



Lithologie der mittelsächsischen Lössbodenkomplexe

Schriftenreihe, Heft 21/2025



Lithologische Untersuchung der mittelsächsischen Lössbodenkomplexe am Beispiel der Boden-Dauerbeobachtungsflächen 25, 29 und 59

Dipl.-Geol. (FH) Ralf Sinapius, Büro für Bodenkunde Voigtsdorf;

Dr. Dorit Julich

im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	8
1 Veranlassung	10
2 Aufgabenstellung und Wissensstand	11
3 Lage der BDF-Profile	13
3.1 BDF Schmorren.....	13
3.2 BDF Krögis.....	14
3.3 BDF Naundorf	15
4 Daten und Methoden.....	17
4.1 Feldarbeiten und Analysen	17
4.2 Methodik der lithologischen Gliederung	18
4.3 Minerale und Elemente im mittelsächsischen Löss	20
5 Geologie der mittelsächsischen Lössle am Beispiel-Gebiet Schmorren	24
6 Darstellung und Interpretation der Profile.....	26
6.1 Profil Schmorren.....	26
6.1.1 Bodengeologische Gliederung Profil Schmorren.....	26
6.1.2 Detailbeschreibung der Horizonte Profil Schmorren	27
6.1.3 Lithogenetische Interpretation Profil Schmorren.....	30
6.2 Profil Krögis.....	33
6.2.1 Bodengeologische Gliederung Profil Krögis.....	34
6.2.2 Detailbeschreibung der Horizonte Profil Krögis	35
6.2.3 Lithogenetische Interpretation Profil Krögis.....	39
6.3 Profil Naundorf	42
6.3.1 Bodengeologische Gliederung Profil Naundorf	42
6.3.2 Detailbeschreibung der Horizonte Profil Naundorf	43
6.3.3 Lithogenetische Interpretation Profil Naundorf	47
7 Synopsis der Profile	49
Literaturverzeichnis.....	52
Anhang.....	55
A 1 Ergebnisse der OSL-Datierung von neun Lössproben	55
A 1.1 Probenaufbereitung und Messung	55
A 1.2 Technische Daten zur Messung (Lumineszenz-Methoden)	56
A 1.3 Ergebnisse.....	56
A 1.4 Diskussion und Ergebnisse.....	59
A 1.5 Literatur	60

A 2	Analyse und Interpretation von Dünnschliffen der BDF 25 Krögis	61
A 2.1	Fragestellung	61
A 2.2	Probenahme und Methoden	61
A 2.3	Beschreibung der Dünnschliffe	62
A 2.4	Interpretation der Ergebnisse – Schliffe 1 bis 4	83
A 2.5	Literatur	87
A 3	Auszug aus dem Endbericht zur Wiederholten Beprobung der Boden-Dauerbeobachtungsflächen des LfULG	89
A 3.1	BDF Schmorren	89
A 3.2	BDF Krögis	91
A 3.3	BDF Naundorf	93
A 3.4	Literatur	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage 25 (Krögis), 29 (Naundorf) und BDF 59 (Schmorren) in Mittelsachsen	13
Abbildung 2: Lage von Profil Schmorren in DGM1 (GeoSN, 2023) (graues Quadrat).....	14
Abbildung 3: Lage von Profil Krögis in DGM1 (GeoSN, 2023) (graues Quadrat).....	15
Abbildung 4: Die Lage von Profil Naundorf in DGM1 (GeoSN, 2023) (graues Quadrat).....	16
Abbildung 5: Ideomorpher Zirkon (links oben) in einer Granodiorit-Basislage, Dresdner Heide. Bildbreite 1 mm.....	23
Abbildung 6: Lösslehm der Hauptlage mit sehr hohem Quarzanteil, Region Hainichen, oberes Löss hügelland. Bildbreite 1 mm.....	23
Abbildung 7: Lössmächtigkeiten im Gebiet Schmorren, Bereich der Löss-Randstufe (GEoSN, 1997, 2023).....	24
Abbildung 8: Lössschnecke <i>Succinea oblonga</i> , oberer Teil, Dresden-Nickern.....	25
Abbildung 9: Profil Schmorren	27
Abbildung 10: Horizonte (H.) 5–8 im Profil Schmorren. Rechts Alter und Eisen-Verwitterungsindex (*Fe _{Verw}).....	32
Abbildung 11: Profil Krögis	34
Abbildung 12: LFZ im Profil Krögis in (a) 3 m, (b) 3,3 m und (c) 3,6 m Tiefe. Bildbreite ca. 20 cm	38
Abbildung 13: LFZ-Struktur (Horizont 9) getrennt durch kryogenen Klufttriss.....	40
Abbildung 14: Klüftung mit ausgeprägten Toncutanen und LFZ-Struktur in den Horizonten 6 und 7. .	40
Abbildung 15: Profil Naundorf.....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenparameter und Analyse-Methoden (Labor Umweltanalytik BfUL Nossen)	17
Tabelle 2: Mineralzusammensetzung von Löss laut GK25-Sachsen (GEOSEN, o. J.).	21
Tabelle 3: Elementgehalte (M-%) von Mineralen. Die Feldspäte Kalifeldspat, Albit und Anorthit stellen Endglieder dar; dazwischen befinden sich wichtige Mischformen , (GEOLITHO STIFTUNG GEMEINNÜTZIGE GMBH, 2024).	22
Tabelle 4: Bodenprofilbeschreibung Schmorren.	27
Tabelle 5: Analysenergebnisse Profil Schmorren	28
Tabelle 6: Schichtindikatoren und Element-Relationen nach Kap. 4.2 mit Zuordnung der Lösseinheiten nach MESZNER (2015) und LIEBEROTH (1963) für das Profil Schmorren.	30
Tabelle 7: Bodenprofilbeschreibung Krögis.	34
Tabelle 8: Analysenergebnisse Profil Krögis	36
Tabelle 9: Schichtindikatoren und Element-Relationen nach Kap. 4.2 mit Zuordnung der Lösseinheiten nach MESZNER (2015) und LIEBEROTH (1963) für das Profil Krögis.	37
Tabelle 10: Bodenprofilbeschreibung Naundorf.	43
Tabelle 11: Analysergebnisse Profil Naundorf	44
Tabelle 12: Schichtindikatoren und Element-Relationen nach Kap. 4.2 mit Zuordnung der Lösseinheiten nach MESZNER (2015) und LIEBEROTH (1963) für das Profil Naundorf.	45
Tabelle 13: Zusammenfassung ausgewählter Schichtindizes der Profile Schmorren, Krögis und Naundorf als Mittelwerte der Horizontergebnisse je Schicht.	50

Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
BDF	Boden-Dauerbeobachtungsfläche
BK50	Bodenkarte 1:50.000
DGM	Digitales Geländemodell
DTK	Digitale Topografische Karte 1:10000
FIS	Fachinformationssystem (Sachsen)
GK25	Geologische Karte 1:25000
GPS	Global Positioning System (Globales Positionsbestimmungssystem)
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage 2005
ka	Tausend Jahre
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LFZ	Lamellenfleckenzone
M-%	Masseprozent
OSL	Optisch Stimulierte Lumineszenz
u.a.	und andere
ü. NN	über Normal Null

Zusammenfassung

Lössböden sind in Sachsen weit verbreitet und haben aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften eine hohe Bedeutung sowohl hinsichtlich ihrer Archiv- und Nutzungsfunktion als auch in Bezug auf ihre Stellung im Wasser- und Stoffhaushalt von Landschaften. Trotz einer sehr gleichförmigen Korngrößenzusammensetzung der sächsischen Lössböden, hat sich ein weites Spektrum von Bodentypen (Pedogenesen) ausgebildet. Diese Unterschiedlichkeit wurde bisher prinzipiell klimageografisch erklärt, was jedoch nicht unterschiedliche Bodenentwicklungen innerhalb relativ gleicher Niederschlagsbereiche und Relieflagen erklärt, wie sie beispielsweise im Mittelsächsischen und Mulde-Löss hügelland auftreten. Im Rahmen dieser Studie sollten daher die regionalgeografischen Besonderheiten an drei ausgewählten Standorten untersucht und die bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften in der Lössschichtenabfolge charakterisiert werden. Der Fokus lag dabei auf Standorten im bisher nur unzureichend untersuchten Löss-Basislagenkomplex des oberen Lösshügellands und dessen lössstratigrafische Einordnung. Die ausgewählten BDF-Standorte Schmorren, Krögis und Naundorf besitzen Löss-Typusprofile (Leitböden) mit unterschiedlichen Pedogenesen.

Die Altersdatierungen ergaben für die Lössprofile einen unterschiedlichen chronostratigrafischen Aufbau unterhalb des jüngsten nicht datierten Lesses. Die Ergebnisse der chemischen Analysen zeigen, dass die Lössschichten der Profile Schmorren und Krögis in den geochemischen Indizes hohe Übereinstimmungen besitzen, während am Profil Naundorf einige Abweichungen auftraten. An den drei Standorten traten sehr verschiedene Lössphänomene und Pedogenesen auf: Ein sehr komplexer Löss-lehm-Saprolit-Basislagenkomplex mit fersiallitischer Basis ist in Profil Naundorf entwickelt. Das Profil Krögis besitzt eine sehr mächtige Lamellenfleckenzone mit periglaziär differenzierten Subzonen. Am Standort Schmorren wurde eine ein- bis zweigliedrige Basislage über verwittertem autochthonem Löss festgestellt. An der Basis des Profils war der Übergang zu gering verwittertem diagenetischem Kalk-Löss (Primärlöss) sichtbar. An allen Standorten besaßen die Hauptlage und der mehrgliedrige Basislagenkomplex eine von den Löss-Einheiten geochemisch geprägte Signatur mit löss-spezifischen boden- und geochemische Werte für Grobschluffanteile, Elementgehalte sowie die getesteten Schichtindizes. Die Mittellage zeigte vermittelnde Eigenschaften zwischen den Hauptschichten und war volatil bei der lithologischen Einordnung.

Insgesamt kann auf Grundlage der Lithologie und Chronostratigrafie der Profile für die mittelsächsischen Lesse ein konsistentes Modell der Bodengeografie abgeleitet werden. Dieses umfasst in den Leseinheiten I und IIa einen mehrgliedrigen Basislagen-Komplex und die zum Teil stratigrafisch indifferente Mittellage. Die Leseinheiten I und IIa unterlagen einer intensiven polygenetischen Kryo-Pedoge-

nese, Perstruktion und Deckschichtengenese. Der Löss IIb erfuhr demgegenüber nur eine geringe Überprägung. Die periglaziären Transformationen des Lösses hatten eine prägende genetische Bedeutung für die rezenten natürlichen bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften.

1 Veranlassung

Im Rahmen der wiederholten Beprobung auf den Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) 2022–23 wurden drei ausgewählte Lössstandorte (25, 29 und 59) zur Charakterisierung der mittelsächsischen Lössschichten bis zu einer Bodentiefe von ca. 4 m beschrieben und beprobt. Zur Altersdatierung der Lössschichten wurden Sonderproben (sogenannte OSL- und Gamma-Proben) in einem spezialisierten Labor untersucht. Des Weiteren wurden Dünnschliffproben der BDF 25 zur Bestimmung der mikromorphologischen Eigenschaften analysiert und zum Verständnis der Entstehungsprozesse der einzelnen Lössschichten herangezogen.

Die Probenahmen und fachlichen Arbeiten wurden durch Ralf Sinapius/Büro für Bodenkunde im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG, Referat 42) durchgeführt. Im Rahmen der BDF-Kampagne 2022-23 des LfULG wurden die ausgewählten Bodenprofile bereits feldbodenkundlich dokumentiert (siehe Anhang A 3 und SINAPIUS et al., 2023). Die hier vorgestellten weitergehenden Auswertungen verbinden die feldbodenkundlichen Beobachtungen mit den Ergebnissen der spezialisierten Laboranalysen.

Ziel der Auswertungen war eine allgemeine Charakterisierung der regionalgeografischen Besonderheiten der in Sachsen weit verbreiteten Lössböden am Beispiel der beprobten BDFs. Weiterhin sollten wesentliche bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften in der Lössschichtenabfolge betrachtet werden.

2 Aufgabenstellung und Wissensstand

Erste Analysen der umfangreichen Bodenprobendatenbank des LfULG zeigen, dass die Lössböden Sachsens außerhalb fazieller Randbereiche eine sehr gleichartige Korngrößenzusammensetzung hinsichtlich der Durchschnittsgehalte von Ton, Schluff und Sand besitzen, wobei die Dominanz von Grobschluff mit steigender Höhenlage abnimmt (LFULG, 2024; SINAPIUS, 2021). Demgegenüber weisen jedoch die Bodenformen ein weites Spektrum von Bodentypen (Pedogenesen) auf. Auf landwirtschaftlichen Nutzflächen existieren gebietsabhängig in großen Verbreitungen Tschernoseme, Braunerden, Parabraunerden, Fahlerden und Pseudogleye. Damit verbunden sind sehr unterschiedliche bodenchemische und -physikalische Eigenschaften. Die pH-Werte (CaCl_2) der Acker-Unterböden bewegen sich zwischen 5 bis größer 7; die effektiven Lagerungsdichten (Feldaufnahmen nach KA5, AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005) schwanken vom gering-mittleren Grenzbereich (1,4–1,6) bis zu starken Verdichtungen (> 1,8) (LFULG, 2024).

In der Literatur wird die Unterschiedlichkeit der sächsischen Lössböden prinzipiell klimageografisch erklärt (MANNSFELD, 2008; PÄLCHEN & WALTER, 2008). Dieser Ansatz erklärt die verschiedenen Pedogenesen überwiegend in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz, d. h. die mit steigender Höhenlage höheren Niederschläge bedingen höhere Verwitterungsintensitäten und damit unterschiedlich schnelle Bodenentwicklungen. Allerdings existieren Fahlerde-, Pseudogley-, Tschernosem- und Parabraunerde-Typen auch innerhalb relativ gleicher Niederschlagsbereiche und Relieflagen, siehe beispielsweise die Bodenvergesellschaftung des Mittelsächsischen und Mulde-Lösshügellandes (LFULG, 2020). Es kann davon ausgegangen werden, dass Löss als oberflächiges bis oberflächennahes Sediment für die zeitlich nachfolgende hangende Lössschicht pedogenetisch wirksam ist (Bodenbildungsfaktor Gestein).

Seit spätestens den 1960er Jahren ist bekannt, dass die sächsischen Lössse lithologisch-stratigrafisch sehr heterogen sind (LIEBEROTH, 1963). Ein modernes Löss-Standardprofil für Sachsen stellte MESZNER (2015) auf. Es ist durch Altersdatierungen verifiziert. Dieses Standardprofil basiert auf acht Standorten im Raum Ostrau-Meissen während die ältere Löss-Stratigrafie von LIEBEROTH (1963) auf mindestens 40 Standorten beruht. Die sächsischen Löss-(paläo-)böden insgesamt setzen sich aus der fast kompletten Löss-Stratigrafie ab Spät-Saale zusammen (LIEBEROTH, 1963; MESZNER, 2015). Darauf weisen ebenfalls die Ergebnisse der Bodenkundlichen Landesaufnahme, Boden-Dauerbeobachtungsflächen sowie anderer Projekte hin. Bisher wurden jedoch die lössstratigrafischen Einordnungen für den Löss-Basislagenkomplex des oberen Lösshügellands nur unzureichend untersucht. Daher sind die Löss-Unterböden (Basislagenkomplex der vorwiegend allochthonen Lössse, transformierte Paläosole) für das Hügelland lithostratigrafisch bisher nur bedingt oder nicht interpretierbar. Diese Kenntnislücke soll durch die vorliegenden Untersuchungen geschlossen werden.

Für die sprachliche Vereinfachung wurde in vorliegender Studie der Begriff „Löss“ allgemein generalisierend angewendet. Hiermit werden der gering verwitterte CaCO₃-haltige autochthone Löss, die parautochthonen bis allochthonen Lösslehme und Lössderivate ohne relevanten Fremdgesteinsanteil zusammengefasst.

Die ausgewählten BDF-Standorte Schmorren, Krögis und Naundorf besitzen Löss-Typusprofile (Leitböden) mit unterschiedlichen Pedogenesen. Die vertiefte Untersuchung und Analytik einschließlich von absoluten Altersdatierungen (OSL-Methodik) der Unterböden (Basislagenkomplex) an diesen Standorten kann erheblich zum Verständnis des Wasser- und Stoffhaushalt dieser Standorte beitragen. Darüber hinaus können im Kontext mit historischen Daten aus FIS Boden (LfULG, 2024) oder der Bodenschätzung (GEOSN, 2024) für die verschiedenen Lössgebiete Sachsens (Faktoren Höhenlage, Exposition, Neigung) spezifische bodengeologische Standardprofile mit ihren bodenchemischen und -physikalischen Eigenschaften abgeleitet werden. Die Objektivierung von *in situ*-Bodendaten der BDF wird weiterentwickelt, zum Beispiel die Einordnungen von hydromorphen Horizonten oder von Lessivierungen.

3 Lage der BDF-Profile

3.1 BDF Schmorren

Die BDF 59 befindet sich im Landkreis Mittelsachsen Abbildung 1 am Nordrand des Mittelsächsischen Lösshügellandes in der Kernverbreitung des Unit II-Löss nach MESZNER (2015) (bzw. Wy I-III-Löss nach LIEBEROTH, 1963). Der Standort weist eine Jahresmitteltemperatur von 9,8 °C und einen mittleren Jahrsniederschlag von 579 mm auf (Referenzzeitraum 1991–2020, DWD Station Oschatz).



Abbildung 1: Lage 25 (Krögis), 29 (Naundorf) und BDF 59 (Schmoran) in Mittelsachsen (GeoSN, 2025)

Etwa 3–4 km nördlich von BDF 59 befindet sich die Lössrandstufe und die mächtige Lössdecke mit > 2 m Mächtigkeit endet bei Höhenlagen um 150 m ü. NN. Der Standort BDF 59 liegt auf einem Riedel. Dieser stellt einen südlichen Plateauausläufer des Lössplateaus von Hohenwussen dar. Das Plateau ist stark durch Mulden, Rinnen und Täler gegliedert (Abbildung 2). Ebene Bereiche mit geringer Reliefdynamik, respektive Erosion, existieren nur kleinflächig. Die BDF-Fläche befindet sich auf einem relativ ebenen sehr gering geneigten Areal. Die kleinräumige Höhenlage nimmt hier von Süd nach Nord und Nordost gerichtet, von 161,3 m ü. NN auf 160,9 m ü. NN ab. Dieses Gefälle ist im DGM (Abbildung 2) ebenfalls angedeutet. Dementsprechend sind nur im nordöstlichen Bereich der BDF auch kolluviale Aufträge kartiert (SINAPIUS et al., 2017, 2023).

Während das Leitprofil aus dem Einrichtungsjahr 2000 einen Parabraunerde-Tschernosem aus Lösslehm charakterisierte, wurde 2023 der Bodentyp einer erodierten Humusbraunerde bestimmt und ein gegenüber dem Leitprofil verkürzter Schicht- und Horizontaufbau festgestellt (BARTH et al., 2020;

SINAPIUS et al., 2023). Die Profilbeschreibung der feldbodenkundlichen Aufnahme ist in A 3.1 zusammengefasst, die Einordnung hinsichtlich periglazialer Lagen und Lössschichten erfolgt in Kap. 6.1.1.



Abbildung 2: Lage von Profil Schmorren in DGM1 (GeoSN, 2023) (graues Quadrat)

3.2 BDF Krögis

Die BDF 25 befindet sich zentral in der Bodenlandschaft des mittelsächsischen Löss hügellandes im Landkreis Meißen (Abbildung 1) und ist seit 1995 Bestandteil der Boden-Dauerbeobachtung des LfULG. Die Lössplateaus erreichen im Gebiet 200–250 m Höhe ü. NN. Der Profil-Standort liegt auf einer schwach geneigten Flanke in einer Höhenlage von 215 m ü. NN. Die Exposition ist nach Nordost ausgerichtet (Abbildung 3). Die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme beträgt 613 mm und die mittlere Jahrestemperatur 9,8 °C (Referenzzeitraum 1991–2020, DWD Station Klipphausen-Garsebach).

Laut Standortcharakterisierung wurde am Standort eine Pseudogley-Parabraunerde diagnostiziert (BARTH et al., 2020). Die letzte Profilaufnahme in 2023 zeigte einen verkürzten Al-Horizont in der Hauptlage des Profils im Vergleich zum Leitbodenprofil von 1995 (SINAPIUS et al., 2023). Die detaillierte Beschreibung erfolgt A 3.2 und die stratigrafische Einordnung in Kap. 6.2.1.

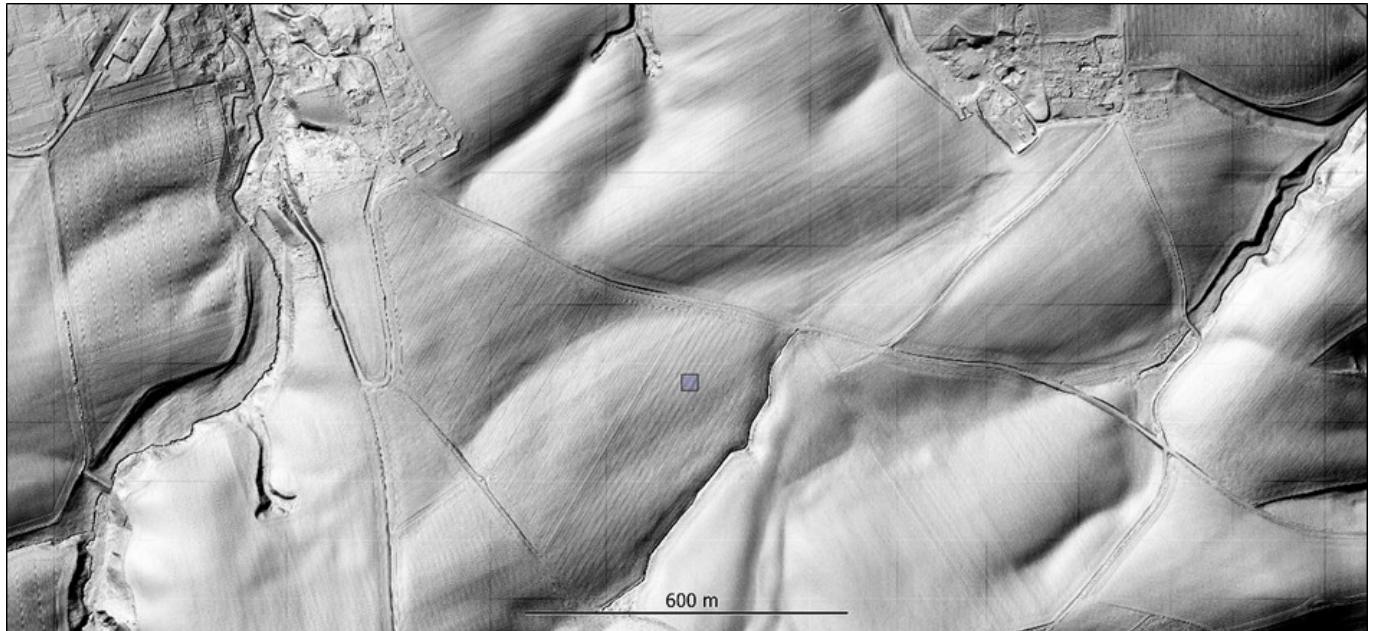


Abbildung 3: Lage von Profil Krögis in DGM1 (GeoSN, 2023) (graues Quadrat)

3.3 BDF Naundorf

Die Boden-Dauerbeobachtungsfläche BDF 29 Naundorf liegt im Landkreis Mittelsachsen (Abbildung 1). Die Fläche wurde 1998 eingerichtet und durchgängig ackerbaulich genutzt. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 678 mm, die mittlere Jahrestemperatur 9,3 °C (Referenzzeitraum 1991–2020, DWD Station Nossen). Das Profil Naundorf befindet sich in der Bodenlandschaft des Mulde-Lösshügellandes. Die Plateaus im Gebiet erreichen > 300 m ü. NN. Der Standort in 289 m ü. NN ist in der Randlage eines Plateaus nach Norden bis Nordosten exponiert. Unterhalb des schwach geneigten Standortes beginnt in ca. 70 m Entfernung eine Hangmulde (Abbildung 4).

Der am Standort ausgeprägte Bodentyp ist ein Parabraunerde-Pseudogley aus Lösslehm (BARTH et al., 2020). Kleinräumig traten bei den verschiedenen Probenahmekampagnen geringe Abweichungen in der Merkmalsausprägung der Lessivierung und Hydromorphie auf (SINAPIUS et al., 2017, 2023). Die aktuelle feldbodenkundlichen Aufnahme ist in A 3.3 zusammengefasst, die Einordnung hinsichtlich periglazialärer Lagen und Lössschichten erfolgt in Kap. 6.3.1.



Abbildung 4: Die Lage von Profil Naundorf in DGM1 (GeoSN, 2023) (graues Quadrat)

4 Daten und Methoden

4.1 Feldarbeiten und Analysen

Der Aufschluss, die bodengeologische Felduntersuchung, eine gemeinsame Befahrung mit dem Auftraggeber sowie die Schließung der Gruben erfolgten im Zeitraum 20.–24. Februar 2023. Die Baggerarbeiten wurden von der Firma PTB – Ingenieurbüro für Planung, Technologie und Bauüberwachung Magdeburg GmbH, Außenstelle Spechtshausen durchgeführt.

