichen mit Hotspots und Übergangszonen geeignet, kleinräumige Varianz und Messunsicherheit besser abzubilden. Die in dieser Arbeit etablierte Auswertefolge (pH und ΔpH , anschließend Fe und P/Fe, danach Phosphatfraktionen) bietet einen Rahmen, der (wo Korngrößen vorliegen) durch eine Normierung des fossilen Phosphats auf die reaktive Oberfläche

in B/C ergänzt werden kann, um texturinduzierte Retentionseffekte weiter zu relativieren (Ad-hoc-AG Boden 2005; BGR 2024; Schachtschabel et al. 2014).

Für neutrale bis leicht alkalische Bereiche im C-Horizont könnte die Einbindung von Carbonat und Glühverlust (DIN EN 15935 2012) die Einordnung potenzieller Ca-Phosphate verfeinern, während farbmétrische Größen (CIELAB) und Munsell-Farben als visuelle Kontrollgröße der Chemie sinnvoll bleiben (Munsell 2009; Schachtschabel et al. 2014).

Die Vergleichbarkeit in der räumlichen Kontextualisierung über *Celtic-fields*-Vektoren und KDE ist insbesondere dann gegeben, wenn die Parametrisierungen (Bandbreite, Probendichte) nachvollziehbar dokumentiert und anhand von Parameterläufen beschrieben sind (Hinz 2020).

Angesichts der geringen Datenlage im A-Horizont behält eine orientierende Bewertung (Schwerpunkt pH, Δ pH, L*) Plausibilität, während in B/C Texturinformationen nach KA5/KA6 ihren Stellenwert für die Absicherung chemischer Muster behalten (Ad-hoc-AG Boden 2005; BGR 2024).

Insgesamt ergibt sich damit ein multiparametrischer, schichtbezogener und standortsensibler Bezugsrahmen, der Standardisierung mit Anpassungsfähigkeit an Textur- und Raumkontext verbindet und die Basis für belastbare Vergleiche zwischen Flächen bildet.

6. Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass sich auf diluvialen Sandböden siedlungsrelevante Phosphatsignale belastbar erfassen lassen, wenn die Kartierung multiparametrisch und in einer abgestuften Auswertefolge erfolgt. Im Gebiet der *Celtic-fields* treten gegenüber dem geogenen Hintergrund erhöhte Gesamt-P-Gehalte, charakteristische P/Fe-Verhältnisse und kontrastierende Bodenfarben auf, die auf anthropogene Einträge und parzellennahe Nutzung hinweisen.

Die Kopplung von pH, ΔpH und Eisen bildet dabei das zentrale Interpretationsgerüst, während Synthesekarten mit Strukturbezug (CF-Vektoren, KDE) die chemischen Muster räumlich verankern.

Im B-Horizont ist die Übereinstimmung von ΔpH -Klassen, P-Hotspots und Parzellenrändern am stärksten. Im C-Horizont fällt sie zwar schwächer aus, bleibt für langfristige Einträge jedoch aussagekräftig. Der A-Horizont wird auf Grund der geringen Datenlage und potenzieller rezent-anthropogener Überprägungen nur orientierend herangezogen.

Für die Standardisierung bewährt sich ein Set aus $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}/\text{CaCl}_2)$, ΔpH , Fe, P/Fe und Phosphatfraktionen, ergänzt um Farbe (CIELAB/Munsell), Glühverlust (800 °C), Carbonat sowie räumliche Kontextlayer (CF-Vektoren, KDE). Im B- und C-Horizont erhöht die Normierung des fossilen Phosphats auf die reaktive Oberfläche (sofern Korngrößen vorliegen) die Vergleichbarkeit und die Bodenarten nach KA5/KA6 liefern den Texturrahmen. Die daraus abgeleitete Wertungsmatrix unterscheidet obligatorische, optionale und kontextbezogene Parameter und stärkt Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit. Methodische Grenzen und Rahmenbedingungen sind in Kapitel 5.16 zusammengefasst.

Die Forschungsfrage ist zu bejahen: Auf nährstoffarmen Sandstandorten sind geoarchäologisch interpretierbare Phosphatanreicherungen nachweisbar, wenn die Methode standardisiert, multiparametrisch und räumlich verankert angewendet wird. Perspektivisch können Multielement-Analysen, Geophysik/Fernerkundung und transparente KDE-Parametrisierung die Übertragbarkeit auf vergleichbare Landschaftsräume Nord- und Mitteleuropas weiter erhöhen.

7. Nachwort

Diese Arbeit versteht sich als methodischer Beitrag und nicht als erneute Zusammenfassung der Ergebnisse. Im Mittelpunkt steht die Einsicht, dass belastbare Prospektionen auf Sandstandorten nur dann überzeugen, wenn Messreihen transparent dokumentiert, räumlich sauber verankert und in einer nachvollziehbaren Abfolge ausgewertet werden. Das betrifft die Reihenfolge der Analysen, die Wahl reproduzierbarer Schwellen und die klare Trennung von Hintergrund und Signal.

Wichtig war zudem, Unsicherheiten als Teil des Befundes mitzudenken und Ausreißer nicht zu verwerfen, sondern einzuordnen. Die vorgeschlagene Matrix schafft dafür einen gemeinsamen Arbeitsrahmen und erleichtert die Übertragbarkeit auf andere Untersuchungsräume. Perspektivisch sollte der Ansatz mit multielementaren Bestimmungen, Geophysik und Fernerkundung verknüpft werden, damit Prozesshypothesen gezielter geprüft werden können. So bleibt die Methodik schlank, prüfbar und anschlussfähig und öffnet den Blick auf Böden als quellensichere Archive der Landnutzung.

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden** (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). Hannover: BGR / Schweizerbart.
- Amt Treptower Tollensewinkel.** (o. J.). Gemeinde-/Regionalseiten Treptower Werder
- Arnoldussen, S.** (2018). The fields that outlived the farm? *Proceedings of the Prehistoric Society*, 84, 253–281.
- Aspinall, A., Gaffney, C., & Schmidt, A.** (2008). *Magnetometry for Archaeologists*. AltaMira Press.
- BBodSchG** (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten.
- Behre, K.-E.** (2008): Landwirtschaftliche Entwicklung und Umweltveränderungen in der Ur- und Frühgeschichte Europas. Stuttgart: Theiss.
- BfN.** (o. J.). Landschaftssteckbrief „Oberes Tollensegebiet (LE 32)“; LRT 9110
- BGR** (2024): Bodenkundliche Kartieranleitung – KA 6 (6. Aufl.). Hannover: BGR / Schweizerbart
- BGR** (2024): Bodeninformationssystem Deutschland.
- BNatSchG** (2009): Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege.
- BonaRes** (2023): Forschungsdaten und Methoden zur Bodennutzung.
- BWaldG** (1975): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft. BGBl. I, S. 1037.
- Clark, A.** (1996). Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology (2nd ed.). Routledge.
- DIN EN 15935** (2012): Bestimmung des Glühverlustes (LOI) von Schlamm, Boden und Abfall. Berlin: Beuth.
- DIN ISO 10390** (2005): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des pH-Werts. Berlin: Beuth.
- DSchG M-V** (2010): Gesetz zum Schutz und zur Pflege der Denkmale im Lande Mecklenburg-Vorpommern (Denkmalschutzgesetz – DSchG M-V).
- Eidt, R. C.** (1977): Detection and Examination of Anthrosols by Phosphate Analysis. **Science** 197(4311), 1327–1333.
- Forstamt Neubrandenburg – Landesforst MV** (2025): Informationsseite. \[Website].
- Helt-Nielsen, N. & Kristiansen, S. M.** (2013): Identifying ancient manuring: traditional phosphate vs. multi-element analysis of archaeological soil. *Journal of Archaeological Science* 40(10), 3414–3421.
- Hinz, M.** (2020): „Density (Point Pattern) Analysis – Heatmaps in der Archäologie.“ Online-Tutorial. martinhinz.github.io
- Holliday, V. T.** (2004): **Soils in Archaeological Research.** Oxford: Oxford University Press.
- Holliday, V. T. & Gartner, W. G.** (2007): Methods of Soil P Analysis in Archaeology. **Journal of Archaeological Science** 34(2), 301–333.
- Klamm, M., Weber, T. & Wunderlich, C.** (1998). Zur Phosphatmethode in der Archäologie - Reflektometrische Bestimmung von Phosphat auf archäologischen Grabungen. *journals.ub.uni-heidelberg.de*. <https://doi.org/10.11588/jsmv.1998.1.83043>
- LAKD M-V.** (2016). Fund des Monats: Die Landschaft unter der Landschaft (LiDAR/Celtic-Fields)
- Landesforst M-V.** (o. J.). Forstamt Neubrandenburg; Leitbild naturnahe Forstwirtschaft.
- LBGR.** (2018). **Das Quartär in Brandenburg** (Weichsel-Glazial, Stadiale/Phasen)

- LUNG MV** (1995): Landesweite Analyse und Bewertung der Landschaftspotentiale in Mecklenburg-Vorpommern. \[Karten/Materialsammlung].
- LUNG M-V.** (2011/2020). Naturräume GLRP; Bodenkunde-Karten/Metadaten.
- LUNG M-V** (2011): Digitale Geländemodelle und Kulturlandschaftsanalyse in Mecklenburg-Vorpommern.
- LUNG MV** (2022): Arbeitsanweisung zum Management von FFH-Waldlebensraumtypen (u. a. LRT 9110). \[Online-Dokument].
- Munsell Soil Color Charts** (2009): Grand Rapids, MI: Munsell Color (X-Rite Inc.).
- Murphy, J. & Riley, J. P.** (1962): A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta** 27, 31–36.
- Oonk, S.; Slomp, C. P.; Huisman, D. J.** (2009): Geochemistry as an aid in archaeological prospection and site interpretation: current issues and research directions. **Archaeological Prospection** 16(1), 35–51.
- Parfitt, R.L. (1989)**: Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *Journal of Soil Science*, 40(2), 359–369.
- Palmisano, A.** (2023): „Evaluating QField as a Mobile GIS Solution for Archaeological Survey.“ **ResearchGate** (Preprint).
- QField Documentation** (2024): „Heritage Impact Assessment – QField Success Story.“ \[Online-Dokumentation].
- QField GNSS** (2025): „Positioning (GNSS) – QField Documentation.“ \[Online-Dokumentation].
- Sánchez-Marañón, M.; Delgado, G.; Delgado, R.; Pérez Gómez, M. M.** (1995): Spectroradiometric and Visual Color Measurements of Disturbed and Undisturbed Soil Samples. *Soil Science* 160(4), 291–303.
- Schachtschabel, P., et al.** (2014). *Lehrbuch der Bodenkunde*.
- Schlichting, E.; Blume, H.-P.; Stahr, K.** (1995): **Bodenkundliches Praktikum.** 2. Aufl. Berlin: Blackwell Wissenschaft.
- Schoknecht, U.** (1991). Bodendenkmale im norddeutschen Tiefland (Celtic-Fields/Wallstrukturen)
- Stahr, K., Bender, J. & Lang, H.** (2008): *Bodenkunde und Standortlehre*. Ulmer, Stuttgart.
- Stahr, K.; Kandeler, E.; Herrmann, L.; Streck, T.** (2008): **Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor.** Stuttgart: Ulmer.
- USDA – United States Department of Agriculture (2014)**: Field Book for Describing and Sampling Soils (Version 3.0). Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Viscarra Rossel, R. A.; Walvoort, D. J. J.; McBratney, A. B.; Janik, L. J.; Skjemstad, J. O.** (2006): Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma** 131(1–2), 59–75.
- Weihrach, C., Brandt, I. & Opp, C.** (2017). Die archäologische Aussagekraft von Phosphatprospektionen auf gedüngten landwirtschaftlichen Nutzflächen – eine Fallstudie im Gebiet Sievern (Ldkr. Cuxhaven). *Archäologische Informationen*, 40(1), 279–290. <https://doi.org/10.11588/ai.2017.1.42497>
- Wilson, C. A.; Davidson, D. A.; Cresser, M. S.** (2009): An evaluation of the site specificity of soil elemental signatures for identifying and interpreting former functional areas. **Journal of Archaeological Science** 36(10), 2327–2334.
- Zimmermann, W. H.** (1976): Die eisenzeitlichen Ackerfluren – Typ „Celtic field“ – von Flögeln-Haselhörn, Kr. Wesermünde. **Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet** 11, 79–90.