Die Profilaufschlüsse wurden bodenkundlich makromorphologisch nach KA5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005) sowie fotografisch dokumentiert. Die Ergebnisse sind im Abschlussbericht vom 20.12.2023 im Rahmen „Wiederholten Beprobung 2022-23“ enthalten (SINAPIUS et al., 2023). Die Bodenprobenaufbereitung und -analytik (Tabelle 1) erfolgte durch das Labor für Umweltanalytik der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL Nossen). Die Bodendaten einschließlich der Profilinformationen und der Analysenwerte sind im Fachinformationssystem des LfULG (FIS Boden, LfULG, 2024) enthalten.

Tabelle 1: Bodenparameter und Analyse-Methoden (Labor Umweltanalytik BfUL Nossen)

Parameter	Einheit	Methode
Korngrößen	M-%	nach DIN ISO 11277 (2020) mittels UGT Sedimat
Gesamt-Phosphor (P)	M-%	mittels EDRFA aus Presstablette
Eisen (Fe_o), Mangan (Mn_o)	mg/g	oxalatlöslicher Elementgehalt mittels ICP-OES
Eisen (Fe_d), Mangan (Mn_d)	mg/g	dithionitlöslicher Elementgehalt nach MEHRA & JACKSON (1960) mittels ICP-OES
pH-Wert		in 0,01 M CaCl_2 -Lösung
Calciumkarbonat (CaCO_3)	M-%	Karbonatgehalt nach Scheibler
Gesamt-Kohlenstoff (C), Gesamt-Stickstoff (N)	M-%	Elementaranalyse nach trockener Verbrennung
gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (Corg)	M-%	Berechnung als Differenz aus Gesamt-Kohlenstoff und Calciumkarbonat-Kohlenstoff
Aluminium (Al), Calcium (Ca), Eisen (Fe), Kalium (K), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Natrium (Na), Titan (Ti), Zirkonium (Zr)	µg/g	Bestimmung der Elementtotalgehalte in Feststoffen mittels EDRFA aus Presstablette

Die OSL-Spezialuntersuchung (Optisch Stimulierte Lumineszenz) zur Altersdatierung der Lössschichten der BDF 25 (Krögis) und 59 (Schmorren) wurde 2024 unter Leitung von A. Fülling im Labor der Arbeitsgruppe Sedimentary Geology and Quaternary Research der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg durch. Die Analyse der Proben von Naundorf (Beprobung Februar 2024) erfolgte 2025 ebenfalls durch A. Fülling. Der komplette Auswertungsbericht inklusive methodischen Details ist in Anlage A 1 enthalten.

Am Standort Krögis (BDF 25) wurden zur Charakterisierung der dort auftretenden Lamellenfleckenzone zudem vier Proben in verschiedenen Tiefen für weiterführende mikromorphologische Untersuchungen (Dünnschliff-Mikroskopie) entnommen. Der Bericht einschließlich detaillierter Fotodokumentation ist in Anlage A 2 ersichtlich.

4.2 Methodik der lithologischen Gliederung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Boden- und Geochemie zur Verifizierung und Korrelation der makromorphologischen Gliederung der Profile. Es wird geprüft, inwieweit sich die bodenkundlichen Schichten und Horizonte in den Elementgehalten und den bodenkundlichen Standard- und Indexwerten widerspiegeln. Damit verbunden wurden geochemische Schichtindikatoren für die Löss-Einheiten des sächsischen Löss-Standardprofiles nach MESZNER (2015) ermittelt. Die potentiellen, d. h. nicht zwingend auftretenden, Schichtindikatoren können das lokale Einzelprofil individuell spezifisch gliedern, aber auch eine regionale Korrelation der Einzelprofile ermöglichen.

Als mögliche Schichtwechsel-Indikatoren spezifisch für den mittelsächsischen Löss wurden folgende Elementgehalte und Indizes untersucht (Elementabkürzungen siehe Tabelle 1, Kap. 4.1):

- █ die Elementtotalgehalte von Fe, Al, Ca, Mg, Mn, Na, K, Zr, Ti sowie verschiedene Relationen dieser Elemente (Ti/Zr, Al/Fe, Na/Al) und von Fe und Al zum Tongehalt
- █ die pedogenen Eisen-Hydroxide und Eisen-Oxide (im Folgenden nur als Fe-Oxide bezeichnet) und daraus berechnete Index-Werte:
 - █ Fe_d – pedogene Fe-Oxide (ein vernachlässigbarer Anteil von Edukt-Hämatit ist möglich)
 - █ Fe_o – amorphe bis kryptokristalline pedogene Fe-Oxide
 - █ Fe_{d-o} – stabile pedogene Fe-Oxide (Goethit, Lepidokrokit, Hämatit) als Differenz aus Fe_d und Fe_o
 - █ $Fe_{o/d}$ – Aktivitätsgrad der Fe-Oxide als Quotient aus Fe_o und Fe_d (SCHWERTMANN, 1964)
 - █ $Fe_{d/t}$ – Eisenfreisetzunggrad als Quotient aus Fe_d und Fe_t (Gesamt-Eisengehalt) (GÜNSTER et al., 2001; ZECH & WILKE, 1977)
 - █ Fe_{Verw} – Eisen-Verwitterungsindex als Quotient $Fe_{d-o}/(Fe_t/\text{Ton-Gehalt})$ (ZÖLLER & NEHRING, 2002)
- █ gU_q – Verhältnis von Grobschluff zur Summe aus Mittel- und Feinschluff [$gU/(mU+fU)$]
- █ WI – Verwitterungsindex als molarer Quotient aus summierten Kationen und Aluminium-Gesamtgehalt: $(Ca+Mg+Na+K)/Al$ mit Ca als Ca-Gehalt in Alumosilikaten (= Gesamt-Ca minus Ca in $CaCO_3$) (SAUER et al., 2016)

Die Elemente Zr, Ti und weitere Elemente sowie pedogene Oxide als Schichtindikatoren wurden in verschiedenen vorangegangenen Arbeiten beschrieben und ihre Eignung zur Charakterisierung der pedogenen Entwicklung von Böden geprüft (BUGGLE et al., 2011; BULLMANN, 2010; OKRUSCH & MATTHES, 2010;

PIRRUNG et al., 2020; RUHLAND, 2019). Das Verhältnis Ti/Zr ist demnach geeignet, um die Trennung unterschiedlicher Schichten sowie Lagen vorzunehmen. Der Aktivitätsgrad $Fe_{o/d}$ legt zugrunde, dass jüngere, instabile amorphe Eisenverbindungen während der Pedogenese in besser kristallisierte, stabile Eisenoxide wie Goethit übergehen und sich spezifische Verteilungsmuster und Tiefengradienten ausbilden (BULLMANN, 2010). Voraussetzung für eine pedogenetische Interpretation des Aktivitätsgrades ist demnach ein vergleichsweise homogenes Ausgangsmaterial wie in den mittelsächsischen Lössschichten gegeben ist. Ein hoher Wert für $Fe_{o/d}$ repräsentiert einen hohen Anteil Fe_o (amorphe Eisenoxide) und zeigt eine rezente, aktive Verwitterung der Primärsilikate bzw. wenig entwickelte Böden. Dagegen ist bei stark verwitterten Böden mit langen Bildungszeiträumen der Anteil von Fe_d (pedogenen Eisenoxiden) erhöht, was in einem geringeren Aktivitätsgrad resultiert (BULLMANN, 2010). Der Eisenfreisetzunggrad $Fe_{d/t}$ als Maß für die Verwitterungsintensität wurde ebenfalls mehrfach zur Abschätzung des pedogenen Entwicklungsgrades von Böden angewandt (BULLMANN, 2010; GÜNSTER et al., 2001; ZECH & WILKE, 1977). Der Quotient $Fe_{d/t}$ quantifiziert den Anteil sekundärer pedogener Eisenoxide am Gesamteisengehalt. Hohe Werte von > 0,8 zeigen demnach eine sehr weit fortgeschrittene Verwitterung (z. B. in tropischen Böden) an. Nach GÜNSTER et al. (2001) und ZÖLLER & NEHRING (2002) ist der Eisen-Verwitterungsindex Fe_{Verw} mit Normierung auf den Tongehalt jedoch besser geeignet, um eine Abgrenzung von Paläoböden vorzunehmen als die Verwendung des Eisenfreisetzunggrads, da die positive Korrelation der Eisenoxide mit Ton bei hohen Tongehalten eine hohe pedogene Eisendynamik vortauschen kann.

Der Verwitterungsindex WI nach SAUER et al. (2016) soll die sekundäre Freisetzung und Verlagerung der Kationen Ca, Mg, Na und K aus der Verwitterung von Alumosilikaten reflektieren und berücksichtigt die relative Anreicherung von Al, welches unter den vorliegenden Bedingungen als immobil einzuschätzen ist. Auch BUGGLE et al. (2011) betonen die Eignung von Aluminium als immobilen Gegenspieler von Erdalkali-/Alkalielementen und empfehlen die Verwendung des Quotienten CPA (Chemical Proxy of Alteration), in den die Oxidgehalte von Al und Na eingehen. In dieser Studie wird vereinfacht das Verhältnis Na/Al genutzt, welches ebenfalls geeignet ist, die Plagioklas-Verwitterung in Lössschichten abzubilden und dabei den Bias durch variierende Mineralzusammensetzung des Lössmaterials zu minimieren (BUGGLE et al., 2011; PIRRUNG et al., 2020). Für beide Indizes, WI und Na/Al, bedeuten geringe Werte eine relative Anreicherung von Al durch Abreicherung/Abtransport der Erdalkali-/Alkalielementen und damit einen hohen Verwitterungsgrad der Feldspäte.

Die ausschließliche Verwendung der Korngrößenfraktionen Ton, Schluff und Sand zur lithologischen Gliederung ist nicht zielführend aufgrund der prinzipiell hohen texturellen Übereinstimmung der unterschiedlichen Lösse. Dies verdeutlichen auch die KA5-Korngrößenklassen der sächsischen Lösse bei denen fast ausschließlich schwach bis stark tonige Schluffe (Ut2, Ut3, Ut4) auftreten (LfULG, 2024). Zur

Trennung äolischer Substrate von nichtäolischen Substraten haben sich Korngrößenquotienten unterschiedlicher Kornsubfraktionen als geeignet erwiesen (z.B. BULLMANN, 2010). Vorangegangene Auswertungen des hier vorliegenden Datenbestandes (LfULG, 2024) zeigten, dass die Unterfraktionen von Schluff zumindest regional differenzierte Verhältnisse aufgrund unterschiedlicher Grobschluffanteile besitzen (SINAPIUS, 2021). Das Verhältnis gU_q von Grobschluff zur Summe aus Mittel- und Feinschluff [$gU_q = gU/(fU+mU)$] wird daher in die Untersuchung einbezogen um eine Trennung der verschiedenen Lössschichten vorzunehmen.

Die konzeptionelle Basis für diese Auswertung bildet die Annahme eines primär mineralogisch hinreichend homogenen äolischen Sedimentes. Die eventuell unterschiedlichen Sedimentationsfaktoren der verschiedenen Lössphasen können sedimentpetrografisch-geochemische Spezifikationen in den Elementgehalten und ihren Relationen zur Folge haben. Die relative geochemische Homogenität des jeweiligen Lösses wird zumindest im größeren Skalenbereich einer Probenmenge abgebildet. Es wird angenommen, dass repräsentativ entnommene Mischproben (1–2 kg) aus bodengenetischen Horizonten nach KA5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005) diese Voraussetzung erfüllen. Die Beprobung eines kleinen Skalenbereiches mit der Entnahme einer geringen Menge im vertikalen cm- bis dm-Bereich kann darüber hinaus die Zusammensetzung und Abfolge eines Lössprofils wesentlich genauer abbilden. Die Herausforderung dabei ist die Berücksichtigung und Interpretation von periglazialer Transformation und der damit verbundenen räumlichen sekundären Heterogenität des Lösses.

4.3 Minerale und Elemente im mittelsächsischen Löss

Der Löss Mittelsachsens besteht laut den Erläuterungen der Geologischen Karte GK25 (GeoSN, o. J.) zu 70 bis > 80 M-% aus Quarz-Partikeln. Die CaCO_3 -Gehalte der ± autochthonen Lösse betragen demnach ca. 9–10 M-% (GeoSN, o. J.; LfULG, 2024). Die oberflächigen Lössböden sind weitgehend entkalkt. Für die Elementtotalgehalte (ausgenommen Si) in Löss sind die Tone, Glimmer, Feldspäte und akzessorischen Minerale (< 5 M-%) maßgebend (Tabelle 2, GeoSN, o. J.).

Weitere Minerale in sehr geringer Konzentration sind zu erwarten. Beispielsweise existieren Oxide als Einschlüsse in Silikaten (SPOSITO, 1998). Es wird davon ausgegangen, dass die Angaben zur mineralogischen Zusammensetzung von Löss in den historischen und modernen GK25-Erläuterungen für vorliegende Arbeit hinreichend repräsentativ sind.

Tabelle 2: Mineralzusammensetzung von Löss laut GK25-Sachsen (GeoSN, o. J.)

Minerale	Anteil M-%	Relevante Elemente
Quarz	70 bis > 80	Si
Feldspat	< 10	Si, Al, Na, Ca, K
Glimmer	< 5	Si, Al, K, Mg, Fe, Ti
Ton	10 bis > 20	Si, Al, K, Mg, Fe u.a.
Hornblende	< 1	Si, Al, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Ti, Zr, u.a.
Pyroxen (Augit)	< 1	Si, Al, Ca, Mg, Fe
Epidot	< 1	Si, Al, Ca, Fe
Turmalin	< 1	Si, Al, Fe, Mg, B, Mn, Ti, Zr, u.a.
Zirkon	< 1	Si, Zr
Magnetit	< 1	Fe
Rutil	< 1	Ti
Ca-Karbonat	6 bis > 10	Ca, Mg, Sr

In Tabelle 3 sind beispielhaft die Masseanteile der Haupt- und wichtigsten Nebenelemente (ohne Sauerstoff) von Mineralen als gerundete Durchschnittswerte enthalten (GEOLITHO STIFTUNG GEMEINNÜTZIGE GMBH, 2024). Sie unterliegen geringen Schwankungen durch isomorphen Ersatz im Kristallbau oder Adsorption (Tonminerale). Der reale Elementgehalt der silikatischen Mischreihen ist von den jeweiligen Mischkristallformen oder -varianten bestimmt.

Die Feldspat-Reihe dürfte die Erdalkali-Alkali-Verhältnisse im Löss wesentlich beeinflussen, da die Feldspäte wahrscheinlich die häufigsten akzessorischen Minerale im Löss darstellen.

Die Eisen-Anteile (Fe) im Löss sind durch die mafischen Alumosilikate sowie auch Magnetit geprägt. Die Pyroxene und Amphibole sind hierbei relevant, weiterhin die dunklen Glimmer, Epidot und Turmalin. Tonminerale enthalten adsorptiv geringe Anteile an Fe, einige auch im Kristallbau.

Kalium (K) ist sowohl relevant in Schichtsilikaten als auch in Feldspat vorhanden. Die mafischen Silikate, dazu wird auch Biotit gezählt, sind für Kalium relevant, ebenso für Magnesium (Mg) und Titan (Ti), teilweise auch Kalzium (Ca). Titan ist ebenfalls in dem verwitterungsbeständigen Rutil sowie gering vor allem in Schichtsilikaten und Hornblenden enthalten.

Aluminium (Al), nach Clarke an 3. Stelle mit ca. 7,5 M-% in der Erdkruste (CLARKE & WASHINGTON, 1924), ist relevant sowohl in den verschiedenen mafischen und felsischen Alumosilikaten, insbesondere in den Schichtsilikaten.

Tabelle 3: Elementgehalte (M-%) von Mineralen. Die Feldspäte Kalifeldspat, Albit und Anorthit stellen Endglieder dar; dazwischen befinden sich wichtige Mischformen (GEOLITHO STIFTUNG GE-MEINNÜTZIGE GMBH, 2024)

Minerale	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	Ti	Zr	B
Quarz	47									
Kalifeldspat	30	10				14				
Orthoklas	30	10				14				
Sanidin	31	10			2	11				
Anortkoklas	32	10			6	4				
Albit	32	10				9				
Oligoklas	32	10		4	6					
Andesin	32	10		4	6					
Labradorit	31	10		11	2					
Bytownit	31	10		11	2					
Anorthit	20	19		14						
Muskovit	21	20				10				
Biotit	19	6	9			9	12			
Hornblende	21–24	3–6	10–24	7–10	2	1	0–12	0–1		
Augit	19	7	8	14	3		6	1		
Epidot	17	11	12	17						
Turmalin*	16–18	15–17	16		2		0–8			3
Zirkon	15								50	
Rutil								60		
Kalzit				40						

* Mischkristallreihe Schörl-Dravit

Zirkonium (Zr) dürfte fast ausschließlich dem Zirkon (Abbildung 5) entstammen. Das Element Zr nimmt mit ca. 0,02 M-% in den Clarke-Werten (Massenanteile chemischer Elemente der Lithosphäre, z. B. in CLARKE & WASHINGTON (1924)) die 20. Stelle ein und ist im sächsischen Löss sehr zuverlässig mit ca. 500–600 µg/g enthalten (LfULG, 2024). Aufgrund seiner Verwitterungsbeständigkeit und Dichte erlangt Zirkon eine hohe Bedeutung für lithologische Untersuchungen von Sedimenten.

Quarz (Abbildung 6) besitzt unterschiedliche Gehalte von Spurenelementen aufgrund von isomorphem Ersatz des Siliziums, darunter vor allem Al, Na, K oder Ti. Diese Gehalte sind sehr gering und wirken sich auf die Schichtindikatoren für Lössse sehr wahrscheinlich nicht aus.

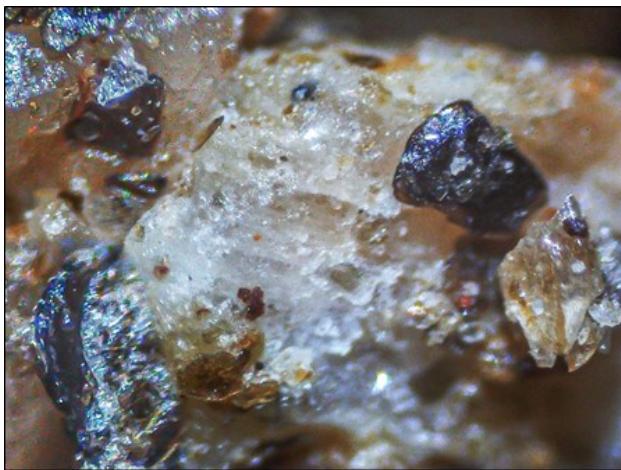


Abbildung 5: Ideomorpher Zirkon (links oben) in einer Granodiorit-Basislage, Dresdner Heide. Bildbreite 1 mm



Abbildung 6: Lösslehm der Hauptlage mit sehr hohem Quarzanteil, Region Hainichen, oberes Lösshügelland. Bildbreite 1 mm

Die mineralogische Zusammensetzung ist zunächst das Ergebnis des komplexen geologischen Liefergebietes, der äolischen Homogenisierung sowie der spezifischen stofflichen Differenzierung während der Sedimentation. Die nachfolgende Verwitterung mit mineralogischer Um- und Neubildung, Elementverlagerung sowie Löss-Umlagerung führen nachfolgend zu geochemischen Veränderungen. Insbesondere die nicht- bis gering verlagerten Elemente (wie Zr und Ti) können dann einen geochemischen Marker darstellen.

5 Geologie der mittelsächsischen Lössse am Beispiel-Gebiet Schmorren

Der Löss bildet im Gebiet um Schmorren in Mittelsachsen überwiegend eine geschlossene Sedimentdecke. Nach GK25 (GEOSN, o. J.) schwanken die Mächtigkeiten des Lösses erheblich. Die überwiegenden Mächtigkeiten bewegen sich zwischen 3–6 m, maximal wurden im Bereich des Lössplateaus Hohenwussen 10–12 m Lössmächtigkeit festgestellt (Abbildung 7). Der Profilstandort Schmorren befindet sich im Bereich der hohen Lössmächtigkeiten von 3 bis > 10 m.

Die Lössrandstufe ist im Reliefbild (Abbildung 7) durch die geringere Zertalung und Zermuldung im Norden des Kartenausschnittes erkennbar. Im Nordwesten streift das Döllnitz-Tal den Kartenausschnitt. Im Südwesten der Karte quert das Jahna-Tal bei Ostrau das Gebiet. Die Höhen fallen an der Lössrandstufe innerhalb 0,6–1 km von 170–200 m auf 150–140 m ab.

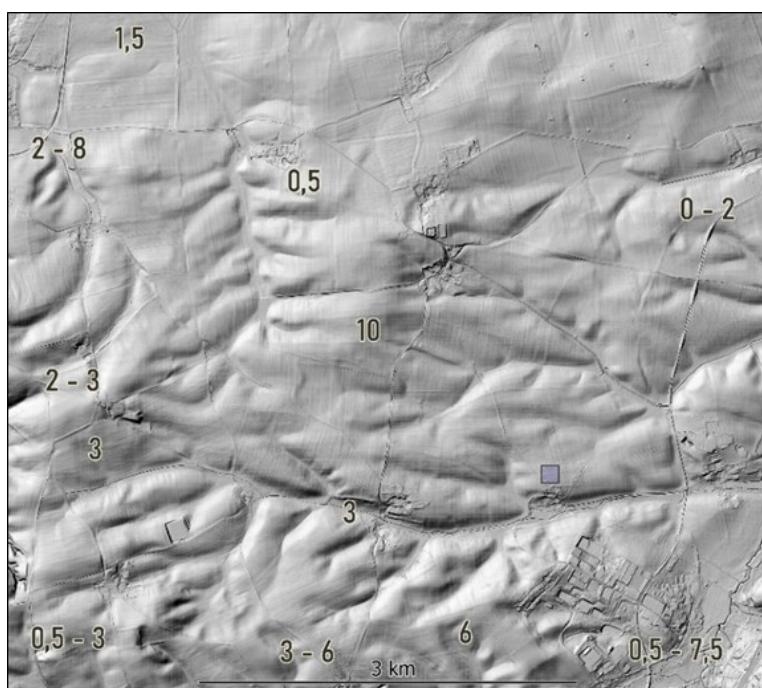


Abbildung 7: Lössmächtigkeiten im Gebiet Schmorren, Bereich der Löss-Randstufe (GEOSN, 1997, 2023)

Die Morphologie der Landschaft ist primär durch den präweichzeitlichen Untergrund vorgegeben. Die geologische Basis des Lösses im Gebiet bilden die Sedimente des Elster-II-Glaziales, fluviatil-marines Tertiär, Buntsandstein, Sedimentite des Zechstein bis Rotliegendes und Rhyolith (GEOSN, o. J.). Das Kleinrelief der Mulden und kleinen Rinnen ist durch die Erosion des Lösses geprägt.

Die nachfolgenden Angaben zur Petrografie des Lösses entstammen überwiegend den Erläuterungen von GK25 Blatt 4744 (GEOSN, o. J.): Der Löss ist vorherrschend ungeschichtet, selten zeigt er eine schwach horizontale Schichtung. An der Basis treten überwiegend unscharfe periglazial-kryoturbat geprägte Übergänge mit dem liegenden Gestein auf. Selten ist der Gesteinsdetritus stratiform als

Schmitze oder Lage eingeregelt. Die Korngrößen bestehen lösstypisch zu > 90 M-% aus > 0,06 mm Partikelgröße (Schluff, Ton), siehe auch Kap. 6.1.2. Die Kornformen der Lösspartikel sind stark überwiegend gerundet, teilweise auch scharfkantig bis splittrig ausgebildet. Nach GK25-Blatt 4846 (GEOSN, o. J.) wurde für Quarz eine gute Rundung für die gesamte Sand-Schluff-Fraktion (hier bis 0,003 mm) festgestellt.

Die Partikel des L össes bestehen stark vorwiegend aus Quarz und geringerem Anteil von Glimmer, vor allem von Muskovitschüppchen, sowie Feldspat (überwiegend von Orthoklas). Weitere häufige akzessorische Minerale des L össes im Gebiet sind Plagioklas, Mikroklin, Magnetit, Hornblende, Zirkon, Rutil, Epidot und Turmalin. Als Gesteinsfragmente wurden akzessorisch in der Sandfraktion Rhyolith, Grauwacke, Grauwackenschiefer und Tertiärquarzit festgestellt.

Der Kalkgehalt des nur gering verwitterten Primär-L össes (Einheit II nach MESZNER, 2015) ist mit durchschnittlich 10 M-% angegeben (GEOSN, o. J.). Die Maxima sind 12–14 M-% Kalkgehalt. Der unterschiedliche Kalkgehalt (0 bis > 10 M-%) zeigt keine Abhängigkeit zum Basisgestein. Der L öss besitzt unterhalb der kalkfreien oder kalkarmen Schichten eine diagenetische Verkittung durch Sekundärkarbonat. Es existieren CaCO₃-Konkretionen von < 1 mm bis ca. 10 cm Größe. Weiterhin wurde sehr kleiner (um 1 mm) Detritus von organischem Kalk beschrieben, wahrscheinlich aus L össschnecken. Hinweise zu primären Kalkstein- oder Kalzit-Partikeln gibt es nicht.

Fossilien sind im Gebiet vereinzelt bis lokal häufig festgestellt (GEOSN, 1997). Die häufigsten Erwähnungen sind L össschnecken (z. B. *Helix Hispida* Müller, *Succinia oblonga* (Abbildung 8) und andere). Bei Görlitz, ca. 6 km westlich von Profil Schmorren, wurde ein Zahn von *Coelodonta antiquitatis* (Wollnashorn) gefunden. In der Nähe von Ostrau, ca. 4 km südwestlich des Standortes, sind Skelettfunde von *Mammuthus primigenius* (Wollhaarmammut) erwähnt (GEOSN, 1997).

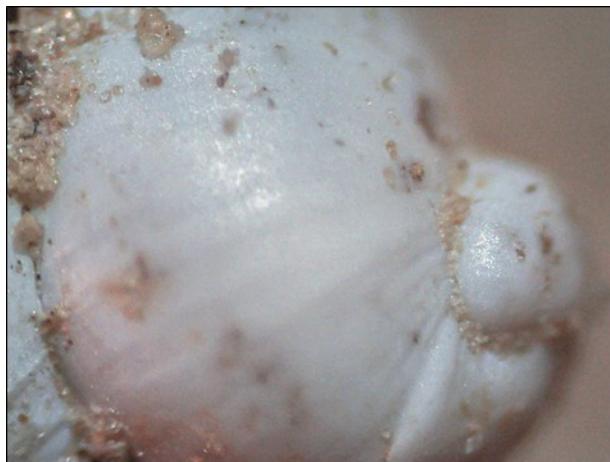


Abbildung 8: L össschnecke *Succinea oblonga*, oberer Teil, Dresden-Nickern

6 Darstellung und Interpretation der Profile

An den Standorte Schmorren (BDF 59), Krögis (BDF 25) und Naundorf (BDF 29) wurden Profilaufschlüsse wurden feldbodenkundlich sowie fotografisch dokumentiert. Ein Auszug der Geländeaufnahmen ist im Anhang A 3 aufgeführt, die detaillierten Ergebnisse in SINAPIUS et al. (2023).

6.1 Profil Schmorren

Das Profil Schmorren aus dem Jahr 2023 befindet sich ca. 7 m entfernt vom Leitprofil aus 2017. Es zeigt bei gleicher Reliefposition eine erhebliche Profilverkürzung gegenüber dem Leitprofil 2017 (SINAPIUS et al., 2017). Diese Profilkappung ist vermutlich eher auf die rezente landwirtschaftliche Bearbeitung (Spargelanbau) und nur zu einem geringeren Anteil auf die historische Bodenerosion zurückzuführen. Der Spargelanbau wurde 2017–2018 begonnen und kulturtechnisch ab 2016–2017 vorbereitet. Diese Bewirtschaftungsform geht mit der Anlage bis 60 cm hoher Erddämme einher (vgl. Abbildung A 10, Anhang A 3.1) und bringt damit erhebliche strukturelle Veränderungen des Oberbodens sowie des oberen Bereichs des Unterbodens mit sich.

6.1.1 Bodengeologische Gliederung Profil Schmorren

In Abbildung 9 ist das Profilfoto von Schmorren von der Bodenoberfläche bis in ca. 3,80 m Tiefe mit der Untergliederung in acht Horizonte gezeigt. Eine Detailbeschreibung der Horizonte, der zugeordneten Genese und Lage aus Tabelle 4 folgt in Kap. 6.1.2.



Tabelle 4: Bodenprofilbeschreibung Schmorren

Nr.	untere Horizonttiefe [m]	Horizont	Genese, Lage
1	0,30	Ap	kolluviale Haupt- bis Mittellage
2	0,39	rAp	
3	0,75	Bht	kryoturbate Mittel- bis Basislage
4	0,90	Sw-Bht+Bvt	kryoturbate Basislage
5	1,55	Bht+Bt-Swd	solifluidal- kryoturbate Basislage
6	1,95	fSw-ilCv	parautochthoner verlehmter Löss
7	2,55	fSw-elCcv	verwitterter autochthoner Löss
8	4,80	elCcv	gering verwitterter diagenetischer autochthoner Löss

Abbildung 9: Profil Schmorren

6.1.2 Detailbeschreibung der Horizonte Profil Schmorren

Der Horizont 1 (Ap, Tabelle 4) ist sehr wahrscheinlich vollständig kolluvial umgelagerter Löss, d. h. allochthon im Bodenprofil. Die relativ geringen Ton-Gehalte sind auf lessivierten, an Ton abgereicherten Löss der Hauptlage zurückzuführen (Tabelle 5). Der Horizont 2 (rAp) besteht eventuell nur zum Teil aus

Kolluvium. Der rAp besitzt einen höheren Ton-Gehalt und etwas geringeren Grobsand-Gehalt, was auf einen nichtverlagerten autochthonen Anteil im Substrat hinweist. Die abfallende Tendenz der Corg-Gehalte sowie von Nt und Pt (Ergebnisse hier nicht gezeigt) zeigen den geringeren Bewirtschaftungsgrad des unteren rAp-Horizontes im Vergleich zum Ap an. Der Aktivitätsgrad Fe_{o/d} zeigt mit einem Wert von 0,33 (Tabelle 6) einen typischen mittleren Wert für Oberbodenhorizonte (BLUME & SCHWERTMANN, 1969; BULLMANN, 2010).

Tabelle 5: Analysenergebnisse Profil Schmorren

Horizontnr.	1	2	3	4	5	6	7	8
untere Horizont-tiefe [m]	0,3	0,39	0,75	0,9	1,55	1,95	2,55	4,8
Horizont	Ap	rAp	Bht	Sw-Bht+Bv	Bht+Bt-Swd	fSw-ilCv	fSw-ilCv	elCcv
Korngrößen in [M-%]:								
Sand	4,7	4,2	3,1	2,8	2,6	2,9	3,3	2,4
Schluff	80,6	79,2	74,7	74,6	75,6	79,7	82,5	86,0
Ton	14,7	16,7	22,3	22,6	21,8	17,4	14,2	11,6
Grobsand	0,8	0,5	0	0	0	0	0	0
Mittelsand	1,8	0,8	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Feinsand	2,1	2,8	2,6	2,2	2,1	2,4	2,8	1,9
Grobschluff	54,4	53,3	52,5	54,0	46,8	64,7	64,9	68,6
Mittelschluff	21,7	22,1	18,5	16,9	23,2	11,9	14,1	14,0
Feinschluff	4,5	3,7	3,7	3,6	5,5	3,1	3,5	3,3
chemischen Kennwerte:								
pH [-]	6,6	6,7	6,9	7,1	7,3	7,3	7,8	7,8
Corg [M-%]	1,46	1,13	0,42	0,22	0,19	0,19	0,12	0,12
CaCO ₃ [M-%]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	8,7	10,5
Fe _o [mg/g]	1,6	1,7	1,1	0,8	1,2	0,4	0,4	0,5
Fe _d [mg/g]	4,9	5,0	7,5	7,5	9,4	5,6	5,2	4,9
Fe [µg/g]	17000	17000	25000	29000	26000	21000	19000	19000
Al [µg/g]	48000	49000	64000	65000	65000	57000	50000	47000
Ti [µg/g]	4600	4700	4700	4800	4700	5000	4400	4200
Zr [µg/g]	580	600	560	510	560	640	580	540
Ca [µg/g]	5600	5800	5200	5600	5200	5400	40000	44000
Mg [µg/g]	4500	4600	7100	7900	8100	6600	7700	8600
K [µg/g]	21000	21000	21000	22000	21000	21000	18000	17000
Na [µg/g]	8500	7900	6900	7300	7100	11000	8700	8400

Der pedogene Toneintrag im Bht (Horizont 3) wird durch den Ton-Sprung auf 22,3 M-% gegenüber dem Oberboden angezeigt. Der ursprünglich vorhandene Axh-Al-Horizont als Tonlieferant ist überwiegend oder vollständig erodiert. Der Zr-Gehalt sinkt leicht ab; dadurch steigt das Verhältnis Ti/Zr in dieser

Schicht an. Der Anstieg der Al- und Fe-Gehalte ist vor allem auf den Toneintrag zurückzuführen. Zugeleich erfolgt ein Sprung der kristallinen pedogenen Fe-Oxide (Fe_{d-o}) von 3,3 mg/g auf 6,4 mg/g, bei gleichzeitigem Rückgang der amorphen Oxide Fe_o von 1,7 mg/g auf 1,1 mg/g von Horizont 2 zu 3. Der Aktivitätsgrad $Fe_{o/d}$ geht deutlich zurück (Tabelle 6). Der lithogene Schichtindikator gU_q (Grobschluffrelation) steigt vom Oberboden zu Horizont 3 auf 2,4 an.

In Horizont 4 wird das Tonmaximum des Profils (22,6 M-%) erreicht. Der Zr-Gehalt fällt weiter ab auf 510 µg/g (Tabelle 5). Die deutlich gestiegenen Fe-Gesamtgehalte beruhen auf einem höheren Gehalt an Sesquioxiden (Sw-Merkmale des Horizonts). Eventuell liegt auch ein etwas höherer Gehalt an mafischen Akzessorien vor, worauf der Anstieg an Ca und Mg hindeutet. Der Aktivitätsgrad $Fe_{o/d}$ (Tabelle 6) geht weiter zurück und befindet sich im typischen Bereich von C-Horizonten (BLUME & SCHWERTMANN, 1969; BULLMANN, 2010).

Der stark abfallende gU_q -Wert in Horizont 5 und der gleichzeitige Rückgang von Ti/Zr markieren eine lithogen-sedimentär bedingte Substratänderung (Tabelle 6). Die Tonilluviation ist auch in dieser Schicht zu erkennen. Neben Ton-Humus-Cutanen treten rotbraune Tonbeläge auf. Die Corg-Gehalte gehen weiter zurück, sind für die Tiefenlage jedoch noch relativ hoch (Tabelle 5), was mit dem hohen Anteil an Regenwurmröhren begründet werden kann. Die kristallinen pedogenen Fe-Oxide erreichen im Profil das Maximum mit 8,2 mg/g. Dies koinzidiert mit dem hohen Anteil von Rostflecken und Konkretionen, bestehend aus limonitisch-lepidokrokitischen Sesquioxiden (Brauneisenerz aus hydratisierten Eisenoxiden). Der Eisen-Verwitterungsindex erreicht mit 6,9 ebenfalls sein Maximum. Die Lagerungsdichte im nahe gelegenen Leitprofil der BDF 59 erreicht für diesen Horizont einen Wert von 1,79 (BARTH et al., 2020) und befindet sich damit diagnostisch nahe dem Grenzbereich für Sd-Horizonte (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005).

Der Horizont 6 markiert den sedimentär bedingten Hauptschichtwechsel gegenüber der hangenden Lössschicht. Der Indikator gU_q zeigt hier einen Sprung auf 4,3 bedingt durch eine deutliche Zunahme der Grobschluffgehalte (Tabelle 5). Die Gehalte an Zr und Ti steigen ebenfalls das Maximum im Profil. Der Corg-Gehalt stagniert und ist in Bezug zur Tiefenlage als hoch einzustufen. Der $CaCO_3$ -Gehalt beträgt weiterhin < 0,1 M-%. Der Eisen-Aktivitätsgrad erreicht sein Minimum von 0,08. Der Anteil der oxidativen Hydromorphie geht deutlich zurück. Damit einhergehend sinkt der Gehalt an kristallinem Fe-Oxid sowie der Eisen-Verwitterungsindex (Tabelle 6). Dagegen zeigt der Verwitterungsindex für Alumosilikaten WI in dieser Schicht erhöhte Werte, ebenso das Verhältnis Na/Al als Indikator für die Plagioklas-Verwitterung (BUGGLE et al., 2011).

Die hohen Werte für den Grobschluff-Indikator gU_q des Horizonts 6 sind auch in den darunterliegenden Schichten zu beobachten. Die Anteile von Zr und Ti gehen jedoch deutlich zurück wobei das Verhältnis

Ti/Zr stabil bleibt. Die Horizonte 7 und 8 zeigen gegenüber dem hangenden Horizont 6 einen deutlich geringeren Eisen-Verwitterungsindex und leicht geringere Werte für Fe_{d-o} (abnehmende oxidative Hydromorphie). Demgegenüber setzt CaCO₃ sprunghaft ein und steigt auf Werte > 10 M-%. Die Horizonte 7 und 8 besitzen makromorphologisch die typischen Primärlöss-Merkmale von Farbe, Sekundär-CaCO₃ und Nadelstichporen. Die niedrigen pedogenen Fe-Indizes charakterisieren diese unteren C-Horizonte als geologische Untergrundhorizonte (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005).

Tabelle 6: Schichtindikatoren und Element-Relationen nach Kap. 4.2 mit Zuordnung der Lösseinheiten nach MESZNER (2015) und LIEBEROTH (1963) für das Profil Schmorren

Horizontnr.	1	2	3	4	5	6	7	8
untere Horizont-tiefe [m]	0,3	0,39	0,75	0,9	1,55	1,95	2,55	4,8
Horizont	Ap	rAp	Bht	Sw-Bht+Bv	Bht+Bt-Swd	fSw-ilCv	fSw-ilCv	elCcv
gUq [M-%/M-%]	2,1	2,1	2,4	2,6	1,6	4,3	3,7	4,0
Fe _{d-o} [mg/g]	3,3	3,3	6,4	6,7	8,2	5,1	4,8	4,5
Fe _{o/d} [mg/mg]	0,33	0,33	0,14	0,11	0,12	0,08	0,08	0,09
Fe _{d/t} [mg/mg]	0,29	0,29	0,30	0,26	0,36	0,26	0,27	0,26
Fe _{verw} [M-%/M-%]	2,8	3,3	5,7	5,2	6,9	4,2	3,5	2,7
Ti/Zr [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	7,9	7,8	8,4	9,4	8,4	7,8	7,6	7,8
Al/Ton [mg/g]	327	294	288	288	298	328	323	404
Fe/Ton [mg/g]	116	102	112	128	119	121	134	163
Al/Fe [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	2,8	2,9	2,6	2,2	2,5	2,7	2,6	2,5
Na/Al [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	0,18	0,16	0,11	0,11	0,11	0,19	0,17	0,18
WI [mol/mol]	1,04	1,02	0,79	0,82	0,79	0,94	0,97	0,91
Profilschicht	1			2			3	
OSL-Alter [ka]	-	-	-	-	21,5	25,3	27,0	26,2
Löss-Einheit MESZNER (2015)	I			IIa			IIb	
Löss-Einheit LIEBEROTH (1963)	Wy2''			Wy2'			Wy1	

6.1.3 Lithogenetische Interpretation Profil Schmorren

Die liegenden Horizonte 6–8 (1,55 bis > 4,80 m) bilden als untere und älteste Lössschicht im untersuchten Profil aufgrund der makromorphologischen und analytischen Merkmale eine klar abgrenzbare Sedimenteinheit. Diese Lössschicht wird hier als Profilschicht 3 benannt (Tabelle 6). Das OSL-Alter dieses im Aufschluss basalen Lösses beträgt 26–27 ± 0,9 ka (Detailergebnisse der OSL-Analyse siehe Anhang A 1). Mit diesem Alter kann der Löss der Einheit IIb zugeordnet werden (MESZNER, 2015) bzw. der Einheit

Wy1 nach LIEBEROTH (1963). Der obere Horizont 6 stellt die periglaziär entkalkte Verwitterungszone dieser Lössschicht dar. Das Alter in Horizont 6 von $25,3 \pm 0,8$ ka markiert den Grenz- oder Übergangsbereich von Einheit IIb zur Einheit Ila und stimmt mit den Altern nach MESZNER (2015) sehr gut überein. Der Übergang zwischen dem unteren Kalk-Löss der Horizonte 7 und 8 und dem entkalkten, verlehmmten Horizont 6 verläuft unregelmäßig-diffus übergehend in der Dezimeter-Skala. Der Kalksprung von < 0,1 M-% in Horizont 6 auf 8–10 M-% in den Horizonten 7 und 8 ist signifikant. Die Zr-Gehalte von Horizont 6 sind sowohl absolut als auch relativ sehr hoch und von der Relativanreicherung infolge der Entkalkung geprägt. Die Grenze von Horizont 7 nach 8 verläuft horizontal mit einem Übergang in der Zentimeter-Skala. Gleichzeitig verweisen für die Horizonte 6, 7 und 8 die in Tabelle 6 aufgeführten Schichtindikatoren auf eine Zugehörigkeit zur selben Phase von Lösseinheit IIb. Der auffällig hohe Grobschluffgehalt und dadurch hohe gU_q -Wert deutlich oberhalb bisher festgestellter Werte für den mittelsächsischen Primärloß (Median ≈ 2 , LFULG, 2020) weist möglicherweise auf eine besonders windstarke Periode oder auch Exposition (Nordrand Lösshügelland) an diesem Standort hin. Sowohl der Anstieg des Grobschluffgehalts als auch die hier beobachtete kontinuierliche Altersentwicklung in die Tiefe induzieren rein äolische Sedimentablagerungen mit keiner bzw. geringer Umlagerung (MESZNER, 2015).

Die oxidative Hydromorphie ist im unteren Horizont 8 sehr schwach; es existieren aber auch sehr vereinzelt Fe-Hydroxid-Ooide¹ und Liesegangsche Ringe². Zum Hangenden nimmt die Rostfleckung deutlich zu und tritt in unregelmäßigen Bändern und Linsen auf. Die Hydromorphie wird als fossile periglaziäre Vernässung der ± gesättigten Zone über einer stauenden, sich auflösenden nicht dehydrierenden Permafrosttafel³ interpretiert. Das legen auch die unregelmäßigen Bänder- bis Nesterformen ohne bodenphysikalischen Bezug nahe. Die Parameter Bodenart, Lagerungsdichte und Porenanteil dieser Horizonte sind zudem antagonistisch für Sd-Horizonte nach KA 5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005). Eine holozäne Haftnässe-Hydromorphie erscheint ebenfalls unwahrscheinlich aufgrund des hohen Grobporenanteiles und der hohen Feldkapazität im Zusammenhang mit der wahrscheinlich auch prähistorisch relativ niedrigen klimatischen Wasserbilanz des Gebietes. Der Eisen-Verwitterungsindex Fe_{verw} nimmt nach oben zu, analog zum oben dargestellten makromorphologischem Verwitterungsbild der Bodenhorizonte 6–8, und weist beim Übergang von Horizont 6 zu 5 einen deutlichen Sprung zwischen.

Der mit Profilschicht 2 einsetzende Horizont 5 (0,90–1,55 m) verzahnt sich zapfen- bis schlierenartig, aber deutlich abgesetzt als Schichtwechsel mit dem Liegenden (Abbildung 10). Der hydromorphe Habitus kann als ± syngenetische kryoturbate Nassboden-Dynamik einer sommerlichen Auftauzone des

¹ Kugelig-ovale Mineralkörper aus Eisenhydroxid

² Periodisch auftretende, konzentrische Strukturen infolge chemischer Reaktionen wie Ausfällungen

³ Trennlinie vom Auftaubereich zum dauerhaft gefrorenen Untergrund

Permafrostbodens (sogenannte „active layer“) interpretiert werden. Eine gleichzeitig stattfindende (syngenetische) schwache Lössanwehung oder Umlagerung ist möglich. Chronostratigrafisch wurde für Horizont 5 mit einem Alter von $21,5 \pm 0,8$ ka die Einheit IIa nach MESZNER (2015) bestimmt (Einheit Wy2' nach LIEBEROTH, 1963; Tabelle 6). Die Altersdifferenz zwischen den Profilschichten 2 und 3 ergeben einen Zeitraum von ca. 3 ka. Damit ist eine „active layer“-Phase zeitlich plausibel möglich. Ein Nassboden an der Basis von Einheit IIa wurde bereits von MESZNER (2015) und LIEBEROTH (1963) festgestellt. Zudem wird eine starke Erosionsphase zwischen den Einheiten IIa und IIb vermutet (MESZNER, 2015).

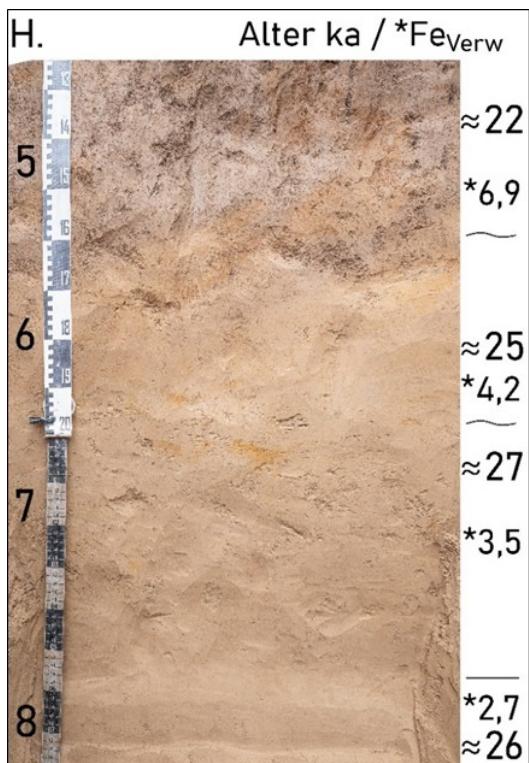


Abbildung 10: Horizonte (H.) 5–8 im Profil Schmorren. Rechts Alter und Eisen-Verwitterungsin-dex (*Fe_{Verw})

Die Horizonte 3 und 4 (0,39–0,90 m) werden aufgrund der gU_q-, Ti- und Zr-Wertebereiche sowie weiterer Indizes (Fe_{verw}, Na/Al, WI) ebenfalls der Profilschicht 2 und damit der Lösseinheit IIa zugeordnet. Im Ge-gensatz dazu hatte MESZNER (2015) im nahe gelegenen Profil Ostrau diesen Bereich oberhalb des stark hydromorph geprägten Horizonts der Lösseinheit I zugeordnet. Allerdings wurden dabei keine geoche-mischen Eigenschaften berücksichtigt. Eine Altersdatierung liegt hier nicht vor.

Aus der deutlichen, sedimentär-periglaziären Grenze zwischen den Profilschichten 2 und 3 ohne Sekundärkarbonate kann geschlussfolgert werden, dass der Löss von Schicht 2 bereits kalkarm angeweht wurde. Die holozäne Entkalkung hat im Profil nur geringe Bedeutung aufgrund der hohen Feldkapazi-tät, Kapillarität und geringen Klimatischen Wasserbilanz verbunden mit der Tiefenlage von ca. 2 m des Kalklösses. Es ist unwahrscheinlich, dass Schicht 2 primär dem Lössmergel von Schicht 3 entsprach. Zumindest wäre für diesen Fall Sekundärkalk zu erwarten sowie insgesamt eine geringere Verlehmung.

Zum Vergleich wiesen auch die mit ca. 15–18 ka datierten Sandstreifen-Lösse des Flämings eine nur geringe holozäne Entkalkung auf (KIRSTEN et al., 2024). Die dort untersuchten Lösse zeigten trotz oberflächennaher Position (ab ca. 1 m unter Sandlöss- und Flugsandbedeckung), teilweise geringer Mächtigkeiten und einer kalkfreien Sandunterlagerung noch Kalkgehalte von ca. 5–10 M-% CaCO₃ und teilweise auch primäre Kalkpartikel.

Die ± kolluvialen Oberbodenhorizonte 1 und 2 (0–0,30 m) sind durch die landwirtschaftliche Bearbeitung geprägt und entstammen der Hauptlage. Die Hauptlage ist analytisch indiziert durch den geringeren Ton-Gehalt, geringere pH-Werte und hohen Zr-Gehalt. Der Eisen-Aktivitätsgrad (Fe_{o/d}) ist vergleichsweise hoch während die pedogenen, stabilen (älteren) kristallinen Fe-Oxiden (Fe_{d-o}) geringere Werte als darunterliegende Horizonte aufweisen. Diese Werte verdeutlichen die pedogene Dynamik einer jungen, rezent wirkenden Verwitterung mit Lessivierung (Tonabreicherung). Der Hauptlagen-Löss wird stratigraphisch interpretiert als Lösseinheit I nach MESZNER (2015) bzw. Wy2' nach LIEBEROTH (1963). Die jüngsten Alter dieser Lösseinheit haben nach KREUTZER (in MESZNER, 2015) ein Alter von ca. 20–15 ka und die Lösse entstammen wahrscheinlich dem Übergangs- oder Grenzbereich der Mittel- zu Hauptlage.

Insgesamt bilden die Indizes Na/Al und WI als Verwitterungsmarker für Feldspäte gut abgegrenzte Wertegruppen für die Profilschichten 1–3 (Tabelle 6). Die Erdalkali-Alkali-Verhältnisse sind primär lithogen geprägt (mafische Minerale, Feldspäte, Tone, Glimmer, Karbonate) und sekundär durch Verwitterung, Pedogenese und stoffliche Umlagerung spezifiziert. Die Al- und Fe-Relationen mit Ton und Al/Fe bilden die Hauptschichtung weniger deutlich ab (Tabelle 6).

Zusammenfassend kann das Profil auf Basis der geochemischen Größen sowie der festgestellten OSL-Alter in drei Löss-Einheiten gegliedert werden. Die pedogene Gliederung ist, ähnlich wie im lössarmen bis -freien Hügelland, vorwiegend an makromorphologisch erkennbare Lagen gebunden. Die hydromorphen Ausbildung wird aufgrund der kryoturbaten Struktur, den Schichtgrenzen und dem fehlenden bodenphysikalischen Bezug genetisch primär in das Periglazial gestellt. Die Folge der periglazialen Transformation mit einer Erhöhung der Lagerungsdichte des Lösses kann eine fortgesetzte rezente, aber nur geringe Pseudogley-Dynamik im Profil sein.

6.2 Profil Krögis

Das Profil 2023 befindet sich ca. 10 m nordwestlich vom Leitprofil aus dem Jahr 1995. Es zeigt bei gleicher Reliefposition eine ähnliche, aber gering erodierte Horizontausbildung. Der Al-Horizont ist im Profil Krögis 2023 gegenüber dem Leitprofil 1995 nicht vorhanden (BARTH et al., 2020; SINAPIUS et al., 2023); ab ca. 1–3 m deutlich ausgeprägte Lamellenfleckenzone (LFZ) mit einer periglazial bänderartig angelegten, oxidativen Hydromorphie bei ca. 1,3–1,7 m vorhanden (Anhang A 3.2).