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Maria Maas erkläre hiermit, dass ich diese Bachelorarbeit mit dem Titel **„Phosphatkartierung auf diluvialen Sandböden am Beispiel von ‚Celtic-fields‘ im Siedenbollentiner Wald“** eigenständig und ohne andere Hilfe als die in der Anlage aufgeführte Literatur und sonstiges unterstützendes Material verfasst habe.

Ich bestätige, dass alle Zitate von Sätzen und Teilen von Sätzen ordnungsgemäß als solche gekennzeichnet wurden. Alle Imitationen oder Anlehnungen von Inhalten wurden eindeutig markiert und sind, entsprechend dem Umfang und der Intention der getätigten Aussagen, korrekt mit ihren Originalquellen angegeben.

Diese Arbeit wurde bisher keiner Prüfungsbehörde vorgelegt und ist zum Zeitpunkt dieser Erklärung noch nicht veröffentlicht.

Neubrandenburg, 22.10.2025

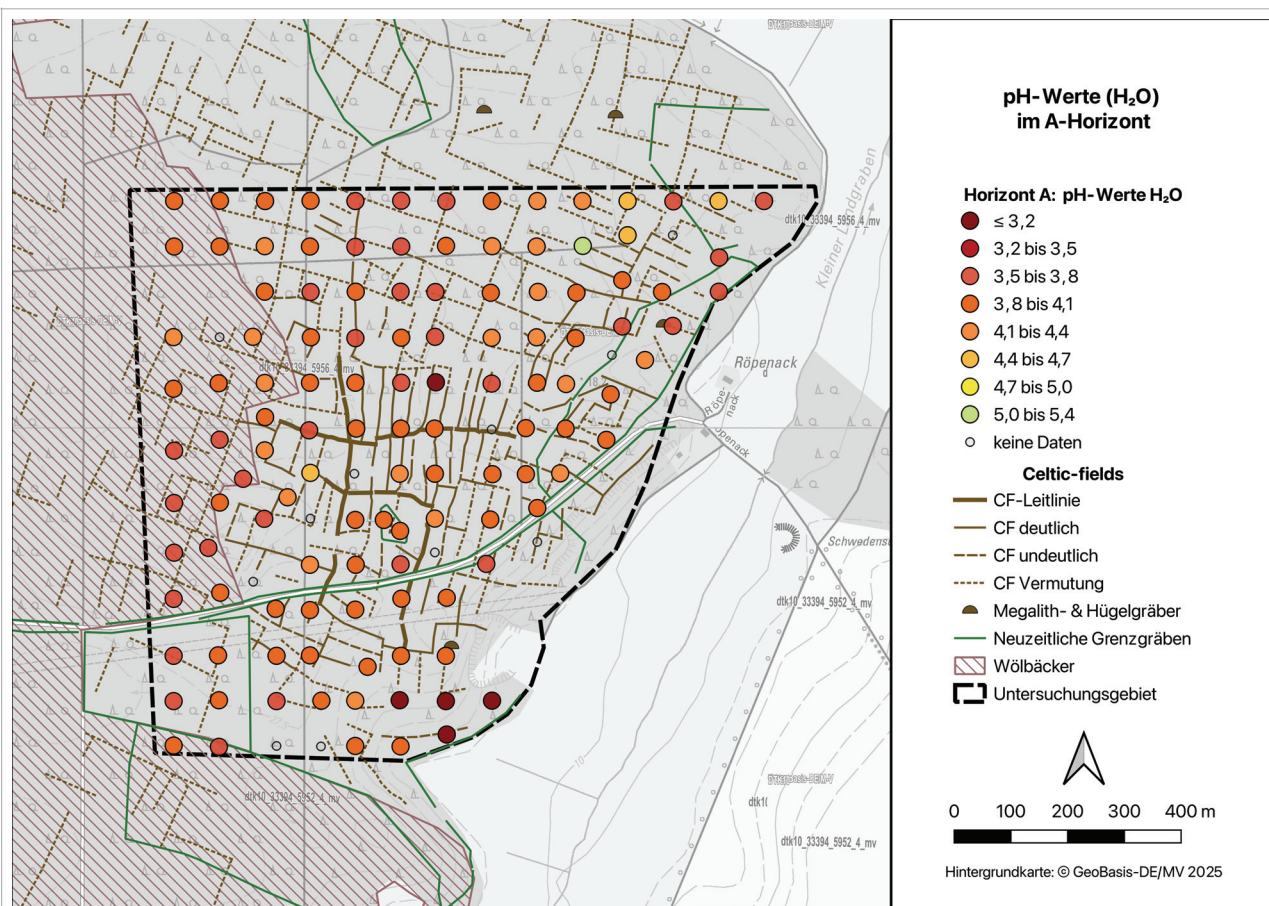
Maria Maas

Abbildungsverzeichnis

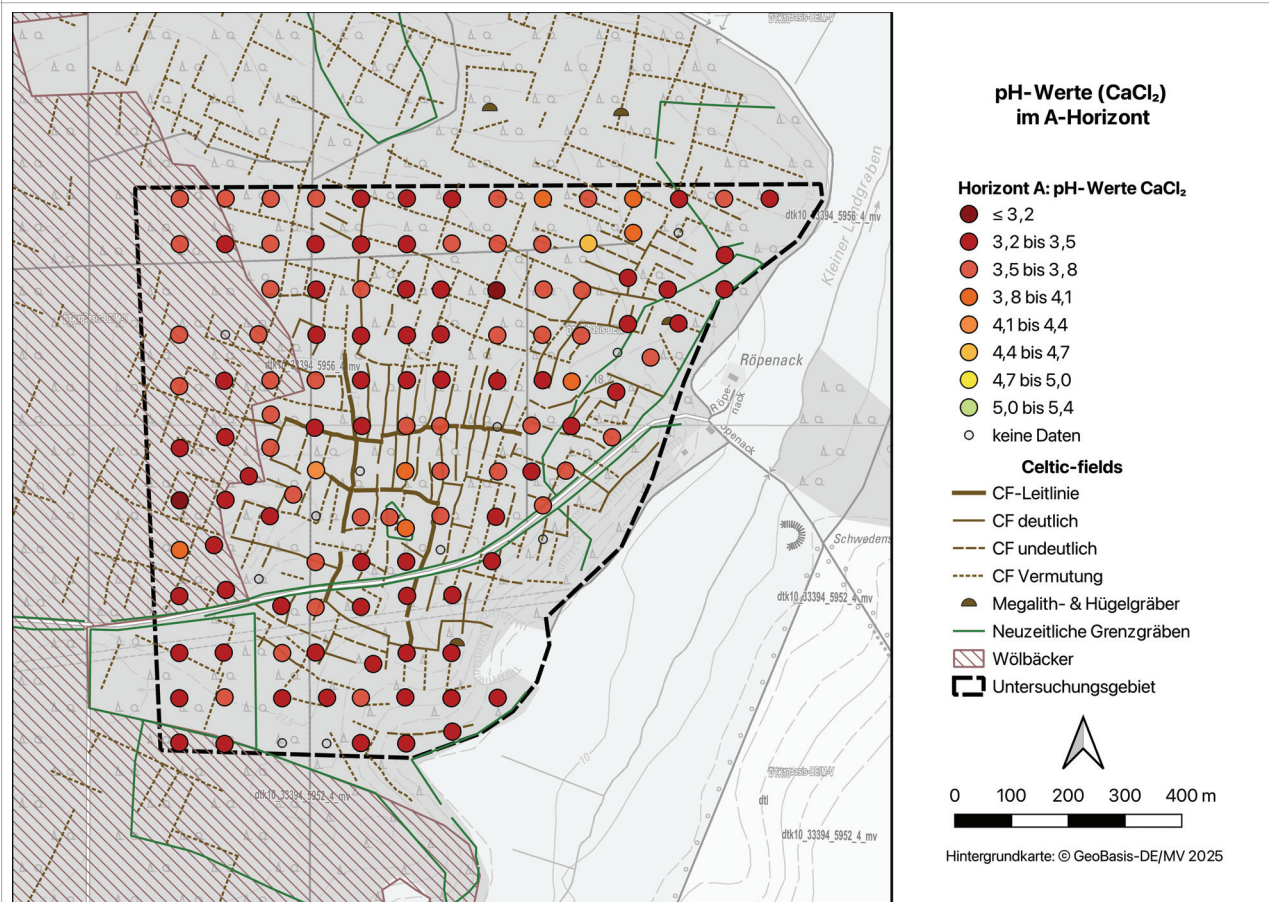
Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebiets Siedenbollentin	4
Abb. 2: DGM-Auswertung der <i>Celtic-fields</i>	7
Abb. 3: Probenamестellen im Untersuchungsgebiet Siedenbollentin	9
Abb. 4: Kartierung oberflächlich erkennbarer Steinvorkommen und Lesesteindichte (KDE)	11
Abb. 5: Verteilung der Bodentypen	30
Abb. 6: Fossiles Phosphat bezogen auf die reaktive Oberfläche im B-Horizont	32
Abb. 7: Fossiles Phosphat bezogen auf die reaktive Oberfläche im C-Horizont	32
Abb. 8: Synthese im B-Horizont	36
Abb. 9: Synthese im C-Horizont	37
Abb. 10: Totales Phosphat im C-Horizont	38
Abb. 11: Rezentos Phosphat im C-Horizont	39

Tabellenverzeichnis

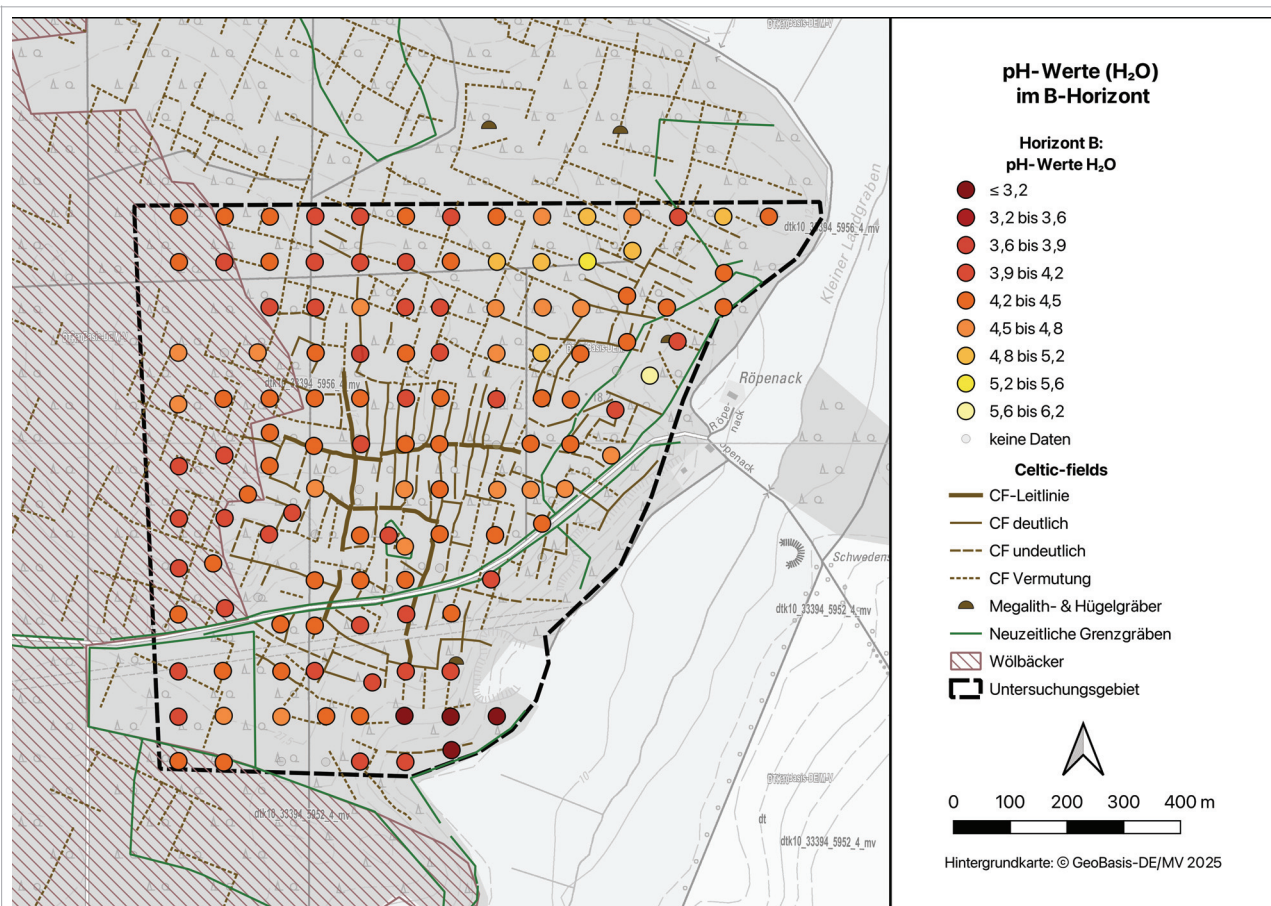
Tab. 1: Struktur der GIS-Attributtabelle für Boden- und Laborparameter	17
Tab. 2: Wertungsmatrix der relevanten Parameter	51, 52