6.2.1 Bodengeologische Gliederung Profil Krögis

Die Abbildung 11 zeigt das Profilfoto von Krögis von der Bodenoberfläche bis in ca. 3 m Tiefe mit der Untergliederung in neun Horizonte. Eine Kurzbeschreibung findet sich in Tabelle 7, die Detailbeschreibung mit Einordnung der Lössschichten in Kap. 6.2.2. Die Horizonte 6 bis 9 wurden nicht als Mischprobe über die gesamte Horizontmächtigkeit beprobt, sondern in einzelne Subschichten unterteilt (siehe Zeile 2 in Tabelle 8), um markante Merkmale innerhalb der Horizonte charakterisieren zu können und ein detaillierteres Tiefenprofil der Messgrößen zu erhalten.



Tabelle 7: Bodenprofilbeschreibung Krögis

Nr.	untere Horizonttiefe [m]	Horizont	Genese, Lage
1	0,20	Ap	kolluvial verlagerte Hauptlage
2	0,35	rAp	
3	0,48	Sw-Bt+Al	kryoturbate Haupt- bis Mittellage
4	0,75	Sw-Bt	kryoturbate Mittel-bis Basislage
5	1,15	Swd-Bt	solimixtive Basislage
6	1,70	Sw-Bt-ilCv	perstrukturierter Löss der Basislage
7	2,50	Bt-ilCv	gering perstrukturierter Löss
8	2,70	Bt-ilCv	
9	4,60	ilCv	

Abbildung 11: Profil Krögis

6.2.2 Detailbeschreibung der Horizonte Profil Krögis

Die Horizonte 1 und 2 bestehen aus der kolluvial umgelagerten, allochtonen Hauptlage. Für die Profile der wiederholten BDF-Beprobung aus den Jahren 2011 und 2017, in etwa 10 m Entfernung vom hier untersuchten Profil 2023, sind jeweils kolluvial umgelagerte M-Horizonte bis ca. 0,5 m Tiefe dokumentiert (SINAPIUS et al., 2017). Die Ton-Gehalte von 15 M-% deuten auf einen ursprünglichen Bt-Al-Übergangsbereich hin (Tabelle 8). Die Zr-Gehalte (600 µg/g) befinden sich im typischen hohen Bereich der Löss-Hauptlagen (LfULG, 2024).

Der Horizont 3 ist der autochtonen Haupt- bis Mittellage zuzuordnen. Die Elementgehalte, insbesondere Zr (Tabelle 8) und die Schichtindizes Fe_{verw} , Ti/Zr, Na/Al und WI (Tabelle 9) zeigen die Zugehörigkeit zur Profilschicht 1. Der Aktivitätsgrad $Fe_{o/d}$ weist mit einem Wert von 0,35 auf den Übergangsbereich zwischen Hauptlage und Mittellage. Die Gliederung von Lössprofilen nach periglaziären Lagen bzw. Zonen unterhalb der Hauptlage erweist sich jedoch oft als schwierig (ALTERMANN et al., 2008) und sollte in zukünftigen Untersuchungen kritisch geprüft werden.

Der Horizont 4 repräsentiert sehr wahrscheinlich die Mittellage bzw. den Übergang zur Basislage. Der Tonsprung auf 21,5 M-% gegenüber Horizont 3 ist pedogen durch den Toneintrag bedingt (Tabelle 8). Der Zr-Gehalt fällt deutlich ab, während das Verhältnis Ti/Zr leicht ansteigt. Das Verhältnis von Grobschluff zu den anderen Schlufffraktionen verhält sich ebenfalls konstant. Der Anstieg von Fe_{verw} auf 4,9 spiegelt den gestiegenen Hydromorphiegrad wider. Insgesamt liegen die Schichtindizes überwiegend im Bereich zwischen den Horizonten 1–3 und Horizont 5 (Tabelle 9). Die Indizes Na/Al und WI zeigen jedoch deutlich die Zugehörigkeit zur Profilschicht 2.

Mit dem Horizont 5 beginnt der Basislagenkomplex, der zum Hangenden (Horizont 4) makromorphologisch abgegrenzt ist. Es setzen deutliche Perstrukturenmerkmale ein, d. h. durch Auftauvorgänge in der Auftauzone des Dauerfrostbodens veränderte Gefügestrukturen. Die Hydromorphie ist bezogen auf das gesamte Profil hier am intensivsten ausgeprägt. Entsprechend treten Maximalwerte des Fe-Gesamtgehalts, von Fe_d und entsprechend Fe_{d-o} sowie Fe_{verw} auf (Tabelle 8, Tabelle 9). Partiell existieren schwach diffuse Marmorierungen und Bleichrisse. Es erscheinen erste helle Lamellenflecken, die hier unregelmäßig und nur vereinzelt linsenförmig auftreten.

Der Horizont 6 stellt den oberen kryoturbat-hydromorphen Abschnitt der typischen Lamellenfleckenzone (LFZ) nach LIEBEROTH (1959) dar. Es bestehen voneinander scharf abgrenzte keilartige LFZ-Bereiche mit oxidativen Nestern und Bändern. Die bänderförmige Hydromorphie steht in keiner Abhängigkeit zum Gefüge, dem nach unten zunehmenden Tongehalt sowie der Lagerungsdichte. Insgesamt weist dieser Horizont einen hohen Grobporenanteil und typische Nadelstichporen auf. Die makroskopisch erkennbaren Toncutane befinden sich auf den vertikalen Gefügeoberflächen. Der pH und der Zr-Gehalt

sinken innerhalb von Horizont 6 mit der Tiefe deutlich ab (Tabelle 8). Die Schichtindizes (Tabelle 9) verhalten sich im Horizont 6 schwankend: Der Eisen-Aktivitätsgrad Fe_{o/d}, Ti/Zr und WI steigen mit der Tiefe an, während gU_q, Fe_{verw}, Al/Ton und Fe/Ton abfallen.

Tabelle 8: Analysenergebnisse Profil Krögis

Horizontnr.	1	2	3	4	5	6			7		8	9		
untere Pro-bentiefe* [m]	0,20	0,35	0,48	0,75	1,15	1,25	1,55	1,70	1,85	2,50	2,65	3,05	3,40	3,80
Horizont	Ap	rAp	Sw-Bt+Al	Sw-Bt	Swd-Bt	Sw-Bt-ilCv			Bt-ilCv		Bt-ilCv	ilCv		
Korngrößen in [M-%]:														
Sand	4,5	4,7	4,3	3,4	3,6	3,5	2,6	1,9	2,6	2,5	3,4	2,1	2,7	2,1
Schluff	80,4	80,2	79,7	75,1	76,2	78,5	76,5	73,8	78,3	78,2	76,2	80,5	78,4	80,6
Ton	15,1	15,1	16	21,5	20,2	18	20,9	24,3	19,1	19,3	20,4	17,4	18,9	17,3
Grobsand	1,1	1,4	0,5	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0	0,2	0	0	0
Mittelsand	1,5	0,8	1,2	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,7	0,2	0,1	0,2
Feinsand	1,9	2,5	2,6	2,4	2,9	3,0	2,4	1,8	2,5	2,3	2,5	1,8	2,6	1,9
Grobschluff	55,4	55,5	52,9	51,1	50,7	57,6	51,3	48,2	54,4	54,6	42,8	56,2	54,4	58,2
Mittelschluff	20,1	20,1	22,4	19,6	20,4	17,4	19,8	18,3	18,7	18,5	25,2	20,4	19,7	18,4
Feinschluff	5,0	4,7	4,4	4,4	5,1	3,6	5,3	7,3	5,2	5,0	8,2	3,9	4,4	4,0
chemischen Kennwerte:														
pH [-]	7,4	6,4	7,0	7,0	7,1	6,7	6,4	5,4	6,1	5,8	5,7	5,7	5,5	5,4
Corg [M-%]	1,17	1,02	0,25	0,15	0,19	< 0,1	0,12	0,11	< 0,1	0,12	0,10	0,13	< 0,1	< 0,1
CaCO ₃ [M-%]	0,20	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Fe _o [mg/g]	2,3	2,3	2,2	2,0	1,4	1,1	1,1	1,8	1,3	1,5	2,3	1,1	1,3	0,9
Fe _d [mg/g]	5,7	5,7	6,1	7,4	8,8	8,6	6,6	7,0	6,7	7,0	6,9	7,4	6,9	7,0
Fe [µg/g]	17000	17000	19000	24000	27000	25000	24000	26000	23000	25000	26000	24000	24000	23000
Al [µg/g]	47000	48000	53000	63000	63000	62000	63000	64000	60000	63000	62000	61000	61000	63000
Ti [µg/g]	4900	4800	5000	4600	4700	4900	4800	5000	4900	5200	5000	5200	5000	5100
Zr [µg/g]	600	600	610	540	510	590	550	500	560	570	520	580	570	620
Ca [µg/g]	6200	4700	4100	4500	4700	4600	4800	5100	4800	5000	5200	4900	4700	4800
Mg [µg/g]	3800	3700	4500	6700	7100	7200	7400	7500	7000	7100	7000	6900	7000	7000
K [µg/g]	20000	20000	21000	21000	22000	21000	22000	24000	22000	23000	23000	22000	22000	21000
Na [µg/g]	8500	9000	8500	7200	7100	7700	8300	8300	8500	9300	9400	9800	9300	9600

* Die untere Tiefe der Probe befindet sich innerhalb des in Zeile 1 genannten Horizonts, entspricht jedoch nicht in jedem Fall der unteren Horizonttiefe nach Tabelle 7.

Der Horizont 7 umfasst die maximal gering kryoturbate und gering hydromorphe LFZ bis zu einer dunklen Zone im Liegenden (Horizont 8). Die hellen, an Ton armen LFZ-Flecken sind typisch in Lagen, Bändchen und Linsen ± horizontal angeordnet. Die Größe der Flecken beträgt überwiegend zwischen 2–5 cm horizontale Länge und 1–2 cm vertikale Höhe. Diffus-wolkige schwache Rostflecken durchsetzen die LFZ. Der Verwitterungsindex Fe_{verw} nimmt weiter leicht ab (Tabelle 9). Dagegen steigen die Gehalte von

Na und Zr sowie der pH-Wert und Grobschluffgehalt gegenüber Horizont 6 deutlich an (Tabelle 8). Demzufolge nehmen auch das Na/Al-Verhältnis und gU_q zu.

Tabelle 9: Schichtindikatoren und Element-Relationen nach Kap. 4.2 mit Zuordnung der Lösseinheiten nach MESZNER (2015) und LIEBEROTH (1963) für das Profil Krögis

Horizontnr.	1	2	3	4	5	6			7		8	9		
untere Proben-tiefe [m]	0,20	0,35	0,48	0,75	1,15	1,25	1,55	1,70	1,85	2,50	2,65	3,05	3,40	3,80
Horizont	Ap	rAp	Sw-Bt+Al	Sw-Bt	Swd-Bt	Sw-Bt-ilCv			Bt-ilCv		Bt-ilCv	ilCv		
Indikatoren:														
gU _q [M-%]	2,2	2,2	2,0	2,1	2,0	2,8	2,0	1,9	2,3	2,3	1,3	2,3	2,3	2,6
Fe _{d-o} [mg/g]	3,4	3,5	3,9	5,5	7,3	7,5	5,5	5,2	5,4	5,5	4,6	6,3	5,5	6,2
Fe _{o/d} [mg/mg]	0,41	0,40	0,35	0,26	0,16	0,13	0,16	0,25	0,19	0,22	0,33	0,15	0,20	0,12
Fe _{d/t} [mg/mg]	0,33	0,34	0,32	0,31	0,32	0,34	0,28	0,27	0,29	0,28	0,26	0,31	0,29	0,31
Fe _{verw} [M-%/M-%]	3,0	3,1	3,3	4,9	5,5	5,4	4,8	4,9	4,5	4,2	3,6	4,6	4,4	4,6
Ti/Zr [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	8,2	8,0	8,2	8,5	9,2	8,3	8,7	10,0	8,8	9,1	9,6	9,0	8,8	8,2
Al/Ton [mg/g]	312	318	331	293	312	345	301	264	314	326	304	350	322	365
Fe/Ton [mg/g]	113	113	119	112	134	139	115	107	120	129	128	138	127	133
Al/Fe [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	2,8	2,8	2,8	2,6	2,3	2,5	2,6	2,5	2,6	2,5	2,4	2,5	2,5	2,7
Na/Al [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	0,18	0,19	0,16	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15
WI [mol/mol]	1,02	0,98	0,90	0,78	0,81	0,81	0,84	0,88	0,87	0,87	0,89	0,88	0,87	0,82
Profilschicht	1		2					3						
OSL-Alter [ka]	-		-	22,5	-	21,7	-	-	21,5	-	24,9	-	23,5	
Löss-Einheit MESZNER (2015)	I		IIa					IIa						
Löss-Einheit LIEBEROTH (1963)	Wy2 ^{''}		Wy2 [']											

Der Horizont 8 ist eine dunkel abgesetzte, braungrau bis hellgrau fleckige Zone unterhalb der typischen LFZ des Horizontes 7. Die horizontale Struktur der Linsen und Bändchen ist aufgelöst und makromorphologisch relativ schwach diffus erkennbar. Die dunklere Färbung ist nicht im Corg-Gehalt erkennbar (Tabelle 8). Der Schluffgehalt verändert sich sprunghaft hin zu feineren Fraktionen. Damit sinkt der gU_q-Wert auf ein Minimum im Profil. Der Eisen-Aktivitätsindex Fe_{o/d} ist gegenüber Horizont 7 erhöht, während Fe_{verw} vergleichsweise gering ist.

Mit Horizont 9 wird der größer gebänderte hellere Abschnitt der LFZ an der Basis des Profilaufschlusses zusammengefasst. Diese Ausbildung kann als „atypische LFZ“ bezeichnet werden, da sie bisher wahrscheinlich noch nicht beschrieben wurde. Die hellen Linsen und Bänder erreichen hier etwa 3–10 cm Länge. Der aufgehellt tonverarmte Flächenanteil ist nach unten zunehmend sehr hoch. Innerhalb des

Horizontes besteht durch eine dunklere graue Zone (Foto (b) in Abbildung 12) bei 3,3–3,4 m eine Differenzierung in einen unteren Abschnitt (c) sowie einen oberen Abschnitt (a). Insbesondere der untere Abschnitt (c) ähnelt durch die flachen Geometrien und die Parallelität auch Fließstrukturen. Makromorphologisch lässt sich Horizont 9 wie folgt charakterisieren:

(a) oberer Abschnitt 2,70–3,30 m

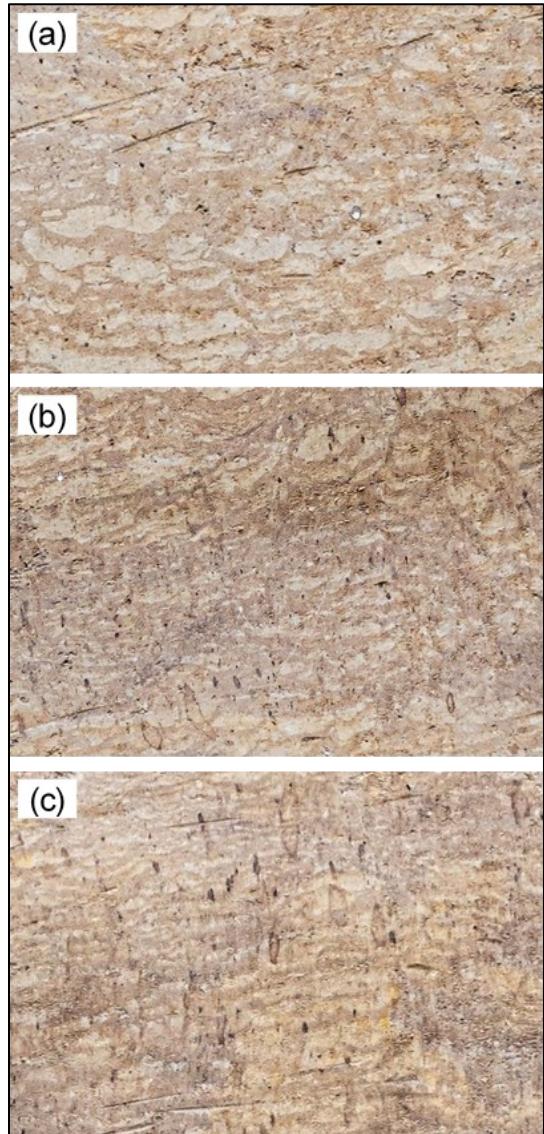
- heterogene Geometrien der Aufhellungen
- hoher Anteil brauner tonreicher Matrix
- geringe Parallelität der Strukturen mit welligen Diskontinuitäten
- nach oben abnehmender Anteil von Fe-Mn-Konkretionen

(b) dunkle graue Zone 3,30–3,40

- wellige, unregelmäßige Strukturen mit deutlicher bis scharfer Abgrenzung nach oben und unten
- deutlicher Anteil von dunkleren Fe-Mn-Konkretionen

(c) unterer Abschnitt 3,40 bis > 4,00 m

- häufig horizontale, flache, helle Bänder
- zwischen den Bändern unregelmäßige-wolkig graue Diskontinuitäten in Dezimeter-Skala mit hellen Lessivierungsnestern und unregelmäßigen, teils schlierenförmigen dunklen Bereichen
- deutlicher Anteil von dunklen Fe-Mn-Konkretionen



**Abbildung 12 LFZ im Profil Krögis in
(a) 3 m, (b) 3,3 m und (c) 3,6 m Tiefe.
Bildbreite ca. 20 cm**

Der Grobschluffgehalt steigt deutlich an und liegt bei 2,3 bis 2,6. Natrium und Zr liegen auf einem hohen Niveau; das Verhältnis Ti/Zr verringert sich mit der zunehmenden Tiefe, ebenso wie WI (Tabelle 9). Unterhalb von 3,5 m Tiefe erscheinen vereinzelte schwache diffus-wolkige Rostflecken.

6.2.3 Lithogenetische Interpretation Profil Krögis

Die Lössfolge beginnt im Aufschluss mit der unteren Profilschicht 3 und dem basalen Horizont 9 (2,70–4,60 m). Dieser Horizont bildet makromorphologisch insgesamt eine durch grobe, scharf abgegrenzte helle Lessivierungslinsen, -lamellen und -bänder geprägte Zone. Die makromorphologischen Merkmale von Horizont 9 (Abbildung 12) vermitteln den Eindruck einer periglaziär-kryogen beeinflussten Genese der Strukturen. Es existieren „plastische“ wellige Bereiche und horizontale „platte“ Bereiche sowie kryogene Kluftisse (siehe auch Abbildung 13). Eventuell verursachte eine kleinskalig differenzierte temporäre Hypersättigung im Frost-Tau-Milieu einzelner Bereiche die Ausbildung der vorliegenden Strukturen. Solifluktionsmerkmale wurden im Rahmen der Dünnschliffanalysen (Anhang A 2.3.3) nicht gefunden. Die Schichtindikatoren zeigen für Horizont 9 typische Werte für gering verwitterten Löss. Das OSL-Alter des Lösses wurde in Horizont 9 bei 3,5 m Tiefe mit $23,5 \pm 0,9$ ka und in 2,9 m Tiefe mit $24,9 \pm 0,9$ ka bestimmt (Tabelle A 1 in Anhang A 1.3). Unter Berücksichtigung der Unsicherheit ergibt sich ein Alter von ca. 24 ka für diese Schicht. Damit kann diese Lössphase der frühen Einheit IIa nach MESZNER (2015) zugeordnet werden.

Der Horizont 8 (2,50–2,70 m) ist die Übergangs- oder Subzone zur hangenden typischen LFZ der Horizonte 6 und 7. Die Schichtindizes deuten auf eine Zugehörigkeit von Horizont 8 zur dritten Profilschicht. Die dunkelgraue Färbung tritt analog der dunklen Zone bei 3,30–3,40 m (Horizont 9) auf, wobei diese dunkelgraue Färbung hier intensiver ausgebildet ist. Sie lagert unregelmäßig stratiform und nach unten meist scharf abgegrenzt zwischen den unterschiedlichen LFZ-Abschnitten. Nach oben geht sie eher unscharf innerhalb weniger Zentimeter in die typische LFZ über. Wahrscheinlich repräsentiert Horizont 8 eine Nassbodenphase mit einer schwachen oder keiner Lössanwehung. Darauf weisen die Indikatoren gU_q (sehr gering) und Ti/Zr (erhöht) sowie ein erhöhter Mangan-Gehalt (Werte hier nicht gezeigt) hin. Der Bereich zwischen 2,3–2,9 m Tiefe, der Horizont 8 enthält, befindet sich in einer zeitlichen „Lücke“ von ca. 2 ka (Tabelle 9).

Die Profilschicht 2 enthält im unteren Bereich die Horizonte 6 und 7 (1,15–2,50 m). Diese zeigen die typisch ausgebildete Lamellenfleckenzone sächsischer Lössböden nach LIEBEROTH (1959). Die beiden Horizonte lassen sich makromorphologisch in weitere 3–4 Subzonen unterschiedlicher Hydromorphie, LFZ-Struktur und kryoturbater Perstruktion gliedern. Ähnlich wie für Horizont 9 weisen die makromorphologischen Merkmale auf eine periglaziäre Transformation hin. Der obere Horizont 6 zeigt dabei deutlicher die polygenetische Perstruktion, d. h. sich überlagernde Gefügemerkmale infolge diverser Auftauprozesse des Permafrostbodens. Möglicherweise weisen die volatilen Werte der Schichtindikatoren auf eine periglaziär-solimixiv bedingte Heterogenität einer Nassboden-Dynamik hin. Die LFZ-Struktur der Horizonte 6 und 7 wird durch die vertikalen und diagonalen Bodenklüfte mit intensiv ausgeprägten Toncutanen (diagnostisch für Bt) durchzogen (Abbildung 14). Nach unten nehmen diese Bt-

Klüfte ab. Daher kann ein älterer Bildungszeitraum der LFZ gegenüber diesen Tonüberzügen angenommen werden. Die Schichtindikatoren verhalten sich analog zur Heterogenität der Subzonen relativ volatil. Die Altersdatierungen des Lösses von Horizont 7 (OSL-Probe bei 2,3 m) mit $21,5 \pm 0,7$ ka und in Horizont 6 (OSL-Probe bei 1,4 m) mit $21,7 \pm 0,7$ ka (Tabelle A 1 in Anhang A 1.3) zeigen fast identische Alter der Einheit IIa. Dies verweist auf die sekundäre polygenetische Transformation, da analytisch kein oder nur geringer zeitlicher Hiatus besteht.



Abbildung 13: LFZ-Struktur (Horizont 9) getrennt durch kryogenen Klufttriss



Abbildung 14: Klüftung mit ausgeprägten Toncuttanen und LFZ-Struktur in den Horizonten 6 und 7

Der Horizont 5 (0,75–1,15 m) besitzt dominante hydromorphe Merkmale. Die Hydromorphie läuft nach unten im Horizont 6 zwischen den LFZ-Bereichen unregelmäßig aus. Nach oben ist der Horizont 5 scharf abgegrenzt zum nur gering hydromorphen Horizont 4. Vereinzelt treten undeutliche helle Linsen auf. Die Schichtenindikatoren zeigen keine klare Abgrenzung zum Liegenden. Das Alter für diesen Abschnitt wurde in 1,0 m Tiefe mit $22,5 \pm 0,7$ ka bestimmt. Damit gehört dieser Horizont ebenfalls zu Lösseinheit IIa nach MESZNER (2015) bzw. zur Profilschicht 2. Der Horizont 4 (0,48–0,75 m) schließt die Profilschicht 2 nach oben ab, was durch die Schichtindikatoren deutlich erkennbar ist (Tabelle 9).

Die Horizonte 1–3 (0–0,48 m) gehören als Profilschicht 1 der Haupt- bis Mittellage an und sind zum Teil kolluvial beeinflusst (Kap. 6.2.2). Aufgrund ihrer oberflächennahen Position und dem hohen Zr- Gehalt wird diese Schicht der Lösseinheit I nach MESZNER (2015) zugeordnet. Eine Datierung liegt nicht vor. Der Oberboden (Ap + rAp) zeigt durch rezente und historische Nutzung (z. B. Düngung) beeinflusste Werte.

Auffällig ist der im Vergleich zum Profil Schmorren andere Tiefenverlauf der pH-Werte im Profil Krögis. Unter der Voraussetzung eines primär stofflich hinreichend homogenen, basenreichen Lösses würde sich mit von oben fortschreitender, nach unten abnehmender Verwitterung und Pedogenese ein mit der Tiefe zunehmender pH-Wert einstellen (siehe Schmorren Kap. 6.1.2). Hingegen zeigt das Profil

Krögis insgesamt sinkende pH-Werte im Tiefenverlauf von neutral nach schwach bis fast mäßig sauer (Tabelle 8). Vermutlich ist dies das Ergebnis der polyphasigen Paläonassbodenentwicklung innerhalb der Profilschichten 2 und 3 mit wechselnd trocknen und feuchten Milieus und/oder einer Sedimentation auf einem ± wassergesättigten Untergrund in der Lössphase IIa. Diese Interpretation wird gestützt durch die bodenphysikalisch nicht durch rezente Prozesse begründbare Hydromorphie unterhalb von Horizont 5 ab ca. 1,2 m Tiefe.