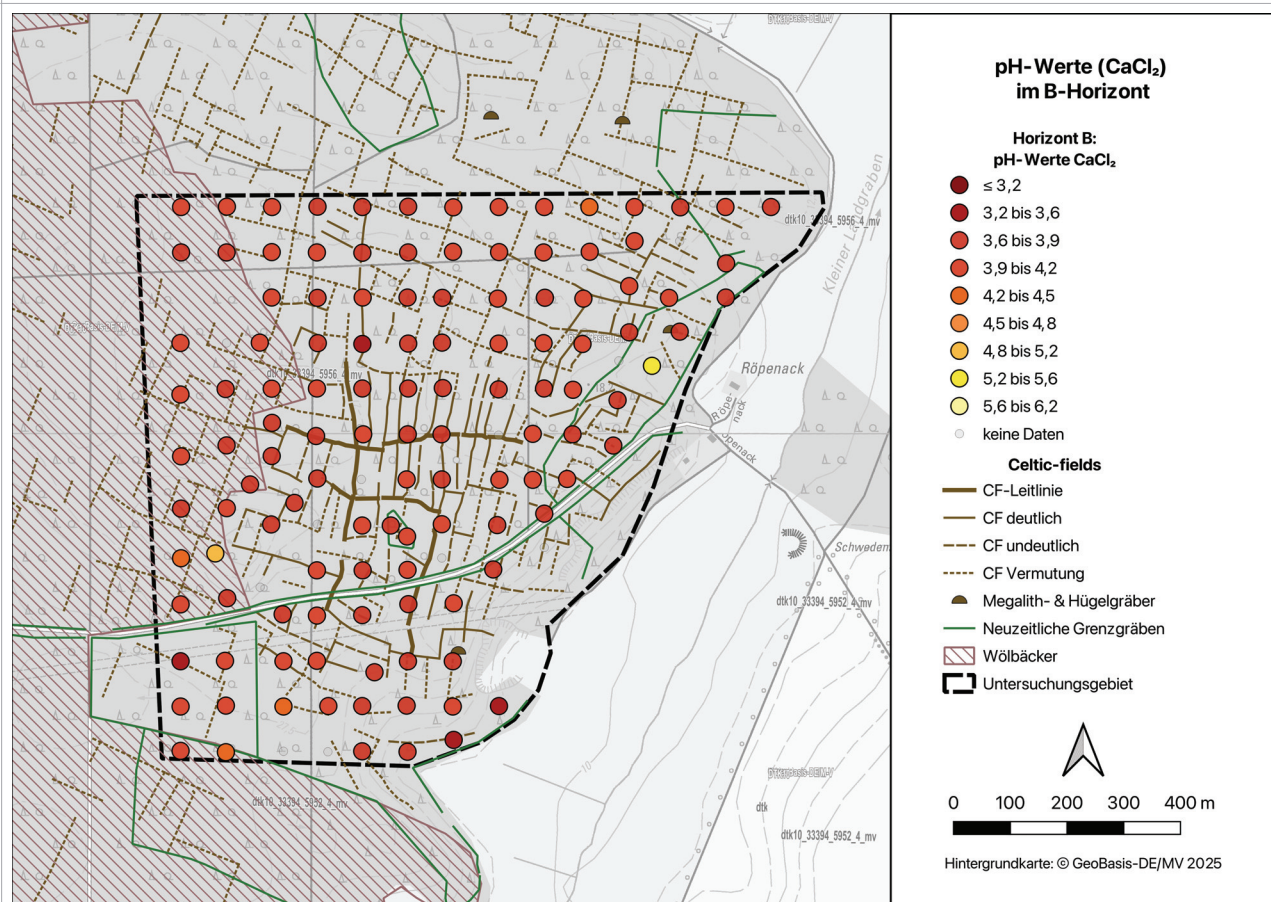
A1: pH (H₂O) im A-Horizont



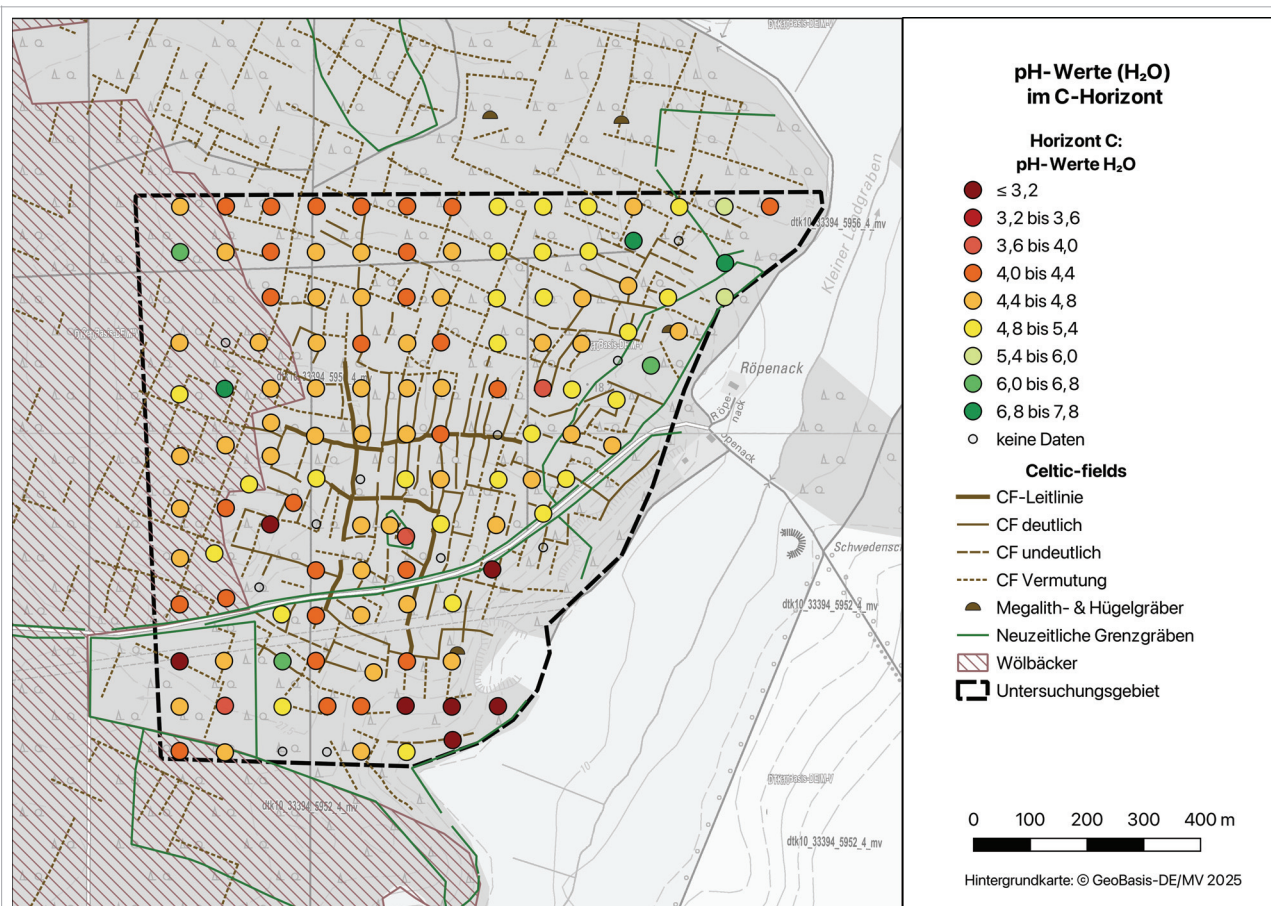
A2: pH (CaCl₂) im A-Horizont



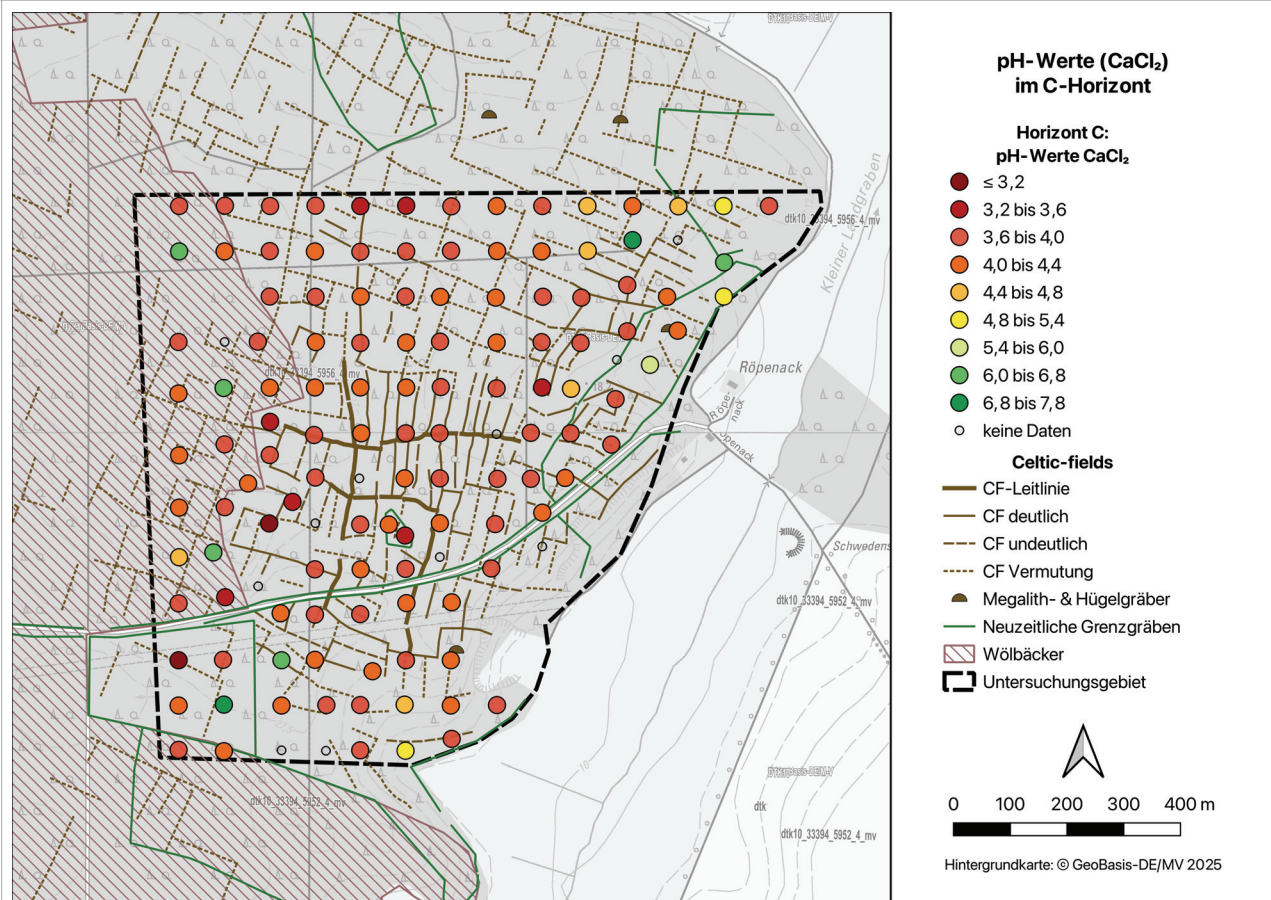
A3: pH (H₂O) im B-Horizont



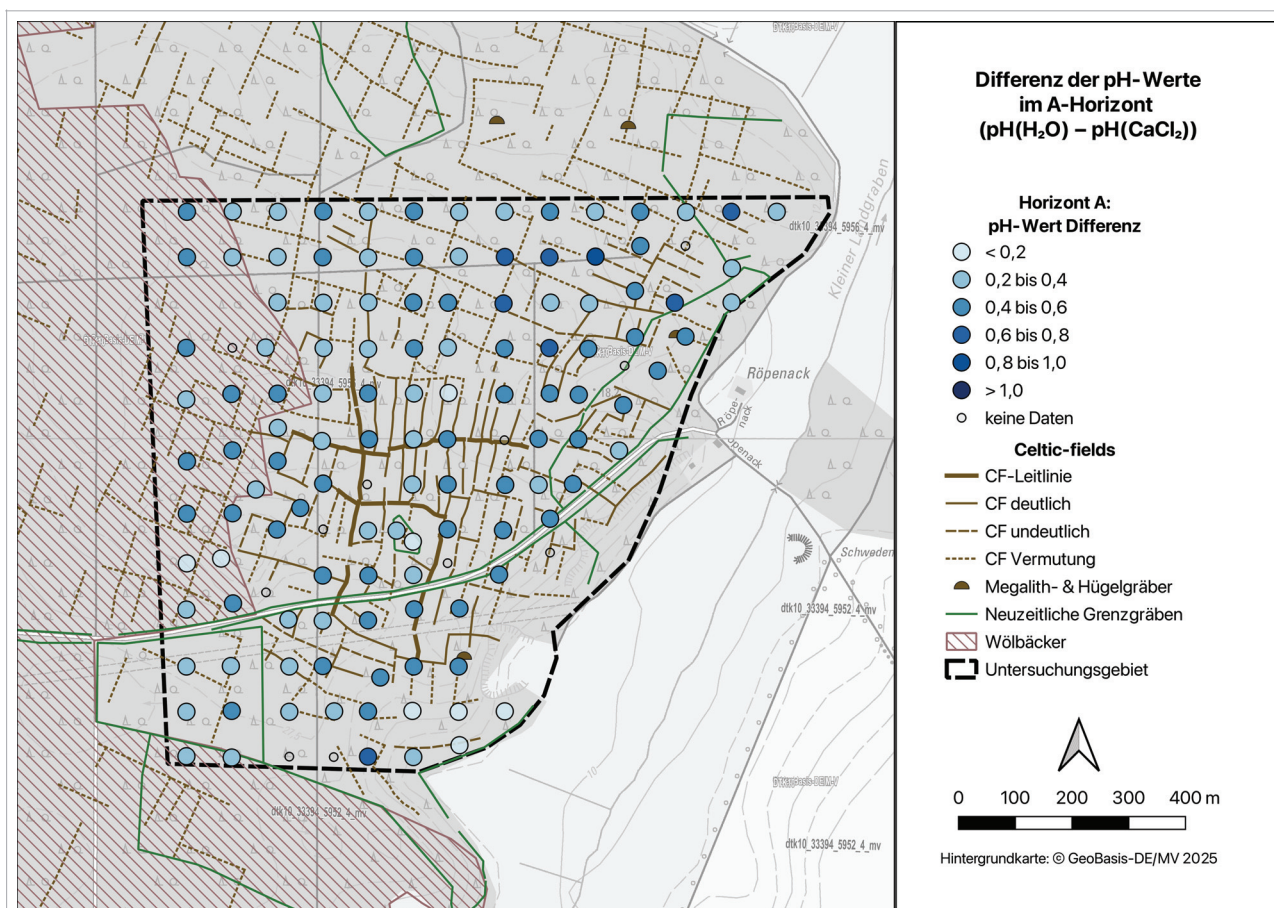
A4: pH (CaCl₂) im B-Horizont



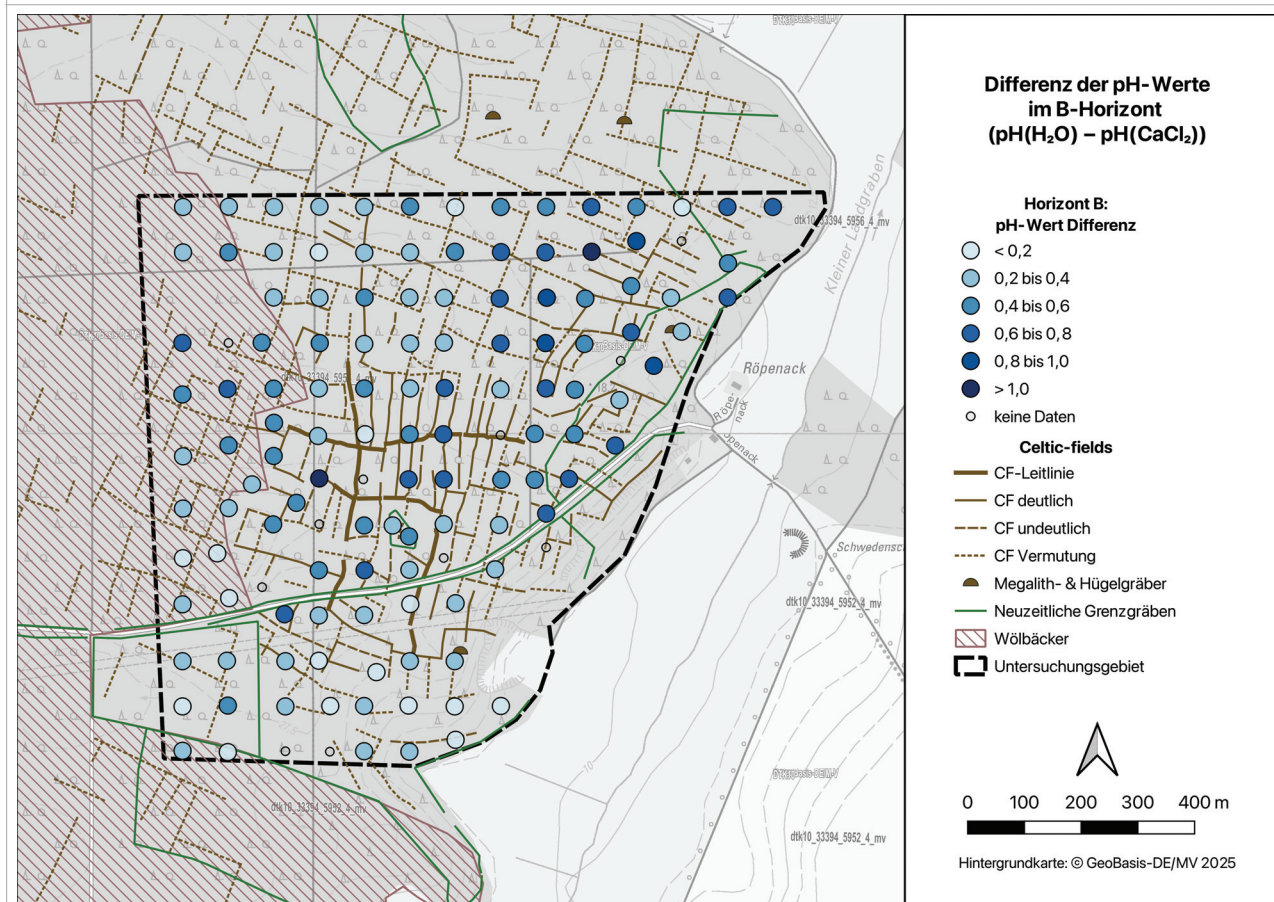
A5: pH (H₂O) im C-Horizont



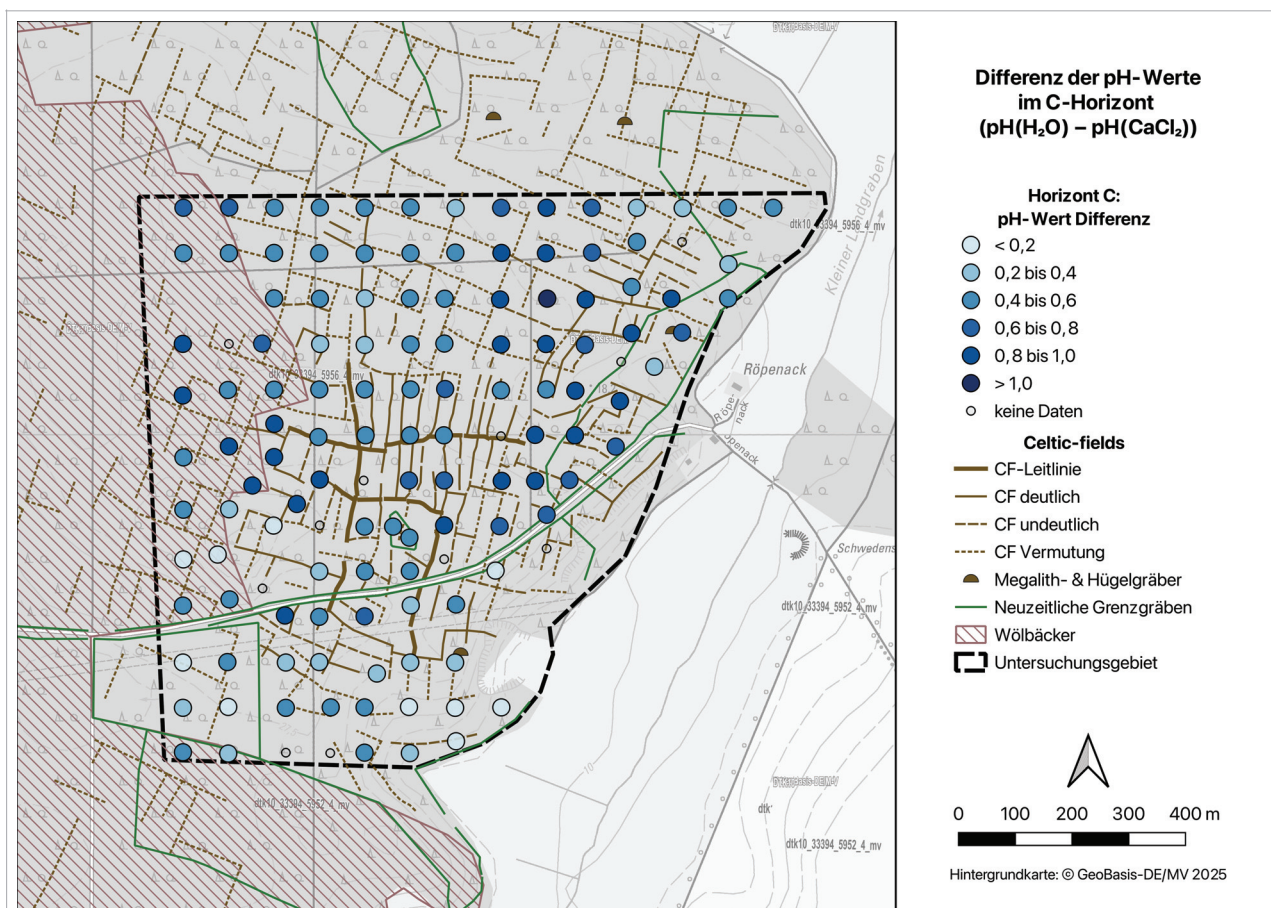
A6: pH (CaCl₂) im C-Horizont



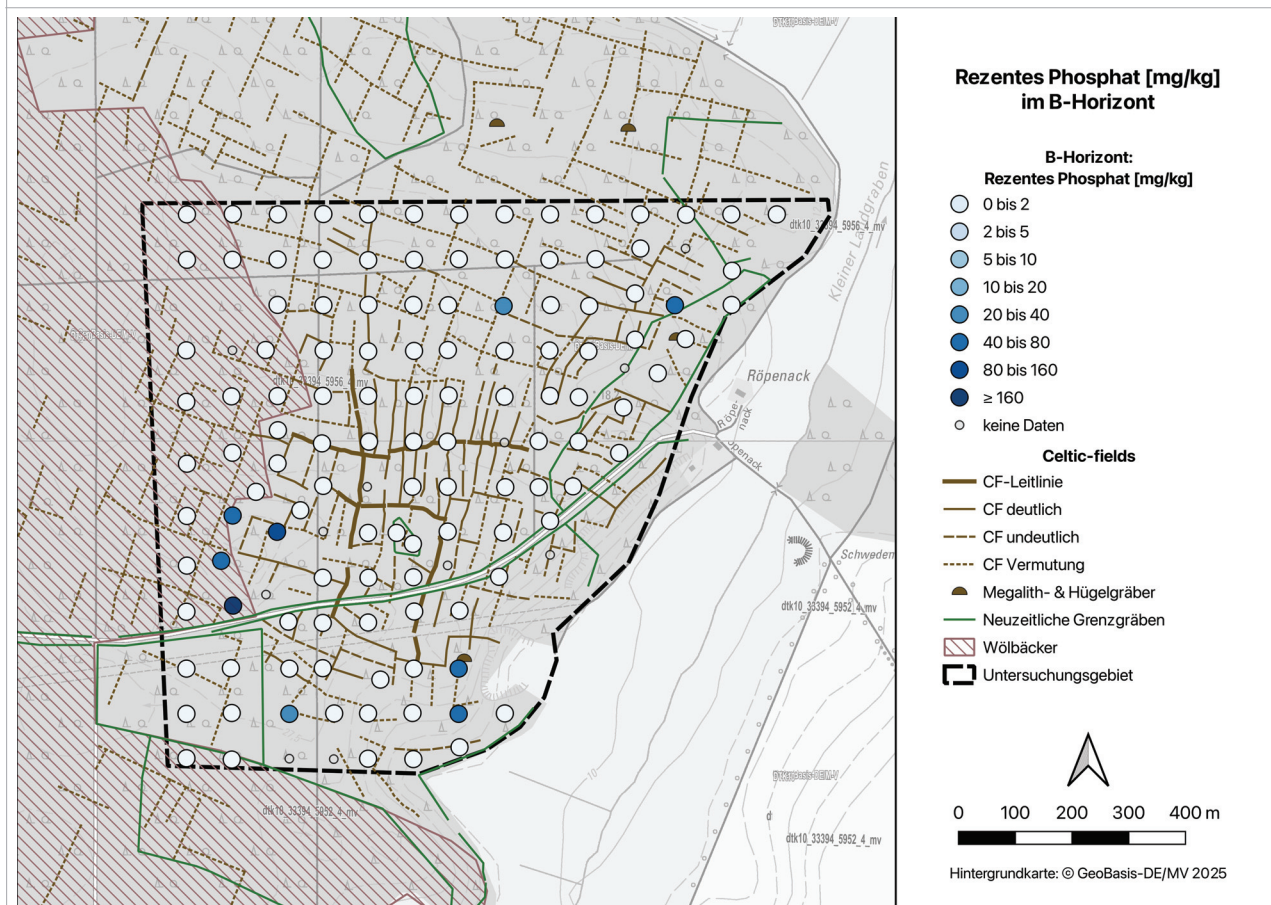
A7: pH-Differenz $\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{CaCl}_2)$ im A-Horizont