Insgesamt zeigen die geochemische Werte und Indizes sowie die Ergebnisse der Altersdatierung (Tabelle 8, Tabelle 9) ein größtenteils geschlossenes Bild für die Einordnungen und Abgrenzungen der Profilschichten 1 bis 3. Die betrachteten Indizes ermöglichen eine klare Abgrenzung der Profilschicht 1 von der Schicht 2. Die geringere geochemische Abgrenzung der Schicht 2 von Schicht 3 kann mit der lithologischen Verwandtschaft (relative Homogenität) innerhalb der Lösseinheit IIa begründet werden.

Für die genetische Interpretation der LFZ in den Profilschichten 2 und 3 muss die Bodenprofilaufnahme nach KA 5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005) insgesamt beachtet werden:

- Die Lessivierung der Schicht 1 (Hauptlage) am Standort ist kennzeichnend im Horizont Sw-Bt+Al. Auf unregelmäßig vertikalen und diagonalen Hauptklüften der Schicht 2 (Basislagen) decken großflächige Tonbeläge (Sw-Bt, Swd-Bt) die LFZ-Struktur ab.
- Die subdominante Hydromorphie ist bis Horizont 5 in Schicht 2 (Swd-Bt, ca. 12 dm) plausibel an Gefüge und Lagerungsdichte gebunden. Die hydromorphen Erscheinungsformen führen zur subdominanten Benennung Sw über Swd der Horizonte 4 und 5. Die darunter folgende makromorphologische Hydromorphie ist nicht erklärbar durch die rezent vorliegenden bodenphysikalischen Eigenschaften.

Im Gegensatz zum hangenden Lessivé-Profil der Pseudogley-Parabraunerde setzt die LFZ erst ab Schicht 2 im Basislagenkomplex ein. Dort zeigt die LFZ keine vertikale Horizontdifferenzierung diagnostisch nach KA5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005). Die Erscheinungsformen der tonärmeren Strukturen („Al“ in Horizont 3) und tonreichen Matrix („Bt“) bilden insgesamt einen subparallelen bis parallelen Schicht-Komplex mit Verzahnungs- und Übergangshorizonten ohne vertikale Abfolge der für Parabraunerden typischen Horizontabfolge Al/Al+Bt/Bt (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005). Die Pedogenese der Pseudogley-Parabraunerde steht somit zumindest makromorphologisch nicht im Zusammenhang mit der LFZ.

Dem entgegen stehen die Auswertungen der Dünnschliffuntersuchungen für das Profil Krögis, die auf eine pedogenetische Entstehung der LFZ hinweisen (Anhang A 2.4). Die Analyse der Dünnschliffe zeigte, dass eine sedimentäre Genese der LFZ unwahrscheinlich ist. Wenn die LFZ demnach ein Ergebnis von Lessivierung (also Pedogenese) darstellt, bedeutet dies, dass bestimmte klimatische Voraussetzungen

gegeben sein mussten. Zum einen musste der Löss primär kalkarm sein bzw. eine klimatisch bedingte Entkalkung der Lüsse bereits stattgefunden haben, da erst ab pH-Werten von 6,5– 6,7 die Tondispersierung einsetzt. Zum anderen musste eine temporär hohe Sickerwasserbewegung gegeben sein um die Verlagerung des dispergierten Tons zu gewährleisten. Diese Bedingungen waren für Krögis plausibel für das präholozäne Periglazial möglich, da die festgestellten OSL-Alter von ca. 24 ka der Schicht 3 und ca. 22 ka der Schicht 2 zeitlich mit der sogenannten Frankfurter Staffel zusammenfallen (LÜTHGENS, 2011). Die Frankfurter Staffel ist die Rückschmelzphase des Brandenburger Stadiums, also generell ein klimatisch wärmerer Abschnitt des Pleniglazials. Die Permafrosttafel in Mittelsachsen könnte dadurch deutlich tiefergelegt gewesen sein oder war gänzlich aufgetaut (WEISE, 1983).

Die wahrscheinlich einsetzende Bodengefrörnis im Periglazial ab Herbst (WEISE, 1983) könnte einen Porenwasserdruck und damit Wasserbewegung mit Tonverlagerung erzeugt haben. Das Gefrieren der Bodenoberfläche und verzögert Bodeneis führten zu räumlich heterogener Wassersättigung und Poren- druck verbunden mit kleinskaliger Porenwasserwanderung einschließlich dem dispergierten Ton. In der Folge differenzierten sich die an Ton verarmten Zwischenlamellen, Linsen und Bändchen gegenüber der an Ton angereicherten Umgebung heraus. Die Eislinsen verhinderten die Entstehung einer vertikalen Lessivé-Horizontfolge im Sinne der KA5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005). Nachfolgend, aber vor dem jüngsten Löss und unter einem eher wechselfeuchten Milieu, bildete sich die oxidative Hydro- morphie im oberen Abschnitt der LFZ (Horizonte 5–7) heraus. Die festgestellten unterschiedlichen Alter von 24 bzw. 22 ka und die geochemischen Marker sowie die makromorphologischen Unterschiede und die Hydromorphie einschließlich der „dunklen“ Zone zwischen Schicht 2 und Schicht 3 sprechen für eine 2-Phasigkeit der Lössanwehung innerhalb der Lüsseinheit IIa sowie der LFZ-Genese. Eine primäre periglaziale LFZ-Genese widerspricht nicht den Befunden der rezent-subrezenten Toneinspülung (Anhang A 2). Die Merkmale und Unterschiedlichkeit der Tonilluviationen sprechen für einen längeren Zeit- raum der Prozesse. Die Mehrphasigkeit einschließlich eines spätglazialen Beginns für die Lessivé-Pedo- genesen stellte KÜHN (2003) fest, die LFZ wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

6.3 Profil Naundorf

Das Profil von 2023 ist in Substrataufbau und Horizontabfolge sehr ähnlich dem Leitprofil von Naundorf (Anhang A 3.3 und BARTH et al., 2020). Leichte Unterschiede bestehen in den Erscheinungsformen der Lessivierung (ausgeprägte Ael-Aufhellung in Horizont 3–4, Verzahnung mit Bt) und Hydromorphie.

6.3.1 Bodengeologische Gliederung Profil Naundorf

Das Profilfoto von Naundorf in Abbildung 15 zeigt den 2023 aufgeschlossenen Schurf von der Bodenoberfläche bis in ca. 3,85 m Tiefe mit der Untergliederung in zwölf Horizonte. Eine Kurzbeschreibung findet sich in Tabelle 10, die Detailbeschreibung mit Einordnung der Lössschichten in Kap. 6.3.2.

Tabelle 10: Bodenprofilbeschreibung Naundorf



Nr.	untere Horizonttiefe [m]	Horizont	Genese, Lage
1	0,18	Ap	Haupt- bis Mittellage
2	0,31	rAp	
3	0,46	Bt+Ael-Sw	
4	0,90	Ael+Bt-Sw	kryoturbate Mittel- bis Basislage
5	1,10	Bt-Sd	
6	1,65	Sd	solimixtive Basislage
7	2,00	Sd	
8	2,45	Bt-Sd	solifluidaler Löss, fersiallitische Verwitterung
9	2,65	Sd	
10	3,20	Sd	
11	3,65	fSwd	solifluidale, fersiallitische Verwitterung, (überwiegend Granulit-Herkunft)
12	4,10	fSd	

Abbildung 15: Profil Naundorf

6.3.2 Detailbeschreibung der Horizonte Profil Naundorf

Die Horizonte 1 bis 3 zeigen Merkmale sowohl von Haupt- als auch der Mittellage. Die hohen bis mittleren Zr-Gehalte verweisen auf einen Übergang der Lagen (Tabelle 11). Der leicht geringere Ton-Gehalt des rAp gegenüber dem Ap lässt eine geringe kolluviale Beeinflussung vermuten. Der erhöhte Ca-Gehalt des Ap ist auf landwirtschaftliche (Kalk-)Düngung zurückzuführen. Im Bt+Ael-Sw (Horizont 3) werden

trotz des makromorphologisch erkennbar hohen Anteils hell lessivierter Bereiche bereits 20,6 M-% Ton erreicht. Der Grobschluffindex gU_q liegt mit 1,6–1,8 über den Werten der sich nach unten anschließenden Horizonte (Tabelle 12). Die Indizes Na/Al und der Feldspat-Verwitterungsindex WI liegen in den Horizonten 1 und 2 auf einem hohen Niveau, fallen jedoch in Horizont 3 in den Wertebereich der darunterliegenden Horizonte 4–6. Dagegen wurden für Fe_{verw} , Ti/Zr und Al/Fe in den Horizonten 1–3 vergleichbare Werte festgestellt, die sich von den Horizonten 4–6 abgrenzen.

Tabelle 11: Analyseergebnisse Profil Naundorf

Horizontnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
untere Horizonttiefe [m]	0,18	0,31	0,46	0,90	1,10	1,65	2,00	2,45	2,65	3,20	3,65	4,10
Horizont	Ap	rAp	Bt+Ael-Sw	Ael+Bt-Sw	Bt-Sd	Sd	Sd	Bt-Sd	Sd	Sd	fSwd	fSd
Korngrößen in [M-%]:												
Sand	4,7	5,3	3,3	3,8	2,7	2,4	3,6	10,2	20,3	22,4	11,2	21,6
Schluff	78,0	78,3	76,1	70,8	73,6	71,5	75,7	64,5	50,7	50,0	61,9	48,3
Ton	17,3	16,4	20,6	25,4	23,7	26,1	20,8	25,3	29,1	27,6	26,9	30,2
Grobsand	1,6	1,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	2,5	2,6	0,5	3,1
Mittelsand	1,2	1,3	0,8	1,4	0,7	0,8	0,8	3,6	8,5	9,0	3,7	8,3
Feinsand	1,9	2,4	2,0	1,8	1,5	1,1	2,2	5,1	9,2	10,8	7,0	10,1
Grobschluff	47,7	48,9	48,6	34,3	38,0	33,9	47,4	31,0	23,1	27,2	39,7	16,6
Mittelschluff	24,2	23,1	22,7	28,8	27,6	29,1	23,5	24,6	20,1	16,6	17,2	19,0
Feinschluff	6,1	6,3	4,7	7,7	8,0	8,5	4,8	9,0	7,5	6,2	5,0	12,7
chemischen Kennwerte:												
pH [-]	6,0	5,9	5,7	5,3	5,3	5,1	5,2	5,3	5,4	5,3	5,3	5,3
Corg [M-%]	1,39	1,22	0,20	0,12	0,14	0,14	< 0,1	0,13	0,13	< 0,1	< 0,1	0,11
CaCO ₃ [M-%]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Fe _o [mg/g]	2,6	2,6	2,4	3,2	2,9	2,1	1,2	0,8	0,8	1,4	0,3	1,1
Fe _d [mg/g]	7,5	7,7	7,0	8,3	9,5	7,6	4,9	9,1	4,9	18,4	13,0	34,6
Fe [µg/g]	21000	21000	24000	29000	30000	29000	23000	27000	21000	35000	33000	61000
Al [µg/g]	54000	54000	64000	66000	66000	68000	64000	72000	81000	69000	75000	68000
Ti [µg/g]	5100	5000	5100	5400	5200	5400	5200	5100	5100	5300	6000	6200
Zr [µg/g]	580	580	560	490	500	480	540	430	400	490	610	500
Ca [µg/g]	4300	4300	3700	3900	3900	4400	4600	4100	3200	2000	2600	2300
Mg [µg/g]	4700	4700	6400	6800	7000	7500	6800	6500	5700	3800	4300	4300
K [µg/g]	20000	20000	22000	23000	23000	24000	24000	21000	19000	17000	19000	19000
Na [µg/g]	7800	7900	7300	6300	6600	6200	8200	6000	4500	2400	2200	1800

Der Horizont 4 befindet sich im Tiefenbereich der Mittel- bis Basislage. Der Horizont wird durch eiskeilartige Bleichadern und hydromorphe Marmorierung zum Hangenden und Liegenden deutlich abgegrenzt. Der Anteil von Grobporen (Nadelstichporen) ist hoch. Der Tongehalt steigt pedogen bedingt

(Tonilluviation) stark an. Der Grobschluffgehalt und damit auch gU_q gehen sehr deutlich zurück. Ebenfalls fällt der Zr-Gehalt ab und das Ti/Zr-Verhältnis bezogen auf Löss ist sehr hoch. Der Aktivitätsgrad $Fe_{o/d}$ steigt geringfügig und ist mit 0,39 bezogen auf die Tiefenstufe hoch. Der pH-Wert sinkt deutlich ab.

Der Horizont 5 gehört zum Basislagenkomplex. Makromorphologisch stellt er eine unregelmäßig kryoturbate Übergangszone dar. Lessivierte gering gebleichte Risse, Adern oder Nester wechseln scharf abgrenzt neben oxidativ hydromorphen Bt-Bereichen. Anteile mit Marmorierung sind gering. Die Schichtindikatoren gU_q , Ti und Zr bewegen sich bei geringem Anstieg im gleichen Niveau wie im Horizont 4 (Tabelle 11). Der Magnesiumgehalt ist in den Horizonten 4–7 deutlich erhöht.

Tabelle 12: Schichtindikatoren und Element-Relationen nach Kap. 4.2 mit Zuordnung der Löss-einheiten nach MESZNER (2015) und LIEBEROTH (1963) für das Profil Naundorf

Horizontnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
untere Horizont-tiefe [m]	0,18	0,31	0,46	0,90	1,10	1,65	2,00	2,45	2,65	3,20	3,65	4,10
Horizont	Ap	rAp	Bt+Ael -Sw	Ael+Bt -Sw	Bt-Sd	Sd	Sd	Bt-Sd	Sd	Sd	fSwd	fSd
Indikatoren:												
gU_q [M-%]	1,6	1,7	1,8	0,9	1,1	0,9	1,7	0,9	0,8	1,2	1,8	0,5
Fe_{d-o} [mg/g]	4,9	5,1	4,7	5,1	6,6	5,5	3,7	8,2	4,2	17,0	12,6	33,6
$Fe_{o/d}$ [mg/mg]	0,35	0,34	0,34	0,39	0,30	0,28	0,24	0,09	0,16	0,08	0,03	0,03
$Fe_{d/t}$ [mg/mg]	0,35	0,37	0,29	0,29	0,32	0,26	0,21	0,34	0,23	0,53	0,39	0,57
Fe_{verw} [M-%/M-%]	4,0	4,0	4,0	4,4	5,2	5,0	3,3	7,7	5,7	13,4	10,3	16,6
Ti/Zr [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	8,8	8,6	9,1	11,0	10,4	11,3	9,6	11,9	12,8	10,8	9,8	12,4
Al/Ton [mg/g]	312	330	311	260	279	261	308	285	279	250	279	225
Fe/Ton [mg/g]	121	128	117	114	127	111	111	107	72	127	123	202
Al/Fe [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	2,6	2,6	2,7	2,3	2,2	2,3	2,8	2,7	3,9	2,0	2,3	1,1
Na/Al [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]	0,14	0,15	0,11	0,10	0,10	0,09	0,13	0,08	0,06	0,03	0,03	0,03
WI [mol/mol]	0,85	0,86	0,77	0,77	0,77	0,78	0,85	0,66	0,51	0,48	0,49	0,53
Profilschicht	1			2			3	4		5		
OSL-Alter	-	-	-	14,8	-	16,1	18,9	-	-	-	-	-
Löss-Einheit MESZNER (2015)	I			I			I	Löss + fersiallit. Verwitterung		fersiallit. Lehm (Früh- wechsel und älter)		
Löss-Einheit LIEBEROTH (1963)	Wy2``			?			?	?		-		

In Horizont 6 zeigen sich scharf abgegrenzte, hell lessivierte bis gebleichte Zonen bis ca. 3 dm Größe neben Marmorierungen, Bleichrissen und relativ homogenen stark hydromorphen Bt-Zonen. Die Schichtindikatoren gU_q , Ti und Zr sind weiterhin im Niveau der hangenden Horizonte. Die K-, Mg-, Ca-Gehalte erreichen vergleichsweise hohe Werte bezogen auf die „reinen“ Lössschichten im Profil, d. h.

Löss ohne Fremdgesteinsanteil. Der pH-Wert fällt auf sein Minimum im Profil und liegt mit 5,1 im mäßig sauren Bereich nach AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005).

Der Horizont 7 ist eine geringer kryoturbat deformierte Zone bezogen zum Hangenden. Die Obergrenze verläuft deutlich bis scharf aber vertikal sehr unregelmäßig. Die Untergrenze ist deutlich bis diffus und verläuft horizontal wellig. Es treten nur sehr vereinzelte Kiese auf. Abgesehen hiervon sind analytisch keine Gesteinsanteile erkennbar. In Horizont 7 erfolgt ein Sprung von gU_q auf 1,7 (Tabelle 12). Zirkonium steigt auf ein für Löss mittel hohes Niveau. Das Ti/Zr-Verhältnis sinkt entsprechend und liegt im Bereich der Werte für mittelsächsischen Löss. Der Aktivitätsgrad $Fe_{o/d}$ sowie der Verwitterungsgrad Fe_{verw} sinken deutlich ab, während die Indizes Na/Al und der Verwitterungsindex für Feldspäte WI höhere Werte als im Hangenden und Liegenden zeigen.

In Horizont 8 treten Gesteinsanteile, wahrscheinlich überwiegend Granulitverwitterung, hinzu. Zudem wurden *in situ* geringe Kiesanteile festgestellt, die von tertiärem Flusskies und/oder Grundmoräne stammen können. Der im Vergleich zum Hangenden erhöhte Sandgehalt (in allen Sandfraktionen), der verringerte Zr-Gehalt und damit das erhöhte Verhältnis Ti/Zr sowie der geringe Grobschluffindex gU_q deuten auf die (Fremd-)Gesteinsanteile hin (Tabelle 11, Tabelle 12). Sand-Gehalte von > 5 M-% und damit im Bereich für reinen Löss (ohne lokalen Gesteinsanteil) sind zwar an der Nordgrenze der sächsischen Lössverbreitung teilweise vorkommend, hingegen nicht im sächsischen Hügelland (LfULG, 2024). Der weiter stark steigende Sand-Gehalt im Liegenden (Horizonte 9–12) verweist ebenfalls auf die lokalen Gesteinsanteile, die mit der Tiefe zunehmen. In Horizont 8 sind die Al-Gehalte gegenüber den hangenden Lössschichten vergleichsweise hoch, der Ton-Gehalt zeigt ähnliche Werte wie in den Horizonten 4–6, ist aber erhöht gegenüber Horizont 7. Der Aktivitätsindex $Fe_{o/d}$ sinkt auf ein typisches Niveau von C-Horizonten (BLUME & SCHWERTMANN, 1969; BULLMANN, 2010). Gleichzeitig steigen als Fersiallit⁴-Zeiger die pedogenen kristallinen Fe-Oxide und der Fe_{verw} stark an, während die Indizes für die Freisetzung von Erdalkali-/Alkalilementen aus Feldspatverwitterung (Na/Al und WI) deutlich verringert sind.

In Horizont 9 tritt der Gesteinsanteil analytisch deutlich auf. Das zeigen u.a. stark steigende Sand- und Zr-Gehalte sowie sinkende Wert für den Grobschluffindex. Das Ti/Zr-Verhältnisse steigt entsprechend an (Tabelle 11, Tabelle 12). Der Tongehalt nimmt ebenfalls deutlich zu und erreicht mit 29,1 M-% sein Maximum im Profil, ebenso wie der Al-Gehalt mit 81 mg/g. Der Lösslehmannteil von Horizont 9 ist gegenüber Horizont 8 deutlich niedriger (Schluff sinkt auf 50,7 M-%).

⁴ Böden bzw. Reste von Böden, die unter tropischen und subtropischen Klimabedingungen der Kreide und des Tertiärs gebildet wurden (Paläoböden) und hohe Gehalte an Eisen, Silizium und Aluminium enthalten.

In den Horizonten 10 bis 12 schwanken die Sand- und Schluff-Gehalte, ebenso wie die Indizes gU_q , Zr und Ti/Zr. Wahrscheinlich ist dies dem Verwitterungsgrad des Granulitsaprolits geschuldet und nicht einem schwankenden Lössanteil. Es treten geringe Grus- und Steinanteile auf. In Horizont 11 wechseln grauweiße kaolinische Nester bzw. Schichten und lehmige Partien mit Hydromorphiemarkmalen. An der Basis befindet sich eine violett-rote fersiallitische Schicht, die lehmig-sandig ist und Grus-Substrat aus Granulit enthält. Das kristalline pedogene Eisen (Fe_{d-o}) zeigt einen sprunghaften Anstieg gegenüber Horizont 9 auf sehr hohe, für Löss atypische Werte und weist damit auf Vorkommen kristalliner Eisenminerale wie Lepidokrokit hin. Zugleich sind die Werte für Fe_{verw} sehr hoch und für den Aktivitätsindex $Fe_{o/d}$ sehr gering (Tabelle 12). Die basalen Horizonten 10–12 besitzen bei Ca, Mg, K, Na die deutlich niedrigsten Gehalte des Profils. Das geht mit einer vergleichsweise geringen Kationenaustauschkapazität einher (Werte hier nicht gezeigt), die indikativ für einen hohen Anteil an Kaolin aus dem Granulitsaprolit sein kann. Titan und Zr zeigen insbesondere in den unteren Horizonten 11 und 12 erhöhte Werte (Tabelle 11). Die Indizes für die Feldspatverwitterung (Na/Al und WI) zeigen vergleichsweise geringe Werte.

6.3.3 Lithogenetische Interpretation Profil Naundorf

Die Basis des Profils bildet ein periglazär transformierter tonreicher Verwitterungslehm aus Granulit (Profilschicht 5, Tabelle 12). Der anstehende Granulit (bzw. in seiner Verwitterungsform Saprolyt) wurde bei 4,5 m Tiefe (Bohrung) nicht erreicht. Die Verwitterung des Granulites erfolgte im Zeitraum Kreide-Tertiär unter tropisch-subtropischen Bedingungen. Nachfolgende Sedimente (tertiäres Fluviatil, pleistozäne glaziale Sedimente) sind am Standort weitgehend abgetragen. Die periglaziäre Deformation und Umlagerung der saprolitisch-fersiallitischen Decke inklusive des quartären Sedimentes erfolgte mehrphasig. Vor ca. 19 ka war sie mit der Löss-Fersiallit-Solifluktion (Horizonte 8, 9) abgeschlossen. Die Horizonte 10 bis 12 (2,65 bis > 4 m) sind damit bodengeologisch als eventuell ältester Basislagen-Schichtkomplex der Region zu verstehen. Die Elementgehalte (Tabelle 11) und die Schicht-Indizes (Tabelle 12) grenzen diesen Komplex (Profilschicht 5) zum hangenden Löss ab. Die lössnahen Werte bei Zr (490–610 µg/g) und Ti (5300–6100 µg/g) können als residuale Relativanreicherung des Granulites interpretiert werden und zeigen den hohen Verwitterungsgrad an (z. B. MINGRAM, 1995). Zum Vergleich weisen gering schluffhaltige sandige Granulit-Substrate in Sachsen für Ti und Zr maximal 50 % dieser Gehalte auf (LFULG, 2024). Die niedrigen Quotienten Al/Fe der Profilschicht 5 sind, trotz des vermutlich kaolinitreichen Substrates, vom hohen Gehalt an Eisen (Fe_{d-o}) verursacht. Die geringen Werte der Verwitterungsindizes Na/Al und WI zeigen eine relative Anreicherung von Al durch Abreicherung von Alkalien/Erdalkalielementen und damit einen hohen Verwitterungsgrad der Feldspäte an.

Im Hangenden schließen die Horizonte 8 und 9 (2,00–2,65 m) als eine lithologische Einheit an (Profilschicht 4). Hier ist mit hoher Wahrscheinlichkeit ein ± hoher Lösslehmanteil enthalten. Die Textur besitzt einen homogenen Grobschluffindex (gU_q 0,8–0,9); diese Werte liegen im unteren Grenzbereich der

Lösslehme, übergehend zu den unterschiedlichen Gesteinsverwitterungsschluffen Sachsens (SINAPIUS, 2021). Das Substrat enthält Relikte vermutlich von Grundmoräne und tertiärem Flusssediment. Die geochemische Volatilität dieser Schicht ist insgesamt ein Ergebnis der solimixtiven heterogenen Vermengung von Lösslehm und fersiallitischer Verwitterung. Die Schicht stellt eine frühe Löss-Subphase mit inhärenter oder anschließender periglazialer Transformation zu Löss-Solifluktion bzw. Lössderivat dar.

Der Horizont 7 (1,65–2,00 m) bildet als Profilschicht 3 die basale Lössschicht mit sehr geringem lokalen Gesteinsanteil. Die Schichtindizes (Tabelle 12) grenzen den Horizont als eigenständige Profilschicht vom Hangenden und Liegenden ab. Die Altersdatierung zeigt gegenüber Schmorren und Krögis in Bezug zur Tiefenlage ein deutlich jüngeres Alter von $18,9 \pm 0,6$ ka (Messjahr 2025). Damit gehört diese Lössschicht bereits der Unit I nach MESZNER (2015) an. Datierungsanalytische Hinweise auf Umlagerung und damit einhergehende unsichere Datierung für den Löss sind nicht vorhanden. Eine auf die Sedimentation folgende parautochtonen Umlagerung ohne Bleichung kann aber nicht ausgeschlossen werden.

Die Horizonte 4–6 (0,46–1,65 m) bilden die Profilschicht 2 und zeigen für die Schichtindizes einheitliche, nach oben und unten abgegrenzte Wertebereiche. Die relativ homogenen Werte stehen im Widerspruch zu der heterogenen kryoturbat-mixtiven Struktur und Textur dieses Komplexes. Die engen Wertebereiche indizieren eine abgegrenzte Löss-Subphase; dies bestätigen die zeitlich nahen Löss-Alter von $16,1 \pm 0,6$ ka in Horizont 6 und $14,8 \pm 0,7$ ka in Horizont 4. Die Profilschicht 2 ist durch periglaziale Perstruktion in Subzonen untergliedert und wurde als mehrgliedrige Basislage nach KA5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005) angesprochen. Zwischen den Horizonten 5 und 6 besteht makromorphologisch eine deutliche Perstruktionsgrenze, analytisch sind jedoch nur geringe Unterschiede vorhanden. Dieser Habitus muss durch periglaziale Transformation vor der darauffolgenden Löss-Subphase entstanden sein.