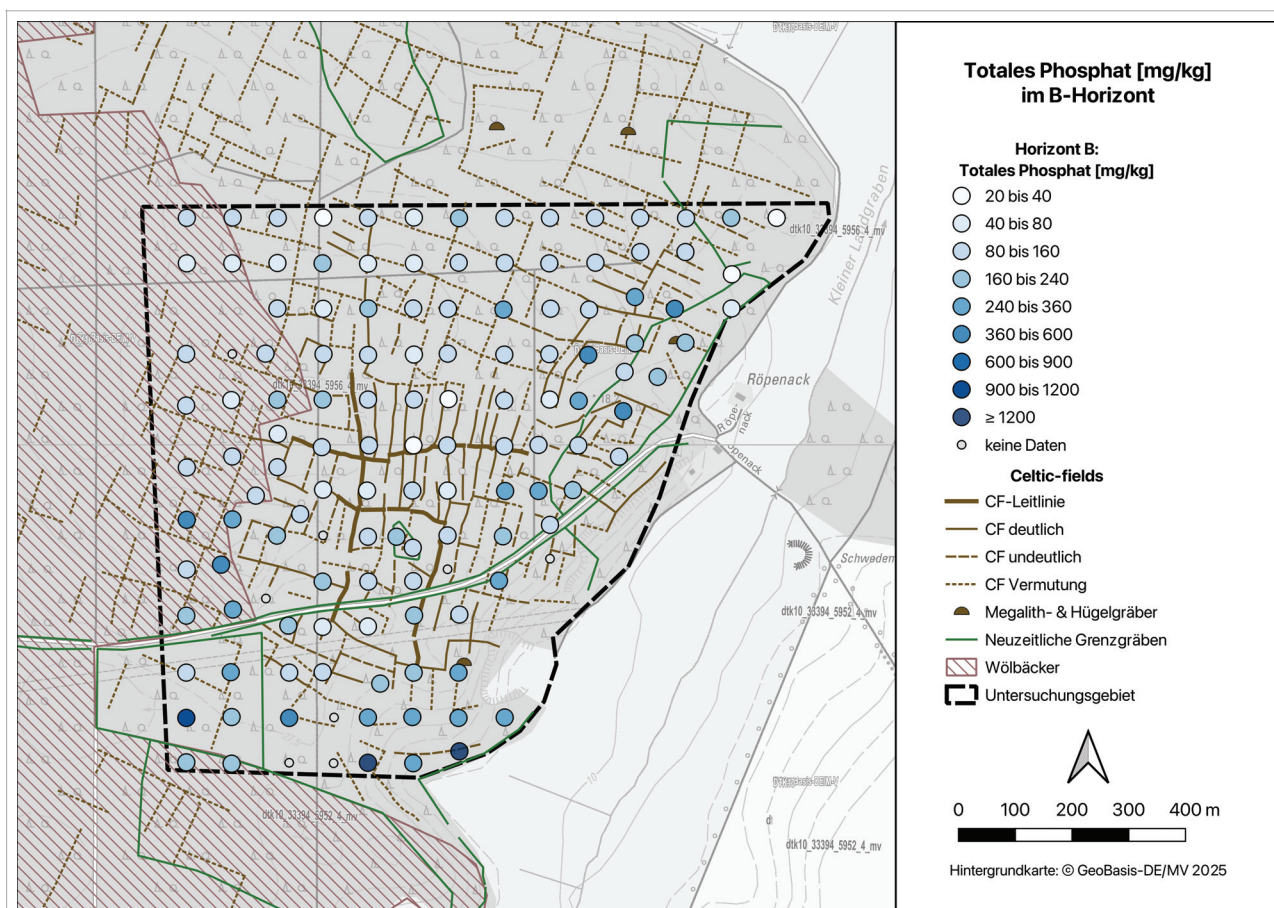
A8: pH-Differenz $\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{CaCl}_2)$ im B-Horizont



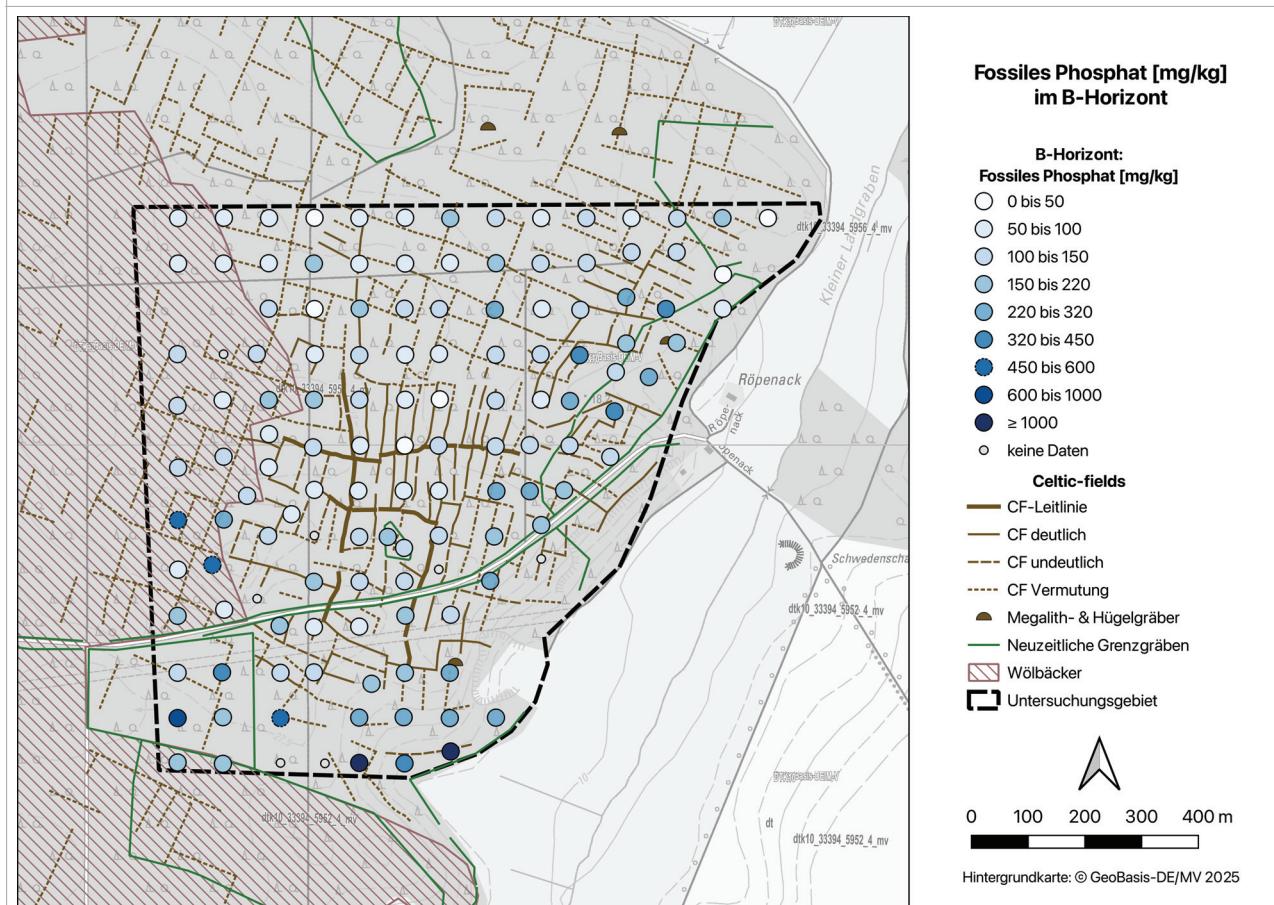
A9: pH-Differenz $\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{CaCl}_2)$ im C-Horizont



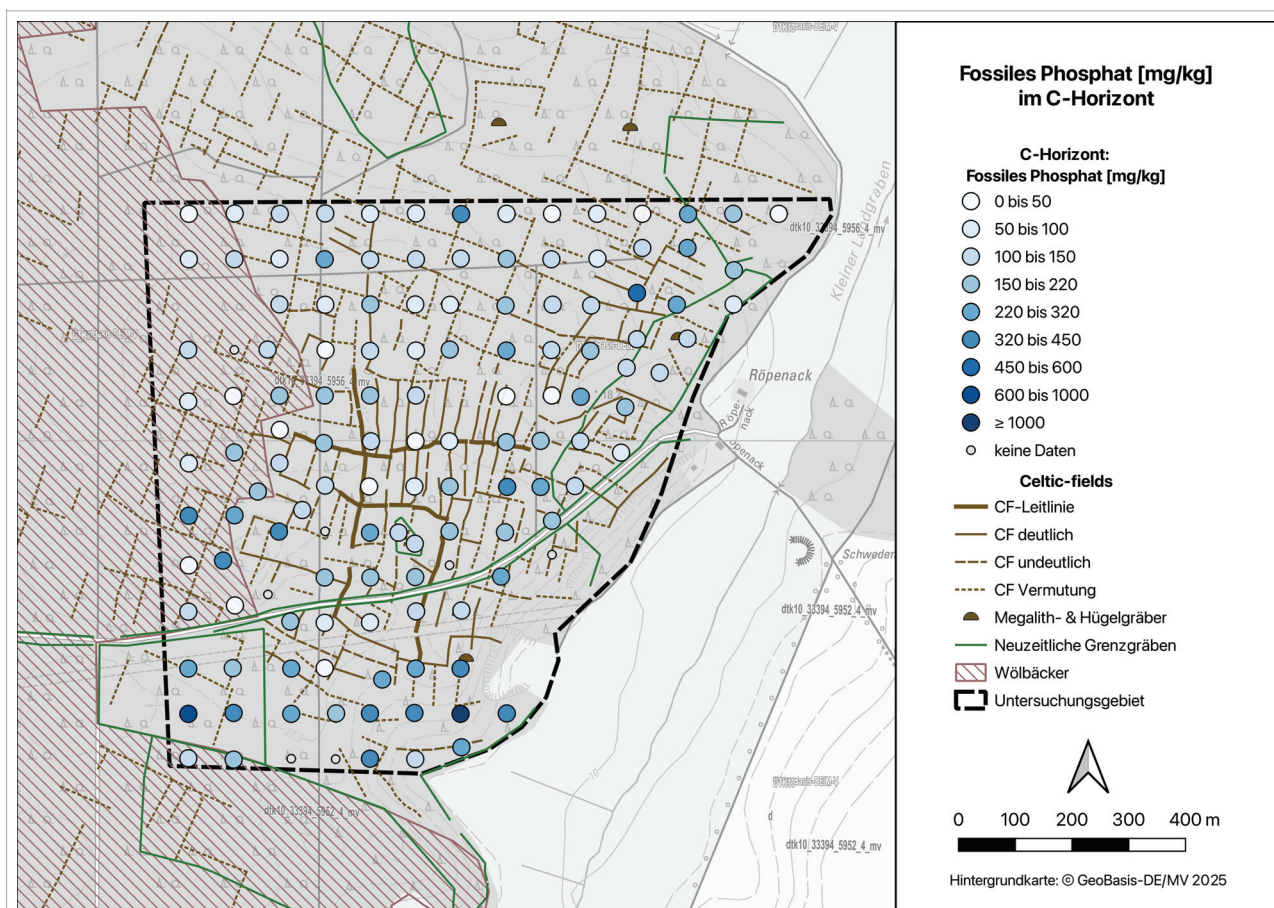
A10: Rezent-Phosphat [mg/kg] im B-Horizont



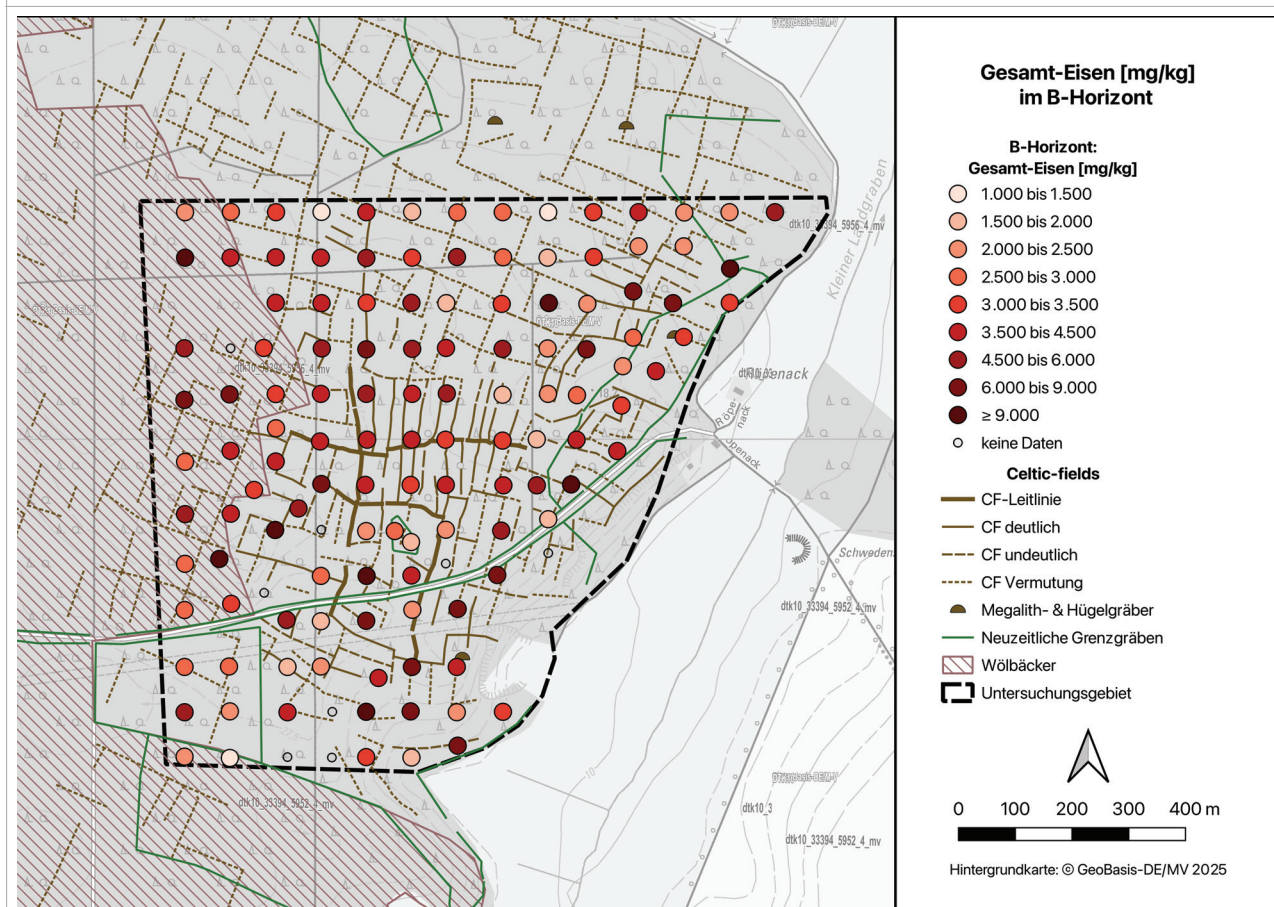
A11: Total-Phosphat [mg/kg] im B-Horizont



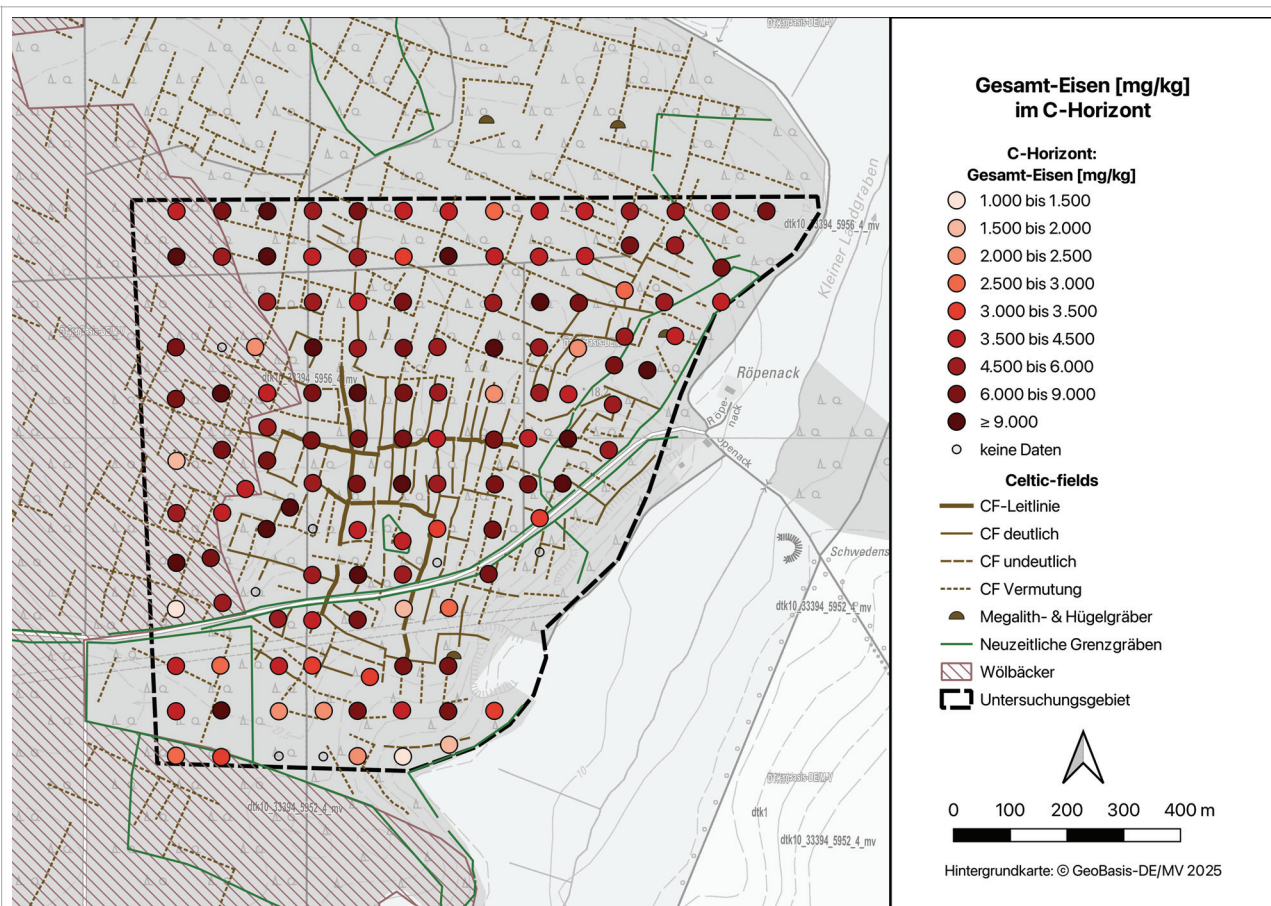
A12: Fossil-Phosphat [mg/kg] im B-Horizont



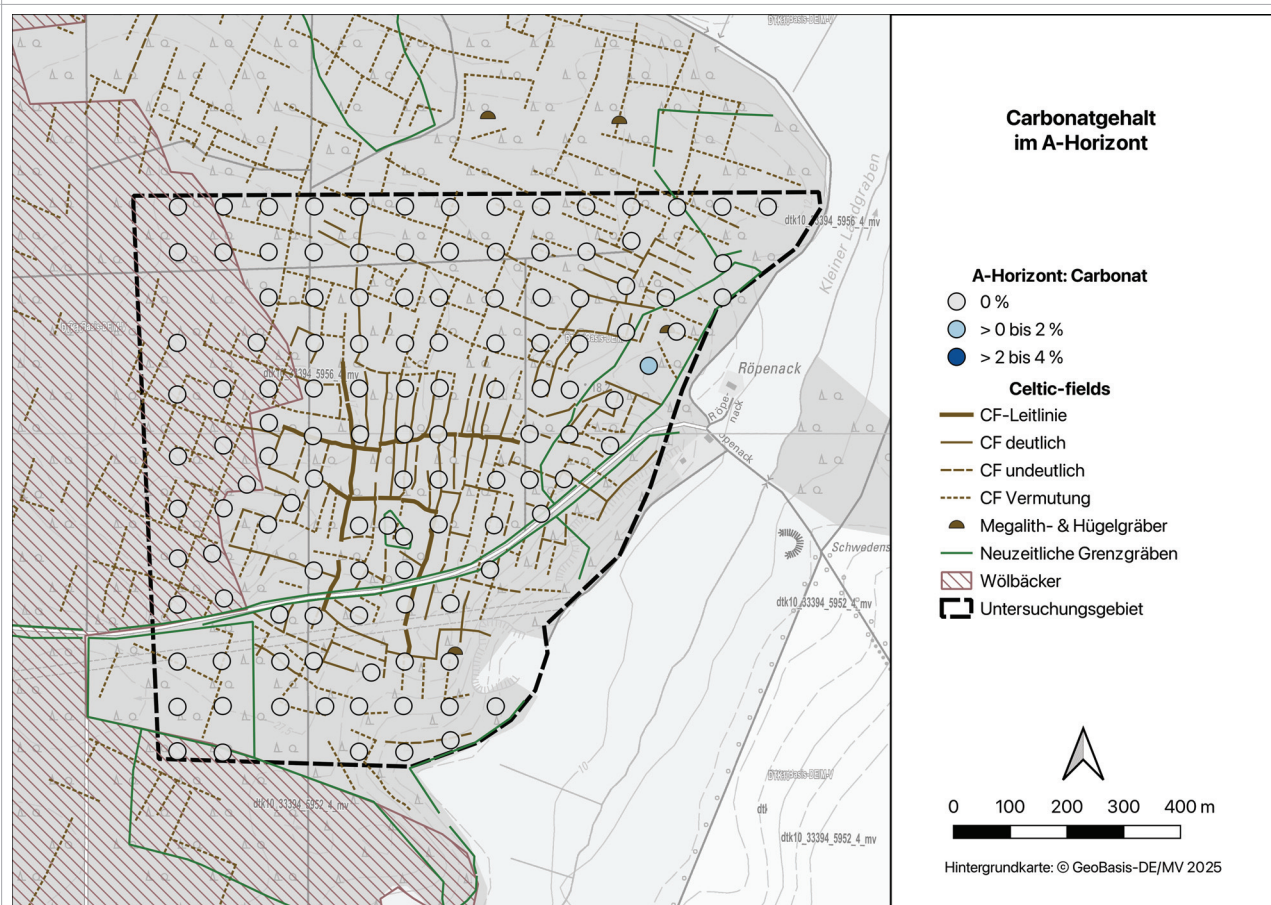
A13: Fossil-Phosphat [mg/kg] im C-Horizont