Die Horizonte 1–3 (0–0,46 m) bilden die oberflächige lithologische Lösseinheit (Profilschicht 1). Der Grobschluffindex liegt bei 1,6–1,8 und nähert sich damit dem Niveau der geringer verwitterten „typischen“, an Grobschluff reichen mittelsächsischen Löse der Höhenlage 140–250 m ü. NN. Die Zr-Gehalte liegen im hohen Bereich der sächsischen Löss-Hauptlagen. Aufgrund dieser Eigenschaften und der oberflächennahen Position werden die Horizonte 1–3 der jüngsten Subphase von Lösseinheit I nach MESZNER (2015) zugeordnet (Altersdatierung liegt nicht vor).

Das Profil Naundorf stellt insgesamt ein überdurchschnittlich polygenetisch-komplexes Geoarchiv mit großer stratigrafischer Spannbreite dar. Die Genese reicht von der fersiallitischen Paläoboden-Entwicklung ab Präquartär, eventuell bereits Prätertiär, mit deren Umlagerung und dem Hangenden, einem späthochglazial beginnenden mehrgliedrigen Löss-Basislagenkomplex mit Nassböden bis zum dryaszeitlich transformierten jüngsten Löss der Hauptlage.

7 Synopsis der Profile

Die Schichten der Profile Schmorren und Krögis besitzen in den geochemischen Indizes hohe Übereinstimmungen; das Profil Naundorf zeigt dagegen einige Abweichungen. Im Vergleich der makromorphologischen Schichteinteilung gemäß KA5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005) mit der lössstratigrafischen Gliederung ergibt sich eine Divergenz der Schicht 2 mit der jüngeren Löss-IIa-Phase bei ca. 22 ka für Krögis und der Lössphase I bei ca. 15-19 ka in Naundorf. Abgesehen vom Primärlöss Schmorren, korrespondiert die Schicht 3 der Standorte Krögis und Naundorf beim Feldspat-Verwitterungsindex WI sehr deutlich (Tabelle 13). Die Altersunterschiede der älteren Lösseinheit IIa (Krögis und Schmorren) zur Einheit IIb (Schmorren) sind relativ gering. Nach MESZNER (2015) spricht eine kontinuierliche Altersentwicklung in die Tiefe für äolische Sedimente, während größere Altersschwankungen Umlagerung indizieren.

Die chronostratigrafische Einordnungen durch die OSL-Datierungen des Basislagen-Lösses (Einheit IIa) ergaben eine Alterstellung für Schmorren von ca. 21,5 ka sowie breiter aufgefächerte Alter für Krögis von 21,5–24,9 ka. Die Krögis-Alter zeigen hierbei für die basale atypische LFZ ca. 2 ka Differenz zum hangenden jüngeren typischen LFZ-Löss. Getrennt werden diese Subphasen durch einen Nassboden. Der Kalk-Löss in Profil Schmorren ist mit ca. 26,6–27,0 ka datiert und entspricht damit der Lösseinheit IIb nach MESZNER (2015). Die darüberliegende entkalke Zone von Lösseinheit IIb (Horizont 6) zeigt ein Alter von 25,3 ka. Damit liegt sie im Grenzbereich zur Einheit IIa und wird durch einen fossilen Nassbodenhorizont (Horizont 5) nach oben abgegrenzt.

Die Profile Schmorren, Krögis und Naundorf zeigen insgesamt sehr verschiedene Lössphänomene und Pedogenesen. Ein sehr komplexer Lösslehm-Saprolit-Basislagenkomplex mit fersiallitischer Basis ist in Profil Naundorf entwickelt. Das Profil Krögis besitzt eine sehr mächtige LFZ mit periglaziär differenzierteren Subzonen. Diese Abfolge könnte man ebenfalls als Basislagenkomplex bezeichnen, zumindest den oberen stärker periglaziär transformierten Abschnitt. Das Profil Schmorren enthält eine ein- bis zweigliedrige Basislage über verwittertem autochthonem Löss. Dieser leitet zu gering verwittertem diagenetischem Kalk-Löss über. Ein gemeinsames Merkmal ist die in allen drei Profilen vorhandene, analytisch nachvollziehbare Deckschichtengliederung Hauptlage-Mittellage-Basislage. Die Mittellage vermittelt zwischen den Hauptschichten und ist volatil bei der lithologischen Einordnung. In Krögis gehört sie zu Schicht 1 (Lösseinheit I), in Naundorf zu Schicht 2 (ebenfalls Lösseinheit I). Die Hauptlage und der mehrgliedrige Basislagenkomplex besitzen eine von den Löss-Einheiten geochemisch geprägte Signatur. Es treten spezifische boden- und geochemische Werte für Grobschluffanteile sowie Elementtotalgehalte auf, die in spezifischen Wertebereichen der getesteten Schichtindizes resultieren.

Tabelle 13: Zusammenfassung ausgewählter Schichtindizes der Profile Schmorren, Krögis und Naundorf als Mittelwerte der Horizontergebnisse je Schicht

Lösseinheit, Alter	untere Hori- zont- tiefe [m]	Schicht	Index	Index-Mittelwert			Horizonte		
				Schmor- ren	Krögis	Naun- dorf	Schmorren	Krögis	Naundorf
I ≤ 15 ka	ca. 0,5	1	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI	2,1 3,0 7,9 1,03	2,1 3,1 8,1 0,96	1,7 4,0 8,8 0,83	1–2 (Ap, rAp)	1–3 (Ap, rAp, Sw-Bt+Al)	1–3 (Ap, rAp, Bt+Ael-Sw)
I ca. 15–16 ka	1,7	2	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI			1,0 4,9 10,9 0,77			4–6 (Ael+Bt-Sw, Bt-Sd, Sd)
I ca. 19 ka	2,0	3	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI			1,7 3,3 9,6 0,85			7 (Sd)
IIa ca. 22 ka	ca. 1,5–2,5	2	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI	2,2 5,9 8,7 0,80	2,2 4,9 8,9 0,84		3–5 (Bht, Sw-Bht+Bvt, Bht+Bt-Swd)	4–7 (Sw-Bt, Swd- Bt, Sw-Bt- ilCv, Bt-ilCv)	
IIa ca. 24 ka	> 4	3	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI		2,1 4,3 8,9 0,87			8–9 (Bt-ilCv, ilCv)	
IIb ca. 25 ka	ca. 2,0	3	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI	4,3 4,2 7,8 0,94			6 (fSw-ilCv)		
IIb ca. 26–27 ka	> 5	3	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI	3,8 3,1 7,7 0,94			7 (fSw-elCcv, elCcv)		
-	2,7	4	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI			0,9 6,7 12,3 0,58			8–9 (Bt-Sd, Sd)
-	> 4	5	gU _q Fe _{verw} Ti/Zr WI			1,2 13,4 11,0 0,50			10–12 (Sd, fSwd, fSd)

Die geochemische Zusammensetzung der Lössse kann nur durch eine komplexe Edukt-Zusammensetzung erklärt werden. Der stark überwiegende Hauptanteil des Lösses entstammt einem überregionalen Liefergebiet, da der deutliche CaCO₃-Gehalt der Lössseinheit IIb nicht sächsischen Ursprungs sein kann. Die an Schluff reichen sächsischen Basislagen besitzen für die Spurenelemente eine vom Löss stark abweichende Signatur mit hoher Volatilität.

Auf Grundlage der der Lithologie und Chronostratigrafie kann für die mittelsächsischen Lössse ein konsistentes Modell der Bodengeografie abgeleitet werden. Die unterschiedlichen Lössfazies sind in Abhängigkeit der Höhenstufe des Hügellandes vorkommend. Die Basislage im Löss ist als mehrgliedriger Basislagen-Komplex ausgebildet. Der Basislagen-Komplex und zum Teil die stratigrafisch indifferente Mittellage entstammen den Lössphasen I bis IIa. Sowohl sekundär, aber auch inhärent, siehe Krögis, erfuhren sie eine polygenetische Verwitterung, Perstruktion und Deckschichtengenese. Die lithologischen Eigenschaften des Lösses änderten sich signifikant. Die periglaziären Transformationen des Lösses haben eine prägende genetische Bedeutung für die rezenten natürlichen bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (HRSG.) (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5 (5. Auflage). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 5. Auflage, Hannover.
- ALTERMANN, M., JÄGER, K.-D., KOPP, D., KOWALKOWSKI, A., KÜHN, D., & SCHWANECKE, W. (2008). Zur Kennzeichnung und Gliederung von periglaziär bedingten Differenzierungen in der Pedosphäre. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 6, 5–42.
- BARTH, N., FORBERG, H., & SINAPIUS, R. (2020). Boden-Dauerbeobachtungsprogramm des LfULG Sachsen. Standortcharakteristika (366 Seiten) [Digitale Broschüre]. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- BLUME, H. P., & SCHWERTMANN, U. (1969). Genetic Evaluation of Profile Distribution of Aluminium, Iron, and Manganese Oxides. *Soil Science Society of America Journal*, 33(3), 438–444. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300030030x>
- BUGGLE, B., GLASER, B., HAMBACH, U., GERASIMENKO, N., & MARKOVIĆ, S. (2011). An evaluation of geochemical weathering indices in loess–paleosol studies. *Quaternary International*, 240(1), 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.07.019>
- BULLMANN, H. (2010). Eigenschaften und Genese periglazialer Deckschichten auf Carbonatgesteinen des Muschelkalks in einem Teilgebiet der ostthüringischen Triaslandschaft. Dissertation Universität Leipzig. <https://core.ac.uk/download/pdf/226098565.pdf>
- CLARKE, F. W., & WASHINGTON, H. S. (1924). The Composition of the Earth's Crust. U.S. Government Printing Office, Washington.
- DIN ISO 11277 (2022). Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. Beuth Verlag GmbH, Berlin. <https://doi.org/10.31030/9283499>
- GEOLITHO STIFTUNG GEMEINNÜTZIGE GMBH (2024). *Mineralienatlas*. Abgerufen am 18. November 2024 von <https://www.mineralienatlas.de/index.php?action=lexSearch>
- GEOSEN (HRSG.) (o. J.). Digitale Topographische Karten. Abgerufen am 6. Juni 2025 von <https://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-dtk-einzellayer-4815.html>
- GEOSEN (HRSG.) (1997). GK25 Blätter Sachsen. Karte und Erläuterungen.
- GEOSEN (HRSG.) (2023). Digitales Geländemodell DGM1. Downloadbereich Digitale Höhenmodelle. Abgerufen am 1. März 2023 von <https://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-digitale-hoehenmodelle-4851.html>
- GEOSEN (HRSG.) (2024). Bodenschätzung Sachsen. Stand 2024, verfügbar über <https://luis.sachsen.de/boden/bodenschaetzung.html>

- GÜNSTER, N., ECK, P., SKOWRONEK, A., & ZÖLLER, L. (2001). Late Pleistocene loess and their paleosols in the Granada Basin, Southern Spain. *Quaternary International*, 76–77, 241–245. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(00\)00106-3](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(00)00106-3)
- HEINRICH, S. (2024). Analyse und Interpretation von Dünnschliffen. BDF 25: Krögis (29 Seiten). Unveröffentlichter Bericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- KIRSTEN, F., STARKE, J., BAURIEGEL, A., MÜLLER, R., JOUAUX, J., LÜTHGENS, C., SINAPIUS, R., & HARDT, J. (2024). Age, composition and spatial distribution of sandy loess in north-eastern Germany (Fläming, Brandenburg). *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(11), 3261–3282. <https://doi.org/10.1002/esp.5885>
- KÜHN, P. (2003). Spätglaziale und holozäne Lessivégenese auf jungweichselzeitlichen Sedimenten Deutschlands. *Greifswalder Geologische Arbeiten*, 28, 205 Seiten. Ernst-Moritz-Arndt-Universität, Greifswald.
- LFULG (2020). BK50 Sachsen. Bodenkarte 1:50000 des Freistaates Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.). <https://luis.sachsen.de/boden/bk50.html>
- LFULG (2024). FIS Boden. Bodendatenbank des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- LIEBEROTH, I. (1959). Beobachtungen im nordsächsischen Lößgebiet. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 86(2), 141–155. <https://doi.org/10.1002/jpln.19590860207>
- LIEBEROTH, I. (1963). Lößsedimentation und Bodenbildung während des Pleistozäns in Sachsen. *Zeitschrift Geologie*, 12(2), 149–187.
- LÜTHGENS, C. (2011). The age of Weichselian main ice marginal positions in north-eastern Germany inferred from Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating. Dissertation Freie Universität Berlin. <https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/4354>
- MANNSFELD, K. (2008). Naturräume in Sachsen. Deutsche Akademie für Landeskunde, Selbstverlag, Leipzig.
- MEHRA, O. P., & JACKSON, M. L. (1958). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay and Clay Minerals*, 7, 317–327.
- MESZNER, S. (2015). Loess from Saxony. Dissertation TU Dresden. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-209462>
- MINGRAM, B. (1995). Geochemische Signaturen der Metasedimente des erzgebirgischen Krustenstapels. *Scientific Technical Report STR 9604*. Geoforschungszentrum Potsdam.
- OKRUSCH, M., & MATTHES, S. (2010). Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde (8. Auflage). Springer, Berlin, Heidelberg.
- PÄLCHEN, W., & WALTER, H. (2008). Geologie von Sachsen. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

- PIRRUNG, M., LÜTZNER, H., BAUER, A., ENEGELHARDT, J., GAUPP, R., MERTEN, D., PUDLO, D., TOTSCHE, K., VIERECK, L., & VOIGT, T. (2020). Anorganische Sedimentgeochemie im Einzugsgebiet der Thüringer Saale in den letzten ca. 600 Ma. *Beitr. Geol. Thüringen NF*, 26, 51–104.
- RUHLAND, C. (2019). Entwicklung mineralogischer und pedogener Proxies in Permafrostböden zur Beschreibung pleistozäner Umwelt- und Klimaveränderungen. Dissertation Universität Hamburg. <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/handle/ediss/8288>
- SAUER, D., KADEREIT, A., KÜHN, P., KÖSEL, M., MILLER, C. E., SHINONAGA, T., KREUTZER, S., HERRMANN, L., FLECK, W., STARKOVICH, B. M., & STAHR, K. (2016). The loess-palaeosol sequence of Datthausen, SW Germany: Characteristics, chronology, and implications for the use of the Lohne Soil as a marker soil. *CATENA*, 146, 10–29. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.024>
- SCHWERTMANN, U. (1964). Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 105(3), 194–202. <https://doi.org/10.1002/jpln.3591050303>
- SINAPIUS, R. (2021). Diagnostische Korngrößenverhältnisse? Löss, Lössderivate, Gesteinsverwitterungen in Sachsen. Unveröffentlichter Vortrag vom 15. November 2021 im Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Referat 42, Freiberg.
- SINAPIUS, R., GELLNER, L., & SCHNEIDER, R. (2023). Wiederholte Probenahme BDF 2022. Teil Acker-BDF. Unveröffentlichter Abschlussbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- SINAPIUS, R., KUNTH, F., & HIEKE, F. (2017). Abschlussbericht zum Werkvertrag Wiederholte Probenahme BDF 2017. Unveröffentlichter Abschlussbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- SPOSITO, G. (1998). *Bodenchemie*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- WEISE, O. R. (1983). Das Periglazial: Geomorphologie und Klima in gletscherfreien, kalten Regionen. Gebr. Borntraeger, Stuttgart.
- ZECH, W., & WILKE, B.-M. (1977). Vorläufige Ergebnisse einer Bodenchronosequenzstudie im Zillertal. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 25, 571–586.
- ZÖLLER, L., & NEHRING, F. (2002). Solifluktions-, Löss- und Bodenbildungszyklen seit dem letzten Interglazial im Niederwesterwald. *Berichte zur deutschen Landeskunde*, 76(2/3), Article 2/3.

Anhang

A 1 Ergebnisse der OSL-Datierung von neun Lössproben

Die Lumineszenz-Altersdatierung (OSL) wurde von Alexander Fülling, Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften, Arbeitsgruppe Sedimentologie und Quartärforschung an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg durchgeführt. Die Probenahme erfolgte im Rahmen der Wiederholten Beprobung der Boden-Dauerbeobachtungsflächen des LfULG (SINAPIUS et al., 2023). Die Altersdatierung der Proben aus Krögis und Schmorren fand in 2024 statt, die Analyse für die Proben aus Naundorf im Jahr 2025.

A 1.1 Probenaufbereitung und Messung

Die Probenzylinder wurden im Dunkellabor geöffnet und Probenmaterial aus der Mitte der Zylinder für die Lumineszenz-Datierung entnommen. Alle Arbeitsschritte wurden bei gedimmtem Rotlicht durchgeführt. Nach Nasssiebung (100 µm-Sieb) wurde aus der Fraktion < 100 µm mit 20 %-iger Salzsäure das Karbonat gelöst und die organische Substanz mit 15 %-igem Wasserstoffperoxid zerstört. Die gespülten Proben wurden in Bechergläsern mit Natriumoxalat dispergiert und mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Entsprechend der Füllhöhe wurde in mehreren Schritten über die Absetzzeiten die Korngrößenfraktion 4–11 µm angereichert. Diese Korngrößenfraktion wurde für die Lumineszenzdatierung genutzt (sog. Feinkornmethode), wobei sowohl die polymineralische Feinkornfraktion ohne weitere Aufbereitungsschritte als auch die Quarz-Feinkornfraktion verwendet wurden. Um die Quarz-Feinkornfraktion zu erhalten wurde jeweils ein Teil der polymineralischen Feinkornprobe für eine Woche in 35 %-iger Hexafluorokieselsäure behandelt. Aus den so erhaltenen Feinkornpräparaten wurden Suspensionen hergestellt und diese auf Probenträger (Stahlscheibchen von 10 mm Durchmesser) pipettiert.

Die Quarz-Feinkornproben wurden mit einem SAR-Protokoll nach MURRAY & WINTLE (2000) in Anlehnung an das Vorgehen von KREUTZER et al. (2012) gemessen, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten. Auch bei der Auswertung wurden vergleichbare Parameter gewählt (a -Wert $0,036 \pm 0,003$, einheitlicher Wassergehalt von $20 \pm 5\%$). Zur Kontrolle wurde außerdem die polymineralische Feinkornfraktion mit einem post-IRIRSL-SAR-Protokoll nach BUYLAERT et al. (2009) gemessen, wobei nach der Stimulation des konventionellen IR-Signals bei 50°C (IR_{50}) ein zweites IR-Signal bei 225°C (pIR_{225}) gemessen wird. Dieses Hochtemperatur-Signal ist im Vergleich zum IR-Signal bei 50°C stabiler, sodass der für Feldspat typische anomale Signalverlust (Signalverlust während der Dunkellagerung ohne optische Stimulation) eine geringere Rolle spielt. Daher neigen die pIR_{225} -Alter weniger stark zur Unterschätzung des wahren Sedimentationsalters.

Des Weiteren wurden die polymineralischen Feinkornproben des Profils BDF25 mit einem multi-elevated-temperature post-IR-IRSL-Protokoll (MET-pIRIR) nach LI & LI (2011) gemessen. Hier werden nach Stimulation bei 50°C vier post-IR-IRSL-Signale bei 100, 150, 200 und 250°C gemessen. Dabei werden

sukzessive instabile Signalkomponenten ausgeleuchtet, sodass ab 200 °C anomaler Signalverlust keine Rolle mehr spielt. Ausgewertet wurde hier lediglich das MET-post-IR-IRSL-Signal bei 200 °C.

Zur Feststellung der optimalen Messparameter (Vorheiztemperaturen) wurden an der Quarzprobe von BDF 59-2 Dose-recovery-Tests durchgeführt.

Zur Bestimmung der Dosisleistung wurde belichtetes Probenmaterial aus den Beuteln entnommen, getrocknet, homogenisiert und in dicht schließende Kunststoffbehälter gefüllt (ca. 150 g pro Probe). Nach einer Ruhezeit von vier Wochen wurden mit einem HPGeGammaspektrometer (Ortec) die Gehalte an den primordialen Radionukliden Uran (^{238}U), Thorium (^{232}Th) und Kalium (^{40}K) gemessen. Der Beitrag der kosmischen Strahlung zur Gesamtdosisleistung (D_0) wurde in Abhängigkeit von der geographischen Position, der Entnahmetiefe und der Höhenlage abgeschätzt.

A 1.2 Technische Daten zur Messung (Lumineszenz-Methoden)

Material: Quarz-Feinkorn, 4–11 µm und polymineralisches Feinkorn, 4–11 µm.

Quarz-Feinkorn: Single Aliquot Regenerativ (SAR) nach Murray & Wintle (2000).

Polymineralisches Feinkorn: Single Aliquot Regenerativ (SAR) nach Buylaert et al. (2009), Li & Li (2011).

Messgerät: Lexsyg luminescence measurement system (Freiberg Instruments), Sr-90 Betaquelle: $0,108 \pm 0,001 \text{ Gy/s}$.

Software: Luminescence Analyst 4.57, Adele v2017

Messparameter:

- Quarz-Feinkorn: Vorheizen bei 220 °C, 10 s; Testdosis-Cutheat bei 180 °C, 0 s. Stimulation bei 125 °C, 40 s (grüne Diode mit max. Emission bei 525 nm, 90 mW/cm²); Detektion: nahes UV zentriert auf 380 nm (Schott BG3/Delta-BP 365/50 EX Interferenz-Filter-Kombination)
- Polyminalisches Feinkorn (pIR225): Vorheizen bei 250 °C, 60 s; Stimulation bei 50 °C/225 °C, je 100 s (IR-LD bei 850 nm, 300 mW/cm²); Detektion: blau bei 410 nm (Schott BG39 AHFBrightLine HC 414/46 Interferenz-Filter-Kombination)
- Polyminalisches Feinkorn (MET-pIRIR): Vorheizen bei 270 °C, 60 s; Stimulation bei 50 °C/100 °C/150 °C/200 °C/250 °C, je 100 s (IR-LD bei 850 nm, 300 mW/cm²); Detektion: blau bei 410 nm (Schott BG39 AHF-BrightLine HC 414/46 Interferenz-Filter-Kombination)

A 1.3 Ergebnisse

Die Analysenergebnisse inklusive aller Messparameter sind zusammengefasst in Tabelle A 1 dargestellt.