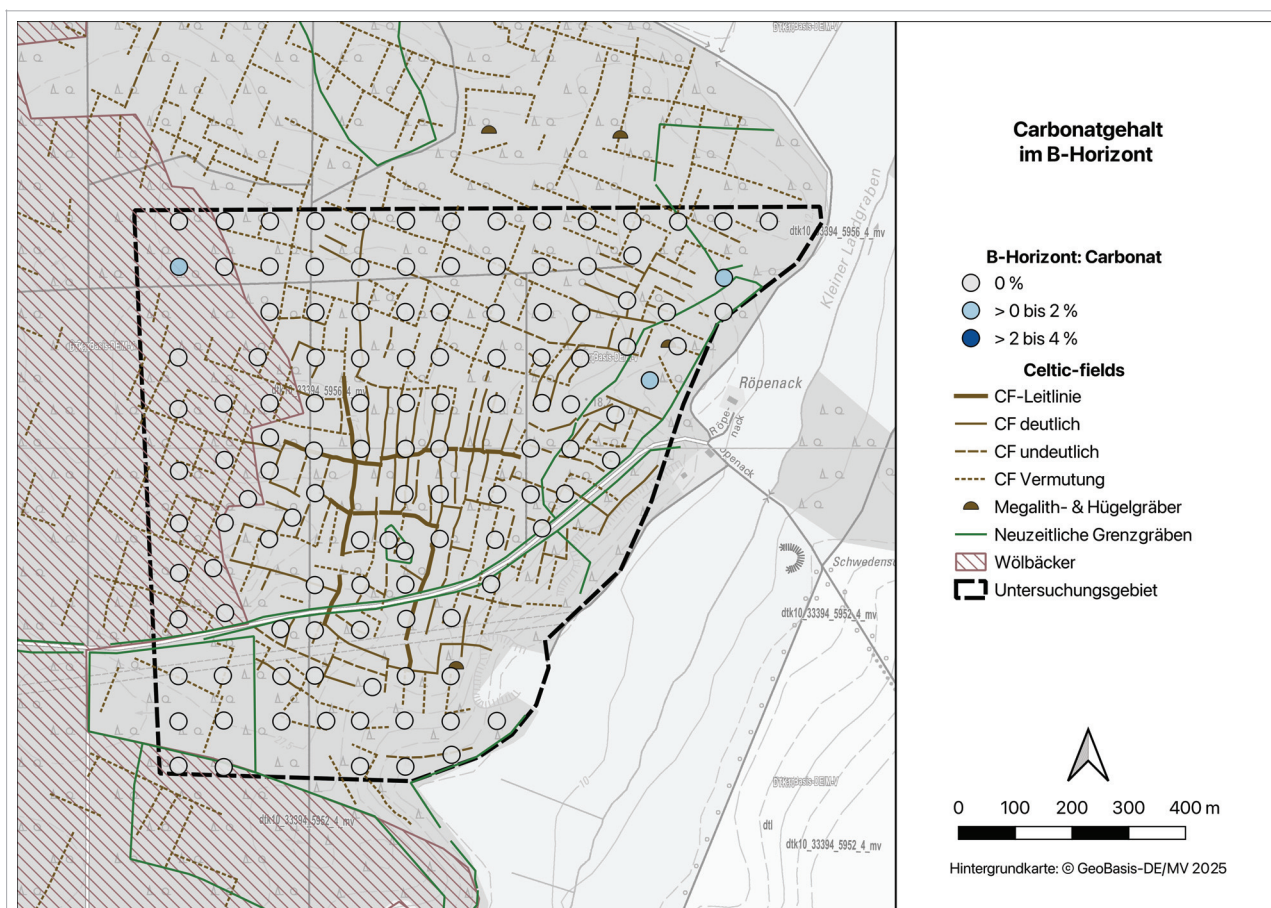
A14: Gesamt-Eisen [mg/kg] im B-Horizont



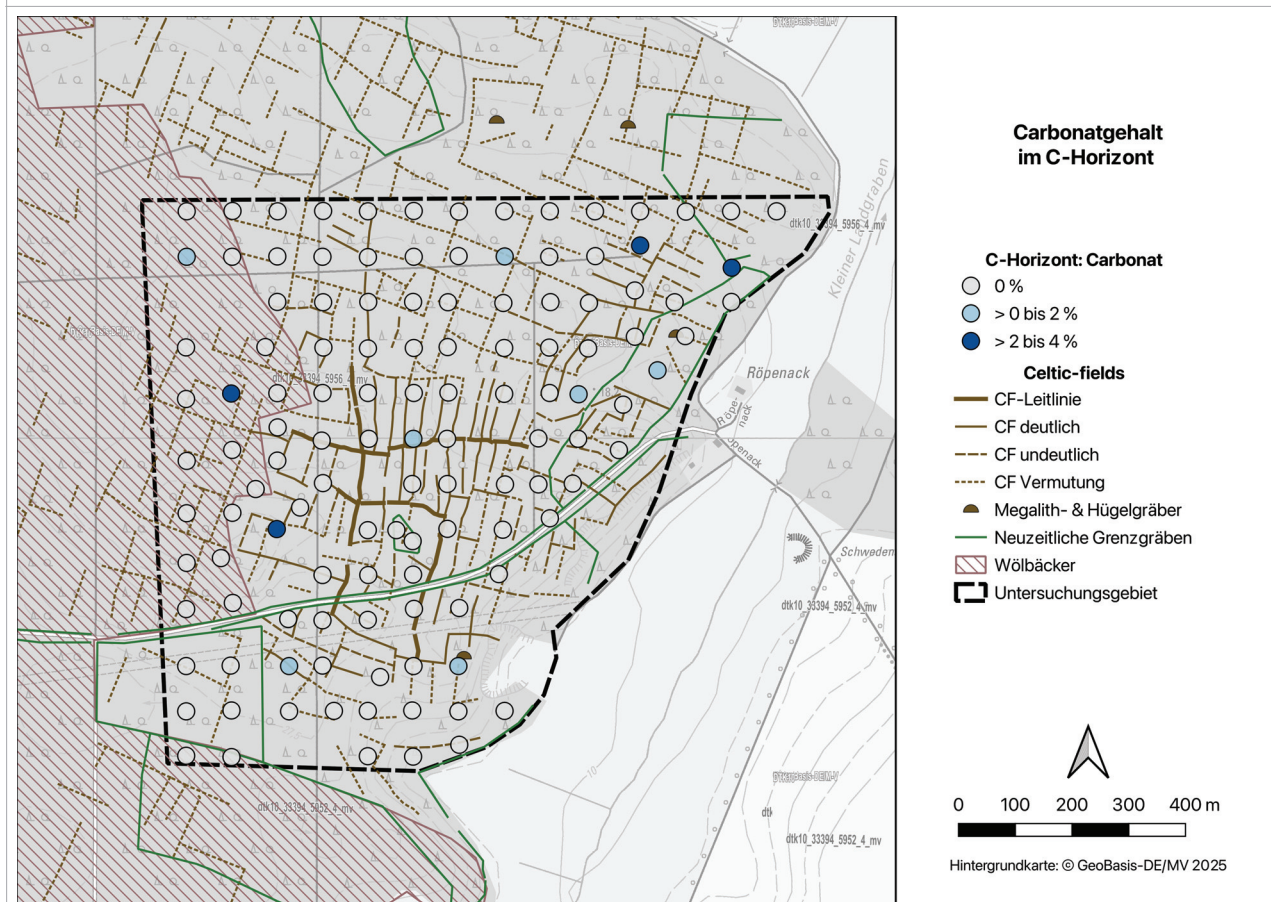
A15: Gesamt-Eisen [mg/kg] im C-Horizont



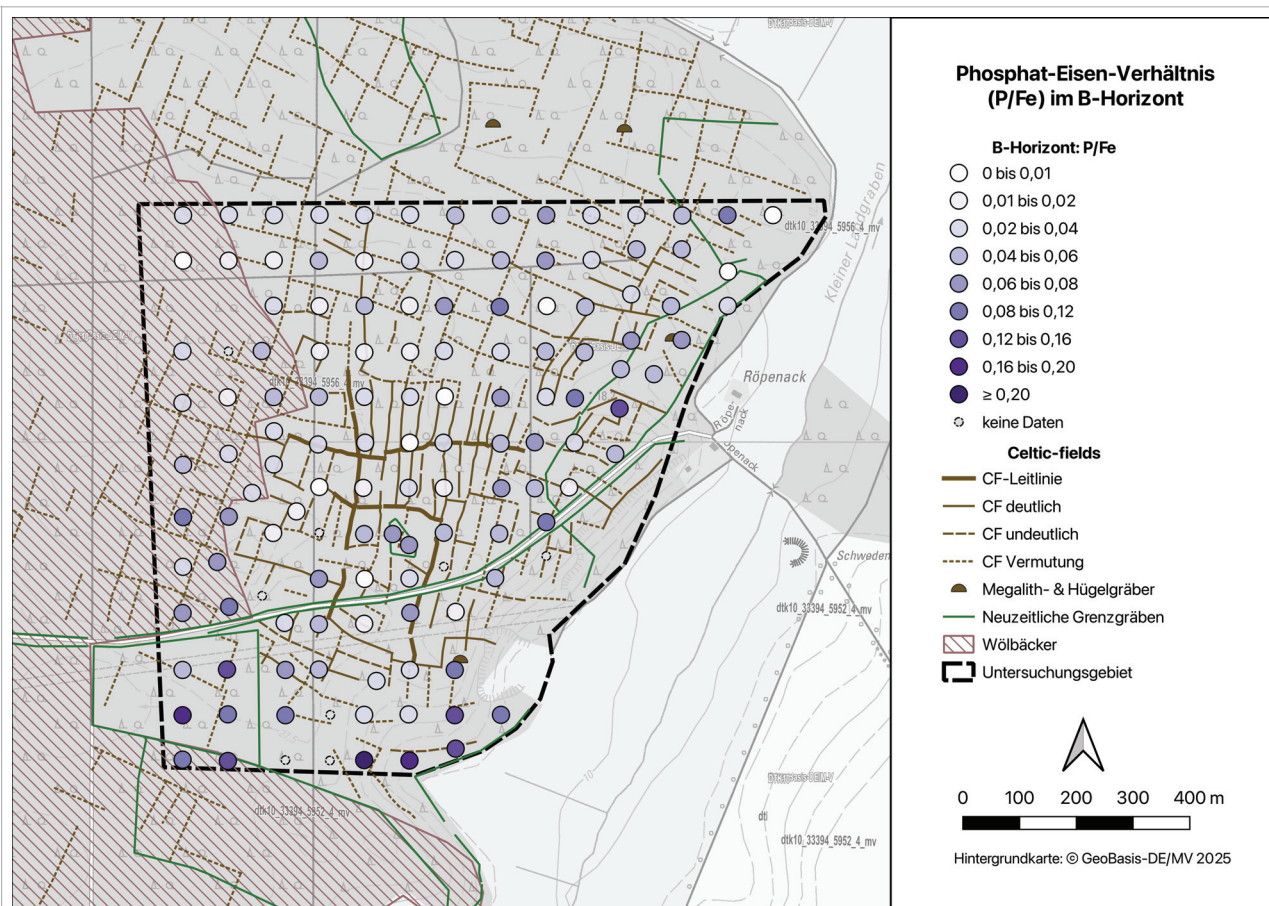
A16: Carbonat [%] im A-Horizont



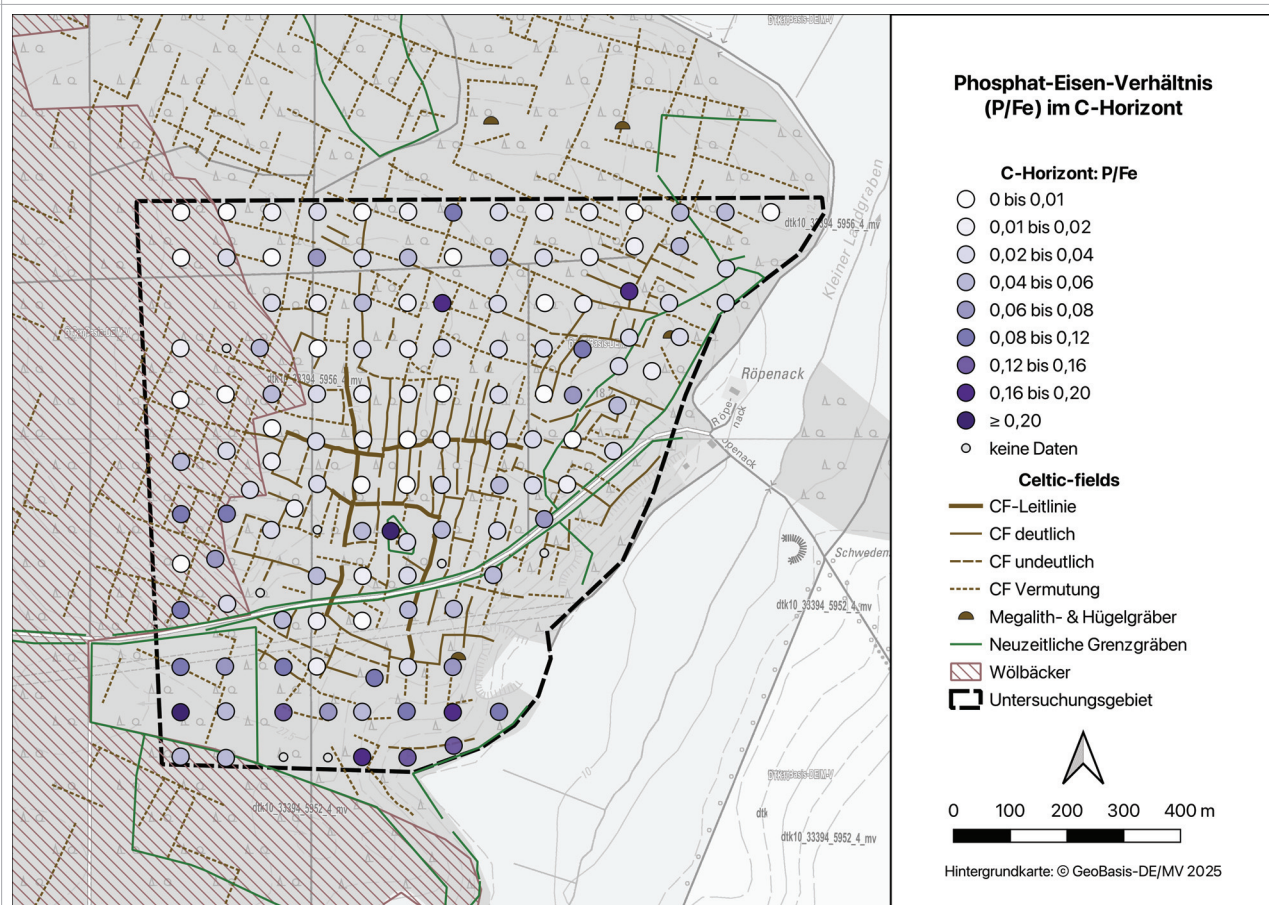
A17: Carbonat [%] im B-Horizont