Tabelle A 1: Dosimetrie, Äquivalentdosis und Lumineszenz-Alter

Probe	Tiefe [cm]	Uran [ppm] ^{a)}	Thorium [ppm] ^{a)}	Kalium [ppm] ^{a)}	Kosmische Dosisleistung [Gy/ka] ^{b)}	Wassergehalt gemessen [%] ^{c)}	Wassergehalt geschätzt [%] ^{c)}	Methode	Dosisleistung D ₀ [Gy/ka] ^{d)}	Äquivalentdosis D _e [Gy] ^{e)}	Overdispersion OD [%] ^{e)}	OSL-/IRSL-Alter [ka] ^{f)}
BDF25-1	100	3,35 ± 0,13	12,5 ± 0,7	2,03 ± 0,05	0,19 ± 0,02	16,1	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225: MET200:	3,74 ± 0,12 4,31 ± 0,27 4,68 ± 0,28 4,68 ± 0,39	84,27 ± 1,35 80,34 ± 0,81 99,25 ± 1,13 107,69 ± 6,32	0,0 0,0 0,0 9,4	22,5 ± 0,7 18,6 ± 1,2 21,2 ± 1,3 23,0 ± 1,9
BDF25-2	140	3,3 ± 0,18	11,48 ± 0,65	1,96 ± 0,05	0,18 ± 0,02	15,0	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225: MET200:	3,58 ± 0,11 4,13 ± 0,26 4,48 ± 0,27 4,48 ± 0,28	77,81 ± 1,20 72,80 ± 0,72 91,84 ± 1,06 95,33 ± 2,02	0,0 0,0 0,0 0,0	21,7 ± 0,7 17,6 ± 1,1 20,5 ± 1,2 21,3 ± 1,3
BDF25-3	230	3,38 ± 0,19	12,0 ± 0,69	2,02 ± 0,05	0,16 ± 0,02	15,9	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225: MET200:	3,67 ± 0,12 4,23 ± 0,27 4,59 ± 0,27 4,59 ± 0,4	78,82 ± 1,25 69,47 ± 0,69 87,84 ± 0,98 95,95 ± 6,23	0,0 0,0 0,0 10,7	21,5 ± 0,7 16,4 ± 1,0 19,1 ± 1,1 20,9 ± 1,8
BDF25-4	290	3,44 ± 0,17	12,24 ± 0,75	1,62 ± 0,04	0,15 ± 0,02	15,9	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225: MET200:	3,37 ± 0,11 3,94 ± 0,27 4,31 ± 0,27 4,31 ± 0,29	83,76 ± 1,29 75,61 ± 0,77 93,79 ± 1,07 102,41 ± 2,67	0,0 0,0 0,0 1,6	24,9 ± 0,8 19,2 ± 1,3 21,8 ± 1,4 23,8 ± 1,6
BDF25-5	350	3,51 ± 0,16	12,61 ± 0,62	1,91 ± 0,05	0,14 ± 0,01	16,2	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225: MET200:	3,64 ± 0,15 4,23 ± 0,28 4,61 ± 0,28 4,61 ± 0,39	85,76 ± 2,53 78,55 ± 1,33 95,26 ± 1,10 107,69 ± 6,32	6,2 3,6 0,0 9,4	23,5 ± 0,9 18,6 ± 1,2 20,7 ± 1,3 23,4 ± 2,0
BDF59-1	135	3,2 ± 0,18	11,7 ± 0,73	1,91 ± 0,05	0,18 ± 0,02	18,4	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225:	3,52 ± 0,13 4,06 ± 0,26 4,41 ± 0,27	75,55 ± 1,65 70,23 ± 0,69 89,08 ± 1,14	4,1 0,0 1,6	21,5 ± 0,8 17,3 ± 1,1 20,2 ± 1,2
BDF59-2	180	3,22 ± 0,15	11,55 ± 0,72	1,84 ± 0,05	0,17 ± 0,02	11,7	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225:	3,45 ± 0,11 3,99 ± 0,26 4,34 ± 0,26	87,13 ± 1,24 74,67 ± 0,77 97,78 ± 1,16	0,0 0,0 0,7	25,3 ± 0,8 18,7 ± 1,2 22,6 ± 1,4
BDF59-3	205	3,06 ± 0,17	10,64 ± 0,68	1,65 ± 0,04	0,16 ± 0,02	10,5	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225:	3,18 ± 0,10 3,68 ± 0,24 4,01 ± 0,25	85,74 ± 1,23 73,65 ± 0,76 94,87 ± 1,10	0,0 0,0 0,0	27,0 ± 0,9 20,0 ± 1,3 23,7 ± 1,5
BDF59-4	275	2,94 ± 0,17	10,43 ± 0,67	1,66 ± 0,04	0,15 ± 0,02	9,4	20 ± 5	OSL: IR50: pIR225:	3,12 ± 0,1 3,62 ± 0,23 3,93 ± 0,24	82,02 ± 1,46 73,46 ± 0,76 90,67 ± 1,14	2,5 0,0 1,4	26,2 ± 0,9 20,3 ± 1,3 23,1 ± 1,4

Fortsetzung Tabelle A 1

Probe	Tiefe [cm]	Uran [ppm] ^{a)}	Thorium [ppm] ^{a)}	Kalium [ppm] ^{a)}	Kosmische Dosisleistung [Gy/ka] ^{b)}	Wassergehalt gemessen [%] ^{c)}	Wassergehalt geschätzt [%] ^{c)}	Methode	Dosisleistung D_0 [Gy/ka] ^{d)}	Äquivalentdosis D_e [Gy] ^{e)}	Overdispersion OD [%] ^{e)}	OSL-/IRSL-Alter [ka] ^{f)}
BDF29-1	90	$3,59 \pm 0,20$	$12,35 \pm 0,81$	$2,35 \pm 0,06$	$0,19 \pm 0,02$	22,7	24 ± 5	OSL: MET200:	$3,91 \pm 0,18$ $4,84 \pm 0,28$	$57,76 \pm 2,08$ $72,78 \pm 1,09$	8,2 0,0	$14,8 \pm 0,7$ $15,0 \pm 0,9$
BDF29-2	130	$3,34 \pm 0,17$	$11,80 \pm 0,79$	$2,23 \pm 0,06$	$0,18 \pm 0,02$	24,1	24 ± 5	OSL: MET200:	$3,70 \pm 0,14$ $4,57 \pm 0,27$	$59,68 \pm 1,47$ $73,83 \pm 1,14$	3,7 0,0	$16,1 \pm 0,6$ $16,1 \pm 0,9$
BDF29-3	180	$3,35 \pm 0,17$	$11,54 \pm 0,76$	$2,09 \pm 0,06$	$0,17 \pm 0,02$	20,7	24 ± 5	OSL: MET200:	$3,56 \pm 0,12$ $4,42 \pm 0,26$	$67,09 \pm 1,14$ $84,80 \pm 1,25$	0,8 0,0	$18,9 \pm 0,6$ $19,2 \pm 1,1$

Legende zu Tabelle A1:

- a) Die Gehalte der Radionuklide Uran-238, Thorium-232 und Kalium-40 wurden im Lumineszenzlabor der Uni Freiburg gammaspektrometrisch bestimmt (ReinstgermaniumDetektor, Ortec). Dabei wurden folgende Tochternuclide berücksichtigt:
U-238: Pb-214 und Bi-214 für Ra-226.
Th-232: Ac-228 für Ra-228, Pb-212 und Tl-208 für Th-228.
K-40: direkt.
- b) Die kosmische Dosisleistung wurde abgeschätzt unter Berücksichtigung der geographischen Position, der Höhe über dem Meer und der Entnahmetiefe der Probe.
- c) Wassergehalt gemessen: bezogen auf das Trockengewicht nach mindestens 3-tägiger Ofentrocknung bei 50 °C. Zur Berechnung der Dosisleistung wurde der geschätzte Wassergehalt verwendet.
- d) OSL = Feinkorn, Quarz (4–11 µm).
IR50 = Feinkorn, polymineralisch (4–11 µm), IR-Signal bei 50 °C.
pIR225 = Feinkorn, polymineralisch (4–11 µm),
post-IR-IRSL-Signal bei 225°C.
MET200 = Feinkorn, polymineralisch (4 - 11 µm),
MET-post-IR-IRSL-Signal bei 200°C.
Folgende a-Werte (Alphaeffektivitätsfaktoren) wurden angenommen: Q: $0,036 \pm 0,003$ (Kreutzer et al. 2012), IR50: $0,08 \pm 0,02$ (Rees-Jones 1995), pIR225 und MET200: $0,11 \pm 0,02$ (Kreutzer et al. 2014). Interner Kaliumgehalt: $12,5 \pm 0,5\%$ (HUNTLEY et al. 1997).
- e) Die Äquivalentdosen (\pm Standardfehler) wurden mit dem Central Age Model (CAM) berechnet (GALBRAITH et al. 1999). Die Overdispersion (Überstreuung) ist der relative Fehler, der zusätzlich zum erwarteten (systematischen und zufälligen) Fehler auftritt.
Es wurden 7 Aliquote pro Probe gemessen (MET200: 3 Aliquote pro Probe), alle Aliquote erfüllten folgende Qualitätskriterien: Recycling ratio zwischen 0,9 und 1,1, Recuperation < 10 %, bei Quarz zusätzlich OSL IR depletion ratio > 0,9.
- f) Die Lumineszenz-Alter sind in Kilojahren [ka] angegeben und beziehen sich auf das Messjahr (2024 für BDF25 Krögis und BDF59 Schmorren, 2025 für BDF29 Naundorf).

A 1.4 Diskussion und Ergebnisse

Die Quarz-Feinkornproben zeigen hervorragende Messeigenschaften und die Äquivalentdosisverteilungen sind sehr eng, wie es für Feinkornproben auch zu erwarten ist. Ähnliches gilt für die polymineralischen Feinkornproben. Erwartungsgemäß unterschätzen die IR50-Alter die Quarzalter deutlich, die pIR225-Alter kommen näher an die Quarz-Alter heran, zum Teil überlappen sich die Alter innerhalb der

Fehlertgrenzen sogar. Die MET200 Alter stimmen innerhalb der Fehlertgrenzen sogar alle mit den Quarzaltern überein.

Für die stratigraphische Interpretation sind die Quarzalter zu bevorzugen, hier sind keine methodischen Probleme (z. B. anomaler Signalverlust) zu erwarten. Die Quarzalter sollten die wahren Sedimentationsalter gut repräsentieren. Allerdings muss beachtet werden, dass ein einheitlicher Wassergehalt angenommen wurde, was den realen Bedingungen möglicherweise nicht entspricht.

A 1.5 Literatur

- BUYLAERT, J.P., MURRAY, A.S., THOMSEN, K.J., JAIN, M. (2009). Testing the potential of an elevated temperature IRSL signal from K-feldspar. *Radiation Measurements* 44. 560–565.
- GALBRAITH, R.F., ROBERTS, R.G., LASLETT, G.M., YOSHIDA, H., OLLEY, J.M. (1999). Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium Rock Shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models. *Archaeometry* 41. 339–364.
- HUNTLEY, D.J. & BARIL, M.R. (1997). The K content of the K-feldspars being measured in optical dating or in thermoluminescence dating. *Ancient TL* 15, 1. 11–13.
- LI, B. & LI, S-H. (2011). Luminescence dating of K-feldspar from sediments: A protocol without anomalous fading correction. *Quaternary Geochronology* 6. 468–479.
- KREUTZER, S., FUCHS, M., MESZNER, S., FAUST, D. (2012). OSL chronostratigraphy of a loess-palaeosol sequence in Saxony/Germany using quartz of different grain sizes. *Quaternary Geochronology* 69. 102–109.
- KREUTZER, S., SCHMIDT, CH., DEWITT, R., FUCHS, M. (2014). The α -value of polymimetal fine grain samples measured with the post-IR IRSL protocol. *Radiation Measurements* 69. 18–29.
- MURRAY, A.S. & WINTLE, A.G. (2000). Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32. 57–73.
- REES-JONES, J. (1995). Optical dating of young sediments using fine-grain quartz. *Ancient TL* 13. 9–14.

A 2 Analyse und Interpretation von Dünnschliffen der BDF 25 Krögis

Zur Analyse von mikromorphologischen Eigenschaften der Lössschichten wurden am Standort Krögis im Rahmen der Wiederholten Beprobung der Boden-Dauerbeobachtungsflächen des LfULG (SINAPIUS et al., 2023) Proben auf Aluminiumschienen entnommen. Die Proben wurden durch M. Köhler (MKFactory) für die Dünnschliffanalyse präpariert. Die Untersuchung und Interpretation der Dünnschliffe erfolgte durch Susann Heinrich im Rahmen eines Werkvertrags. Im Folgenden ist der Bericht zu den mikromorphologischen Untersuchungen von Susann Heinrich eingefügt (HEINRICH, 2024).

Bericht „Analyse und Interpretation von Dünnschliffen, BDF 25: Krögis“:

A 2.1 Fragestellung

Ziel ist die Beschreibung der Sedimenteigenschaften mit besonderem Fokus auf die Ausprägung der „Lamellen“ mit Toneinschlammungen und „Zwischenlamellen“ als tonärmere Bereiche zwischen den Lamellen. Es sollen die Fragen geklärt werden:

- Gibt es Hinweise auf (1) schichtungsbedingte Tonanreicherungen, (2) Sedimenteigenschaften, die zu mechanischen Barrieren führen, die eine „Tonfilterung“ bei der Verlagerung bewirkten?
- Sind Erklärungen für die Entstehung solcher fleckenhaften und bänderförmigen Tonanreicherungen aus den mikromorphologischen Befunden ableitbar?
- Durch welche Prozesse sind die Sedimente pedogen überformt?
- Lässt sich eine zeitliche Abfolge der pedogenen Prozesse aus den Befunden ableiten?

A 2.2 Probenahme und Methoden

Für die Anfertigung von Dünnschliffen wurden mit Hilfe von Aluminiumschienen ungestörte, orientierte Proben entnommen. Die Lage der Proben im Profil ist in Abbildung A 1 dargestellt. Die Probennummern sind aufsteigend von tieferen zu höheren Schichten zugeordnet: Probe 1 in 295–305 cm, Probe 2 in 255–265 cm, Probe 3 in 195–205 cm, und Probe 4 in 120–130 cm Tiefe.

Die Präparation der Proben wurde durch M. Köhler (MKFactory) ausgeführt. Die Untersuchung und Beschreibung der Dünnschliffe erfolgte mit Hilfe eines Polarisationsmikroskops (Bresser Science MPO 401, Vergrößerungen: 25-fach bis 400-fach) überwiegend nach BULLOCK et al. (1985) und STOOPS (2003). Für die Fotodokumentation wurden die Kamera Bresser MikroCam II 20 MP 1“ sowie die Image Analysis Software Bresser MicroCamLabII genutzt. Die Präparate wurden mit polarisiertem Durchlicht analysiert. Die verwendeten Lichtarten sind im folgenden Text meist abgekürzt: PPL (plain polarized light, linear polarisiertes Licht) und XPL (crossed polarized light, gekreuzte Polarisatoren).

Die mikromorphologische Nomenklatur ist meist nicht ohne Kenntnisse der Methode verständlich. Daher wurde zugunsten der besseren Lesbarkeit und des einfacheren Verständnisses ohne oder mit nur

wenig Erfahrung im Bereich der Dünnschliffmikroskopie in der Regel auf die methodenspezifische Nomenklatur verzichtet. Stattdessen erfolgt eine Beschreibung der Merkmale mit allgemeinverständlichen Begriffen.



Abbildung A 1: Skizze der Entnahmepunkte der Proben 1 bis 4 (Foto: R. Sinapius, verändert)

A 2.3 Beschreibung der Dünnschliffe

A 2.3.1 Probe 4 – Entnahmetiefe 120–130 cm

Der Scan des Dünnschliffs (Abbildung A 2) zeigt sehr feines, überwiegend dicht gelagertes Material ohne Aggregierung. Das Substrat erscheint in den meisten Schliffbereichen waagerecht leicht braun gebändert, wobei die Bänderung zum Teil wellig verläuft und diskontinuierlich auftritt. Besonders auffällig ist eine große senkrechte Struktur, die sich durch den gesamten Dünnschliff zieht. Es handelt sich um einen recht kontinuierlich mit Material verfüllten ca. 2 cm breiten Gang. Die senkrechten Ränder der

Struktur lassen sich durch die dort bevorzugt auftretenden biogenen Hohlräume und die Eisenoxidausfällungen entlang der Ränder verfolgen. Die waagerechte, braune Bänderung zieht über den verfüllten Gang hinweg, die Bänder setzen sich im Verfüllungsmaterial fort. Vereinzelt zeigen die Bänder eine nach unten gerichtete Verkrümmung innerhalb des Gangs, die Bänderung ist aber nicht unterbrochen. Entlang der Hohlräume an den Rändern der Struktur ist Ton verlagert worden, der besonders in der unteren Schliffhälfte den Rand mit seiner Färbung braun nachzeichnet.

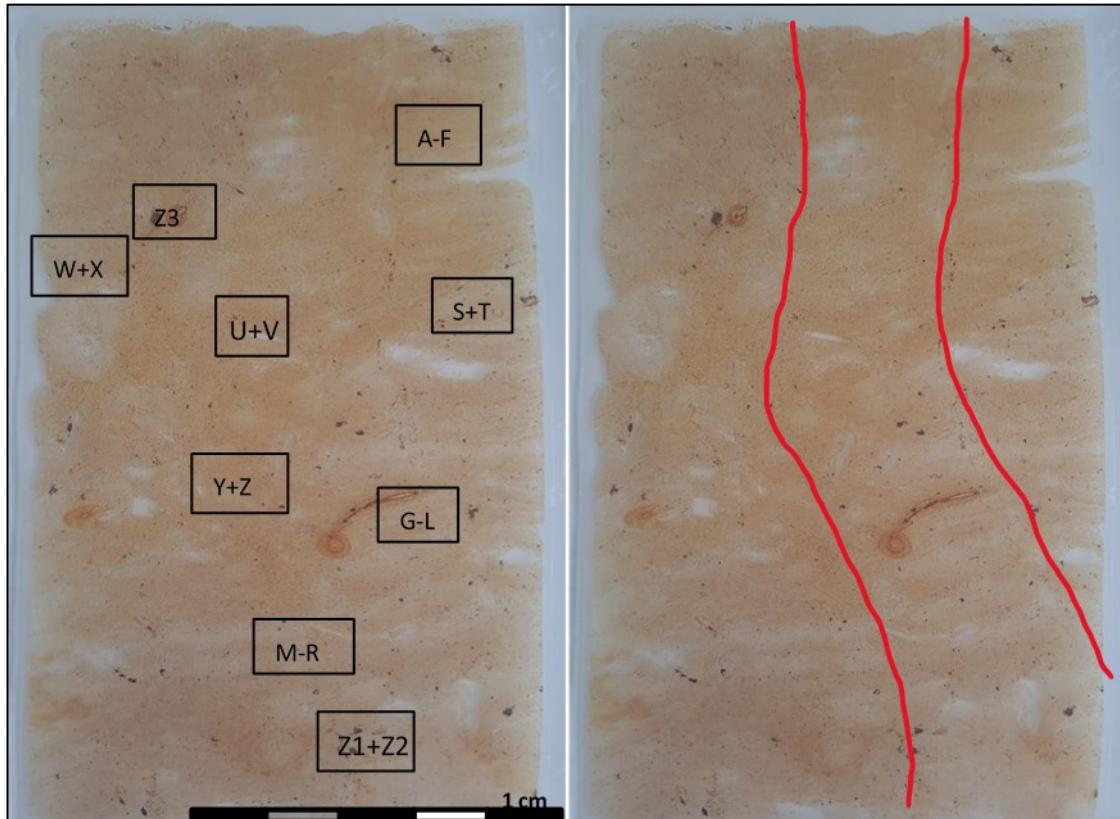
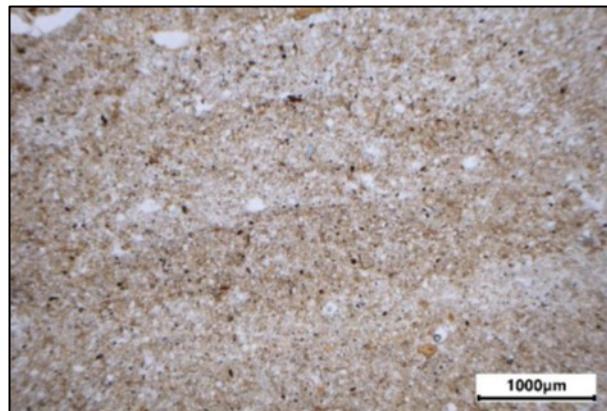


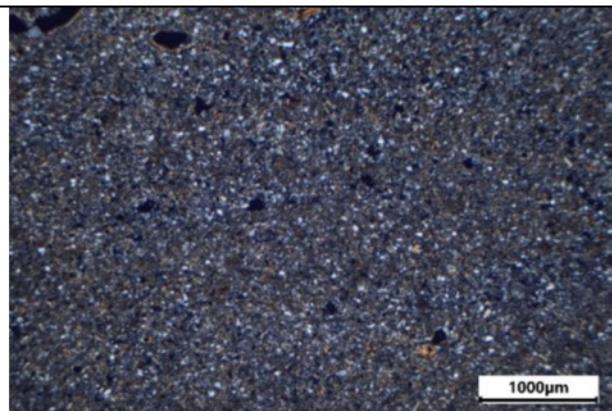
Abbildung A 2: Scan des Dünnschliffs Probe 4, Markierungen zeigen Positionen der Mikrobilder (siehe Fotodokumentation Abbildung A 3), Im rechten Bild ist die Gangfüllung mit roten Linien abgegrenzt

Die schon mit bloßem Auge identifizierbare Bänderung wird durch eine unterschiedliche Färbung hervorgerufen. Die braune Färbung der Bänder wird durch einen erhöhten Gehalt an Ton in den Kornzwischenräumen der überwiegenden Schluffkörner hervorgerufen. Die heller braun gefärbten Zwischenlamellen enthalten weniger Ton als die braun gefärbten Lamellen. Bis auf den Tongehalt sind die Zusammensetzung, Korngröße und Lagerungsdichte der Lamellen und Zwischenlamellen gleich. Es zeigen sich keinerlei strukturelle Unterschiede, Korneinregelung oder Anzeichen von Sedimentschichtwechseln. Trotzdem ist der Übergang von den Zwischenlamellen zu den Tonlamellen kontrastreich gefärbt und scharf voneinander abgegrenzt. Der Übergang von der Tonlamelle zum darunter folgenden Zwischenlamellenbereich ist dagegen weniger kontrastreich und scharf. Zum Teil sind einige Bereiche der Bänderung auch fleckig. In der Regel finden sich dort Anzeichen bioturbater Überformung, die zu einer

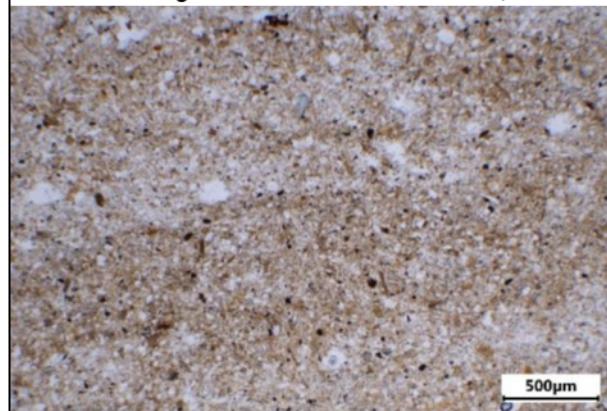
Vermischung von tonärmerem und tonreicherem Material geführt hat oder auch die braune Färbung der Tonlaminen durch Materialauflockerung weniger stark zum Tragen kommt. Bei der Betrachtung mit bloßem Auge fallen neben der braunen Bänderung auch die dunkelbraun bis schwarz gefärbten, kleinen Flecken sowie die rostfarbenen größeren Flecken auf. Bei den kleinen, dunkleren Flecken handelt es sich um Eisen-Mangan-Konkretionen und -Imprägnierungen der Matrix, die in situ entstanden sind oder maximal durch Bioturbation kurzstreckig verlagert wurden. Die rostfarbenen Flecken sind Eisenoxidausfällungen, die sich in konzentrischen Ringen um Wurzeln herum gebildet haben, teilweise lassen sich in ihrem Zentrum noch Wurzelreste finden. Die schon mit bloßem Auge erkennbaren Hohlräume sind alle biogener Herkunft, es handelt sich dabei um channels und chambers kleinerer Bodentiere sowie um Wurzelbahnen. Am linken Rand des Schliffes, kurz oberhalb der Mitte, ist sogar eine kleine Wühlstruktur bereits ohne Vergrößerung zu identifizieren. Insgesamt lässt sich die bioturbate Überformung des Materials als sehr stark bewerten. In Turbationsbereichen sind die Grenzen der Bänderung teilweise durchbrochen und heller und dunkler braun gefärbtes Material vermischt. Entlang biogener Hohlräume ist Ton verlagert worden: An den Rändern der Hohlräume finden sich Tonüberzüge. Die Überzüge sind braun bis dunkelbraun gefärbt und laminiert (mehrere Einspülungsphasen). Die einzelnen Tonlaminen sind in Abhängigkeit des Eisenoxidegehalts unterschiedlich braun gefärbt. Es handelt sich fast ausschließlich um dusty clay coatings, also keinen reinen Ton, sondern mit einem Anteil etwas größerer Korngrößen. Trotzdem sind die Tonpartikel überwiegend gut eingeregelt, was sich an den meist scharfen Auslöschungslinien bei der Betrachtung mit gekreuzten Polarisatoren äußert. Zwischen den Tonlaminen treten vereinzelt Laminen mit Partikeln der Korngröße Schluff auf.