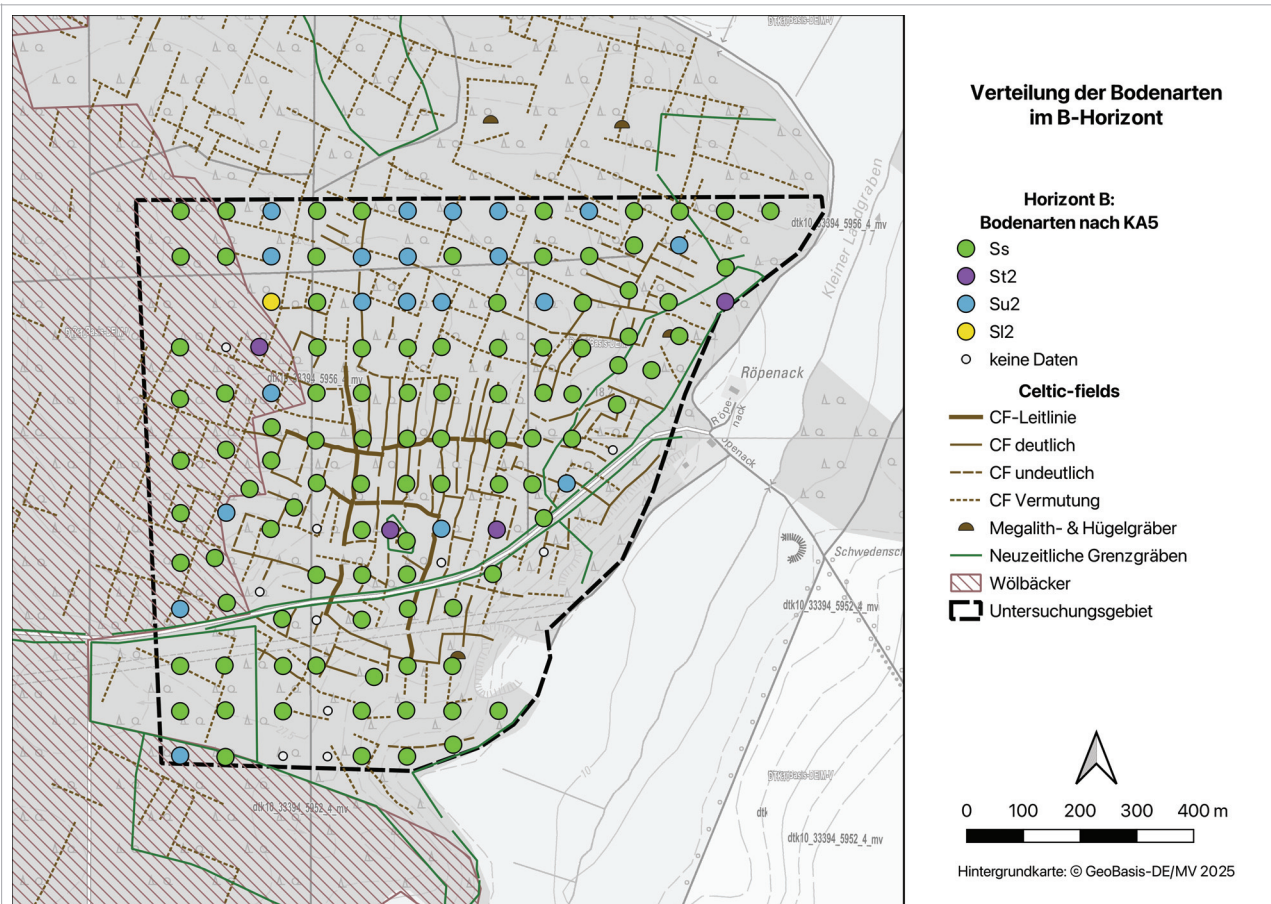
A18: Carbonat [%] im C-Horizont



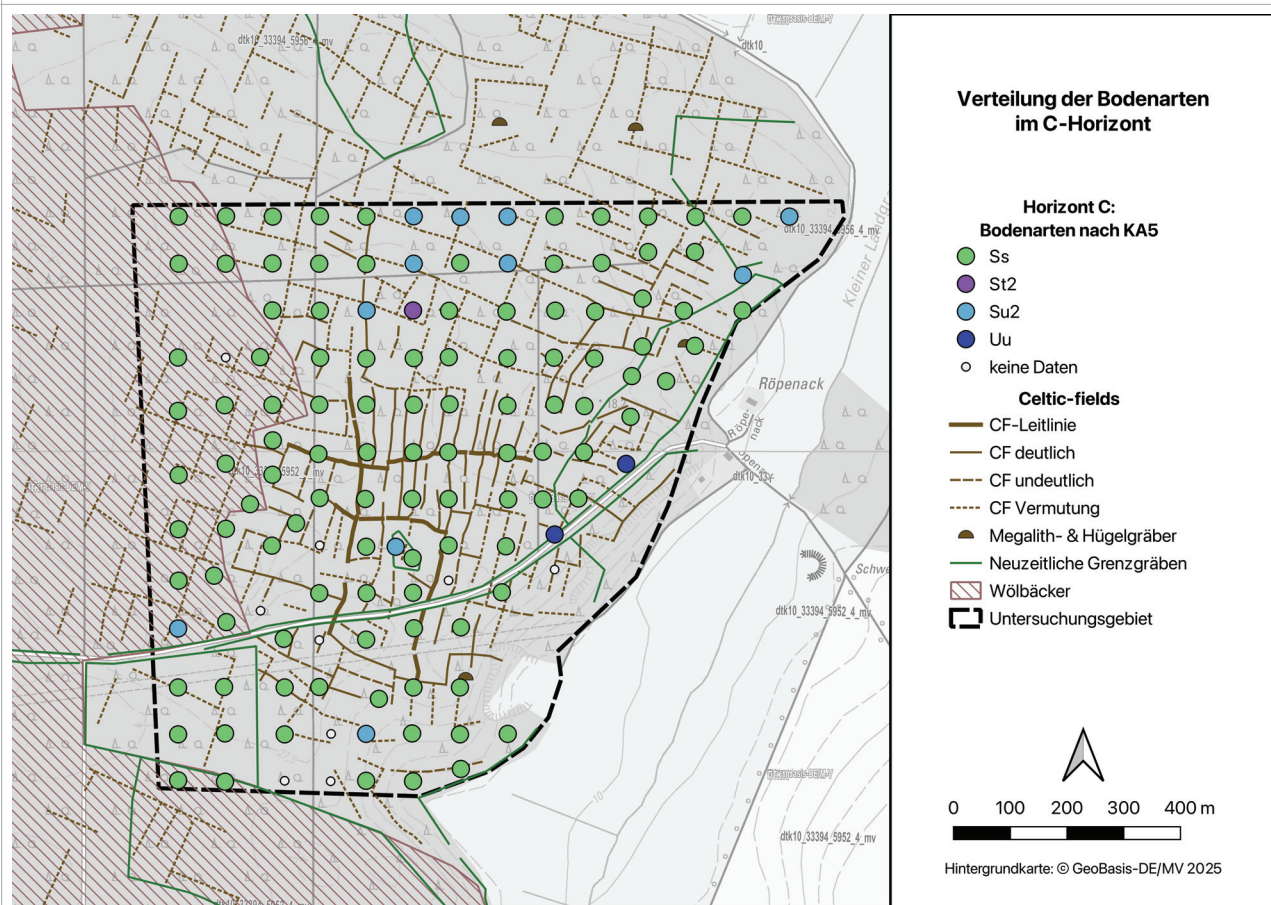
A19: P/Fe-Verhältnis im B-Horizont



A20: P/Fe-Verhältnis im C-Horizont



A21: Verteilung der Bodenarten im B-Horizont



A22: Verteilung der Bodenarten im C-Horizont