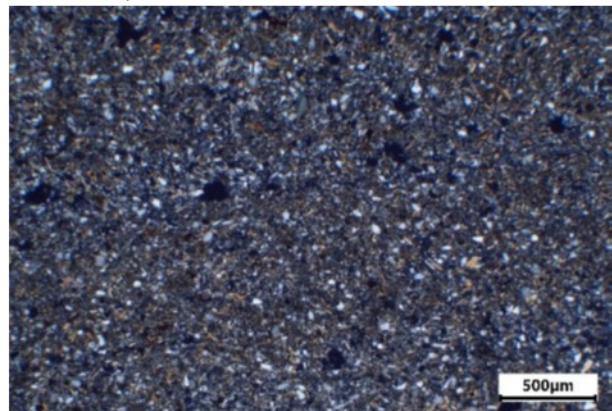
A: Bänderung mit tonreicherem Material, PPL



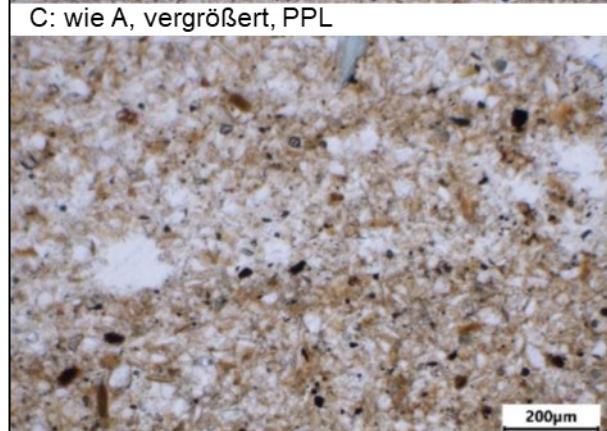
B: wie A, XPL



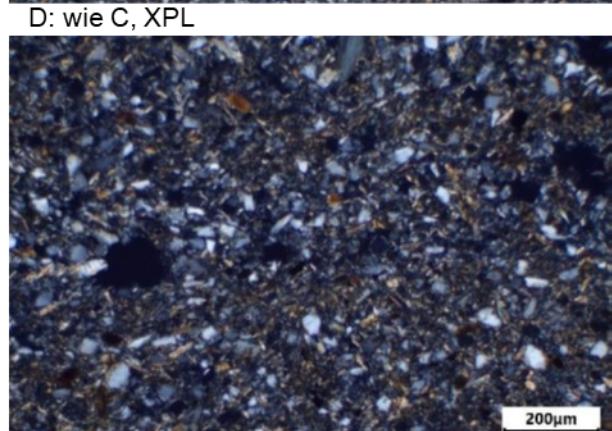
C: wie A, vergrößert, PPL



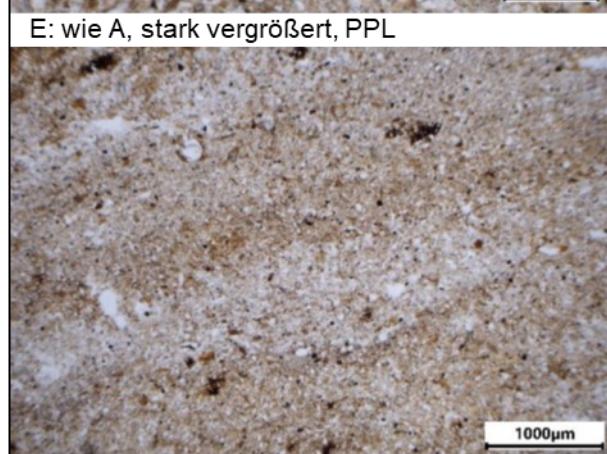
D: wie C, XPL



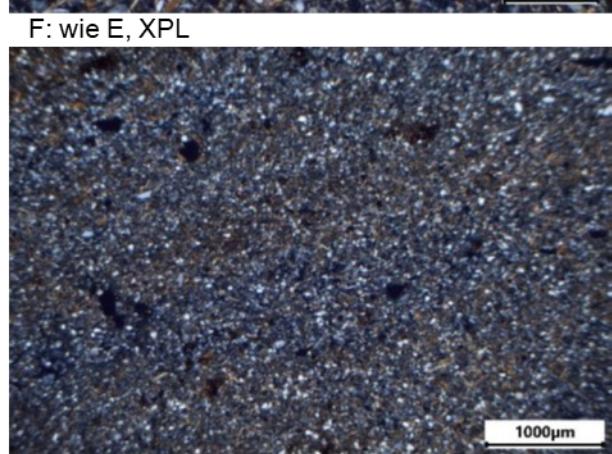
E: wie A, stark vergrößert, PPL



F: wie E, XPL

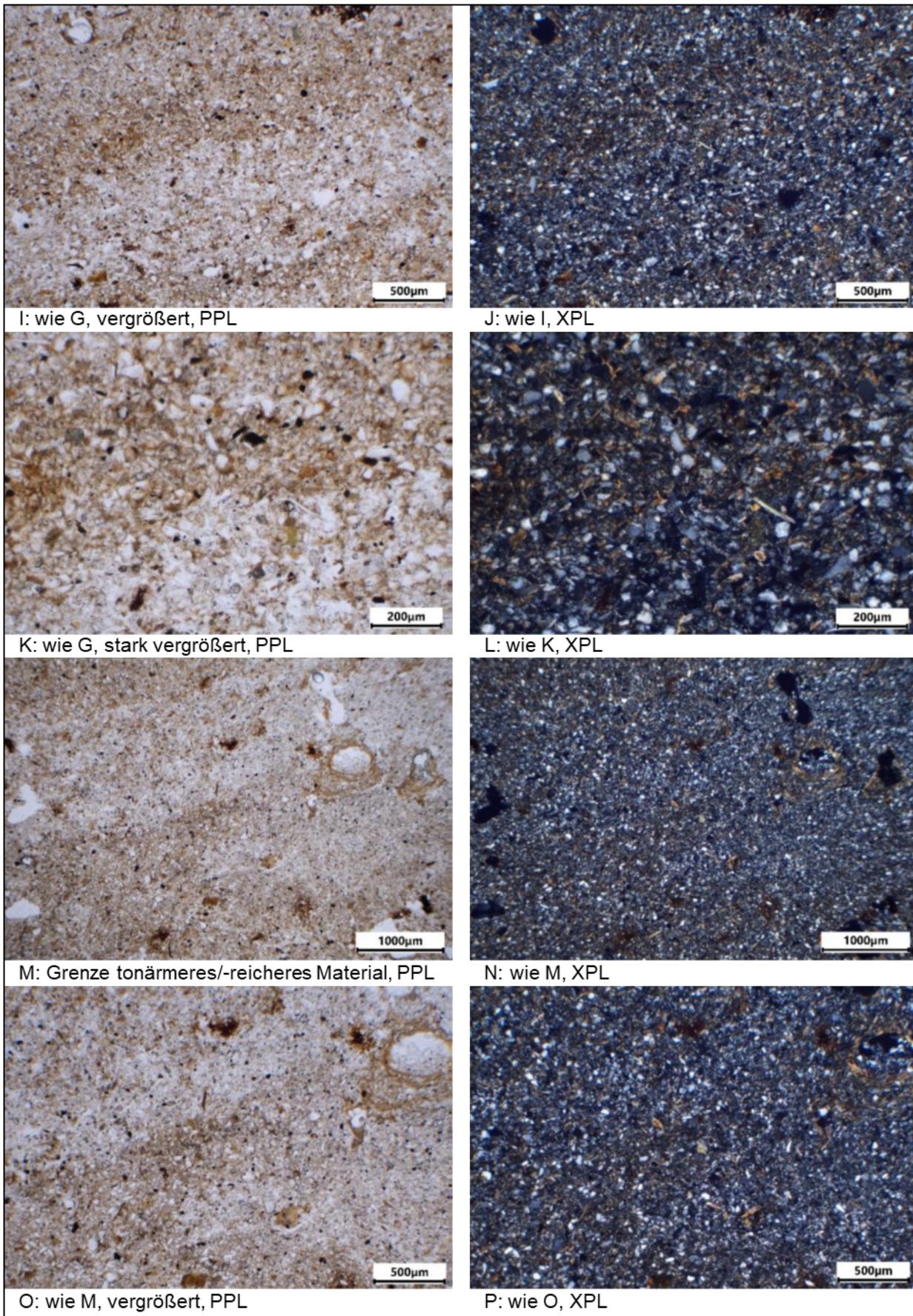


G: Grenze tonarmes/tonreiches Material, PPL

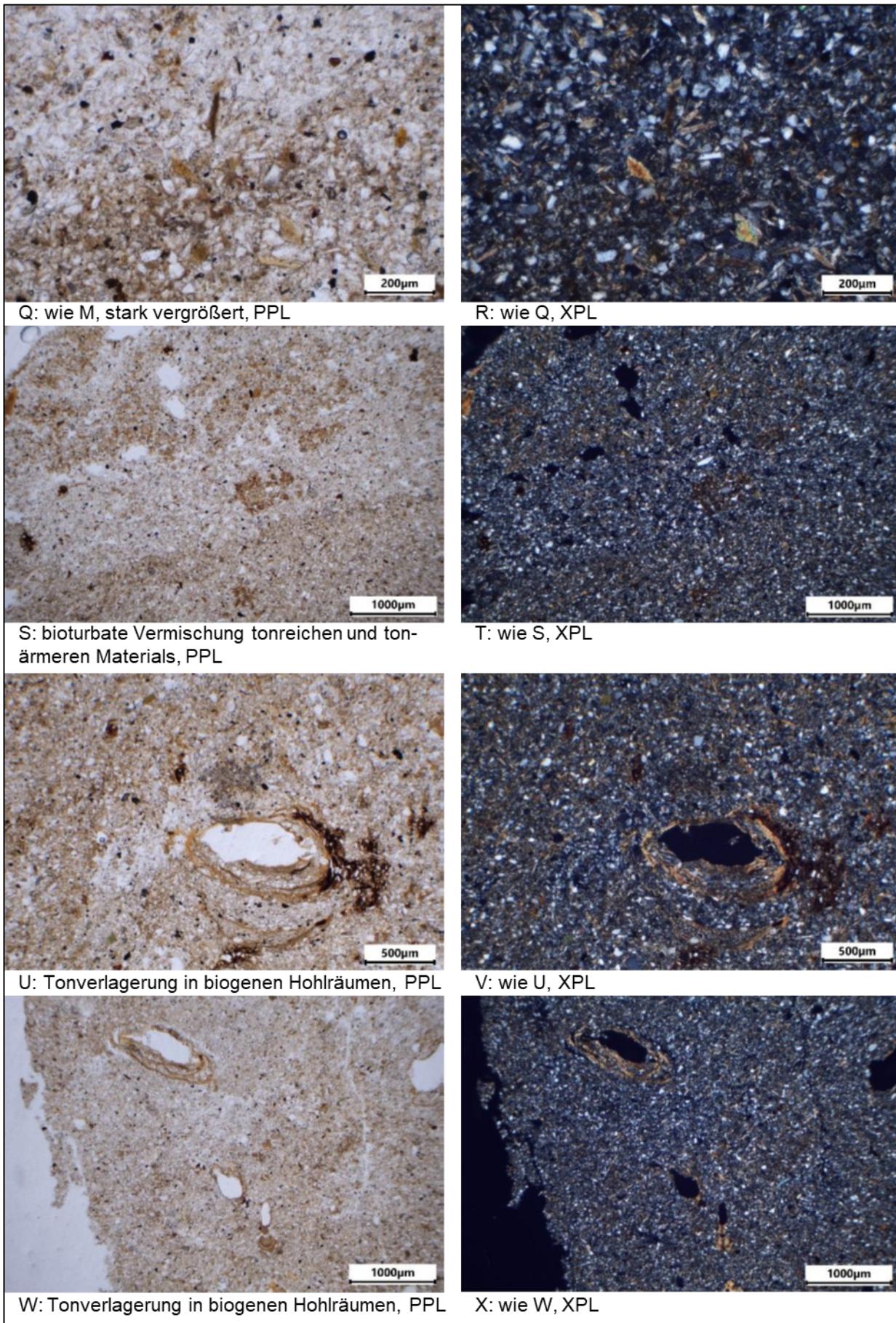


H: wie G, XPL

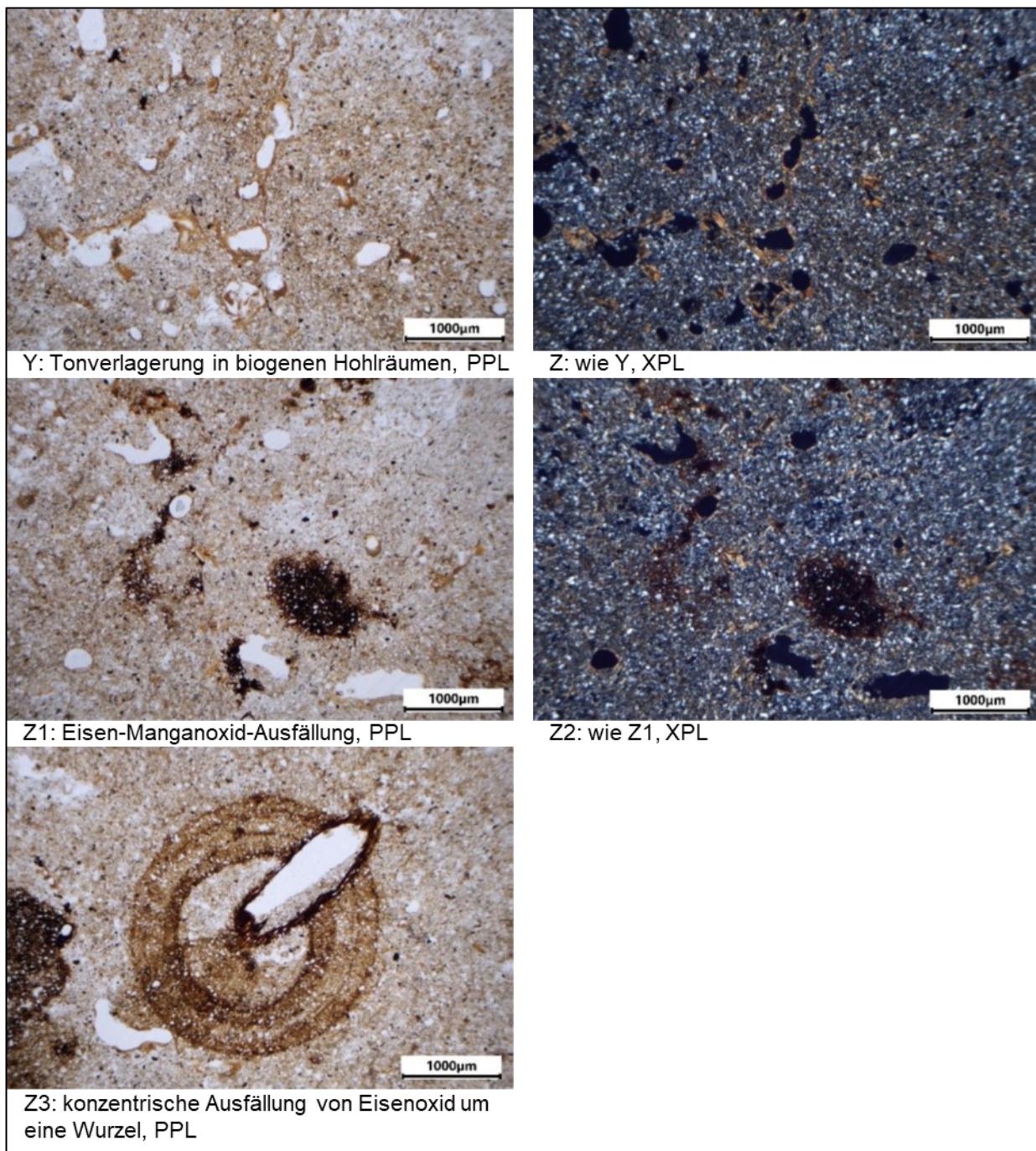
Abbildung A 3: Fotodokumentation zu Probe 4



Fortsetzung Abbildung A 3



Fortsetzung Abbildung A 3.



Fortsetzung Abbildung A 3. Probe 3 – Entnahmetiefe 195–205 cm

Der Scan des Dünnschliffs (Abbildung A 4) zeigt feines Material mit unterschiedlich brauner Färbung und ohne Aggregierung. Besonders auffällig ist in der linken oberen Ecke des Dünnschliffs eine braune Linie. Bei genauerer Betrachtung handelt es sich um einen verfüllten, etwa 0,5 cm breiten Gang. Entlang der Gangränder ist Eisenoxid im Sediment ausgefällt und entlang der Unstetigkeit ist Ton verspült worden, der partiell Überzüge an den Gangrändern bildet. Das braune Eisenoxid zeichnet die Ränder des ehemaligen Hohlraums nach. Eine zweite Auffälligkeit des Dünnschliffs bildet der Riss im unteren Drittel. Dieser Riss ist keine Sedimentgrenze, sondern während der Probennahme oder Schliffpräparation entstanden und wird deswegen in den weiteren Analysen nicht beachtet.

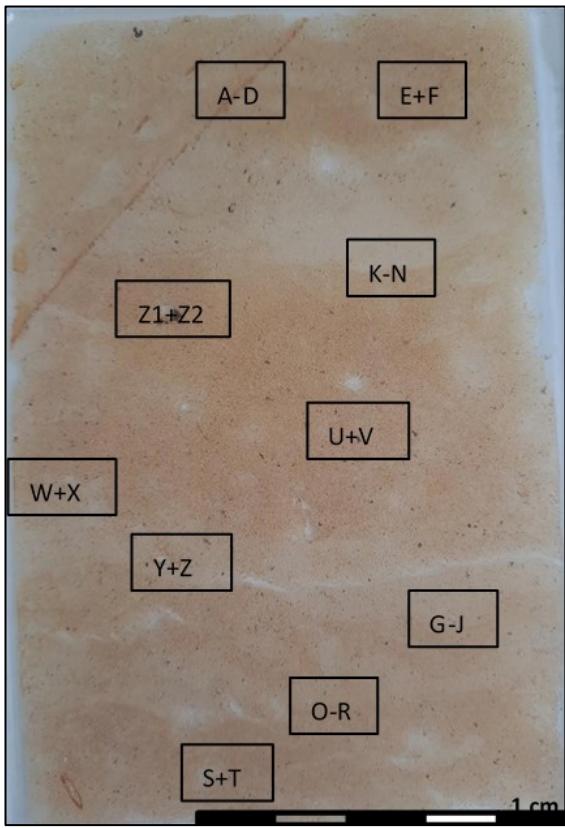


Abbildung A 4: Scan des Dünnschliffs Probe 3, Markierungen zeigen Positionen der Mikrobilder (siehe Fotodokumentation Abbildung A 5)

Als weiteres Merkmal treten auch in diesem Schliff unterschiedlich braun gefärbte Bereiche auf. Die Farbunterschiede sind auch hier auf Unterschiede im Tongehalt des Substrats zurückzuführen. Im Vergleich zum zuvor beschriebenen Dünnschliff erscheinen die Bänder hier mächtiger. Bei genauerer Beobachtung sind die braunen Bänder in sich gegliedert. Zum einen mit dünneren Bändern und Bereichen mit etwas weniger Ton und zum anderen auch in fleckiger Ausprägung, die durch bioturbate Störungen und Materialvermischungen erzeugt wird. Die prinzipielle Gestalt der Tonlamellen ist auch hier gleich aufgebaut: Die Obergrenze der Tonlamelle ist scharf begrenzt, während der untere Übergang zum Zwischenlamellenbereich mit weniger Ton eher fließend verläuft. Im Schliff sind die Grenzen der Lamellen und Zwischenlamellen unterschiedlich stark kontrastreich. Die Obergrenze der mächtigen Bänder weisen den größten Kontrast, also auch den höheren Tongehaltsunterschied zu den tonärmeren Bereichen zwischen den Bändern auf. Die Tonbänder und Zwischenbereiche innerhalb der mächtigen Tonbänder weisen dagegen geringere Unterschiede im Tongehalt auf und sind daher weniger kontrastreich.

Entlang biogener Hohlraumstrukturen sind im gesamten Schliff Toneinspülungen in Form von Überzügen der Hohlraumränder zu finden. Die Einspülungen bestehen aus Ton mit unterschiedlichen Eisenoxidgehalten und sind geschichtet aufgebaut. Einzelne dieser Schichten enthalten auch größeres Material oder werden sogar durch Feinschluff dominiert. Toneinspülungen mit wenig Grobmaterialantei-

len weisen teilweise Auslöschungslinien bei der Betrachtung mit gekreuzten Polarisatoren auf und belegen relativ laminare Fließbewegungen beim Tontransport. Dagegen zeichnen sich gröbere Einspülungen durch ein fleckiges Auslöschungsverhalten im gekreuzt polarisierten Licht aus. Die kleinen dunklen Flecken im Schliff sind Eisen-Mangan-Oxidausfällungen, die an Hohlraumrändern im Sediment oder auch in Form von Matriximprägnierungen Konkretionen bilden. In der unteren linken Ecke des Dünn schliffs findet sich darüber hinaus auch eine konzentrische Eisenoxidausfällung, die sich um eine Wurzel herum gebildet hat.

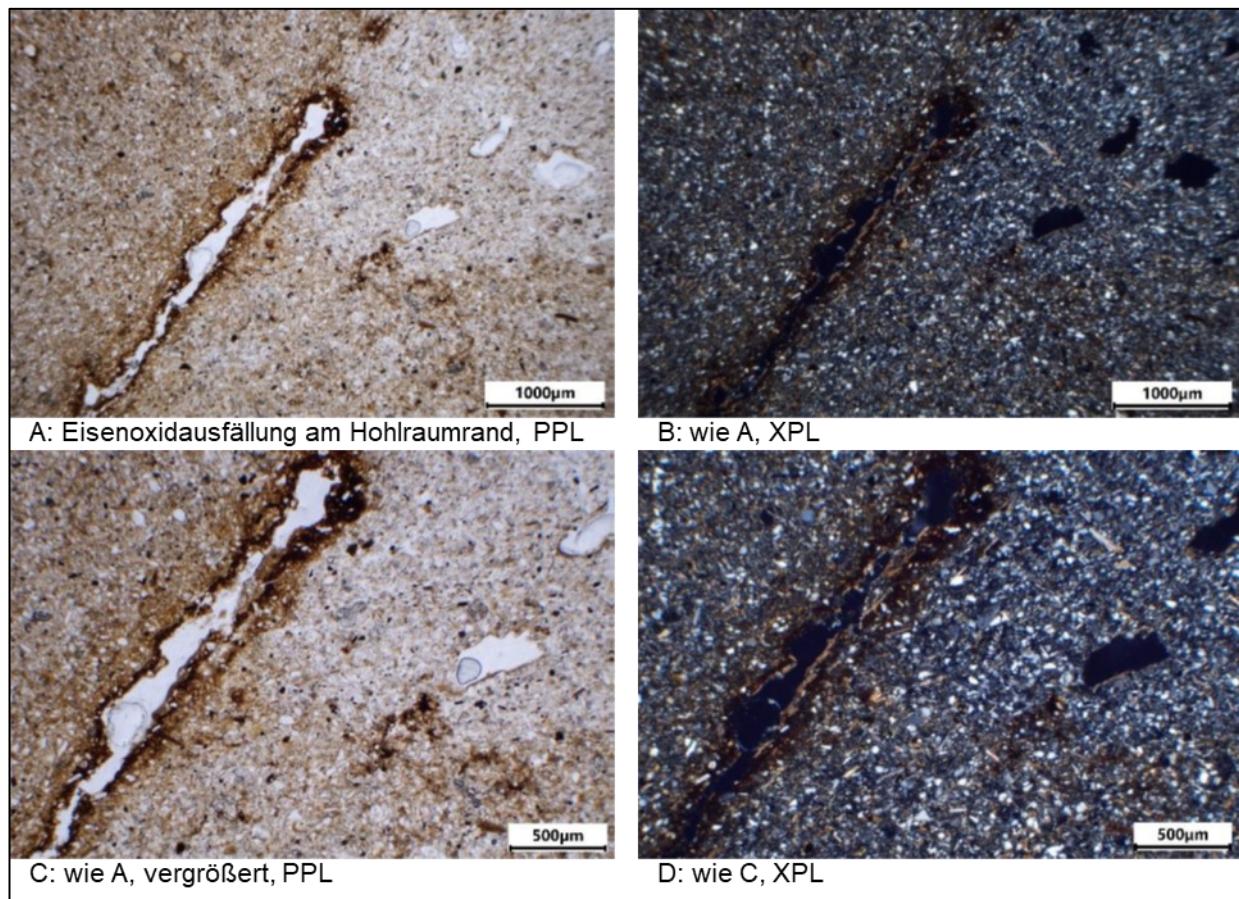
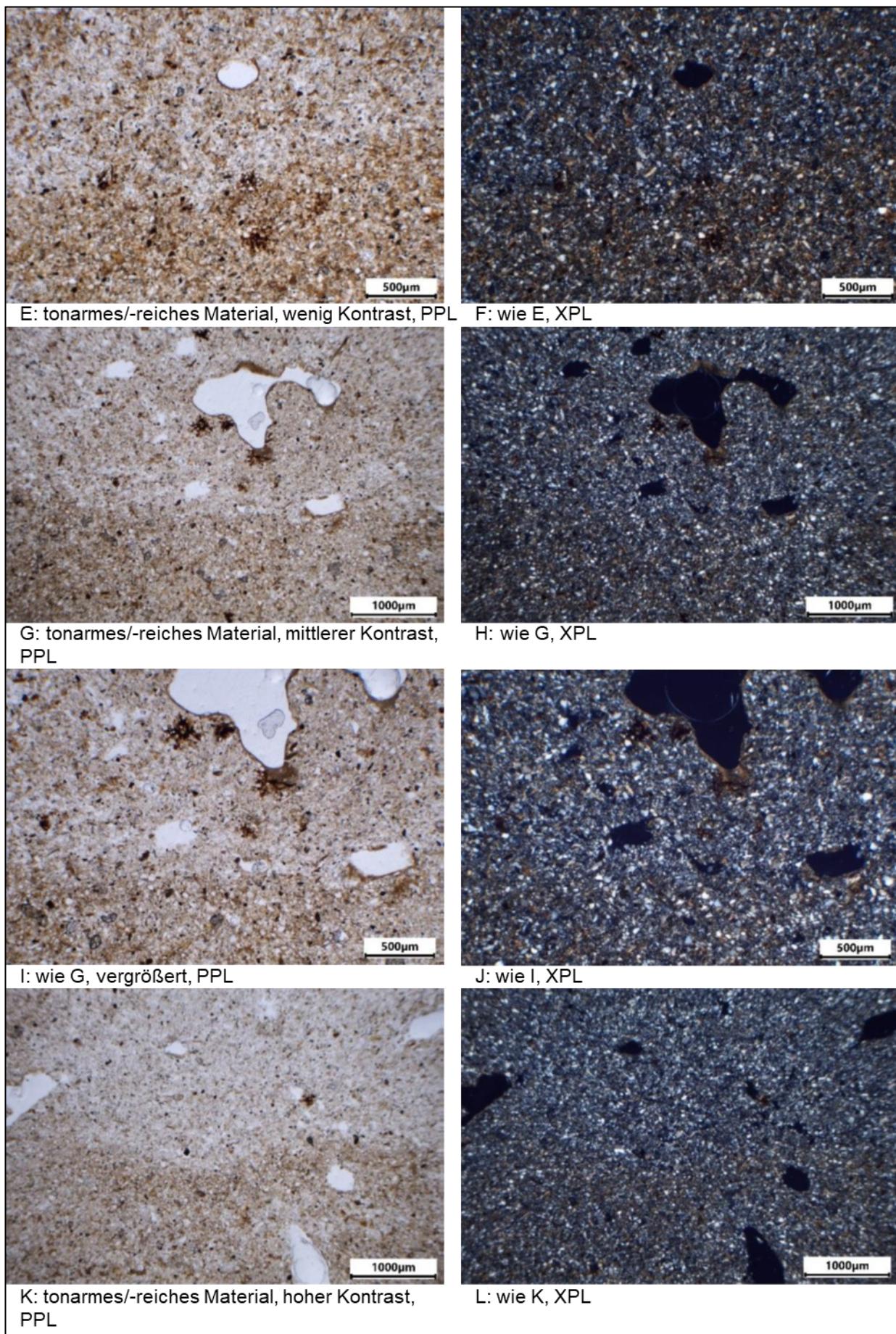
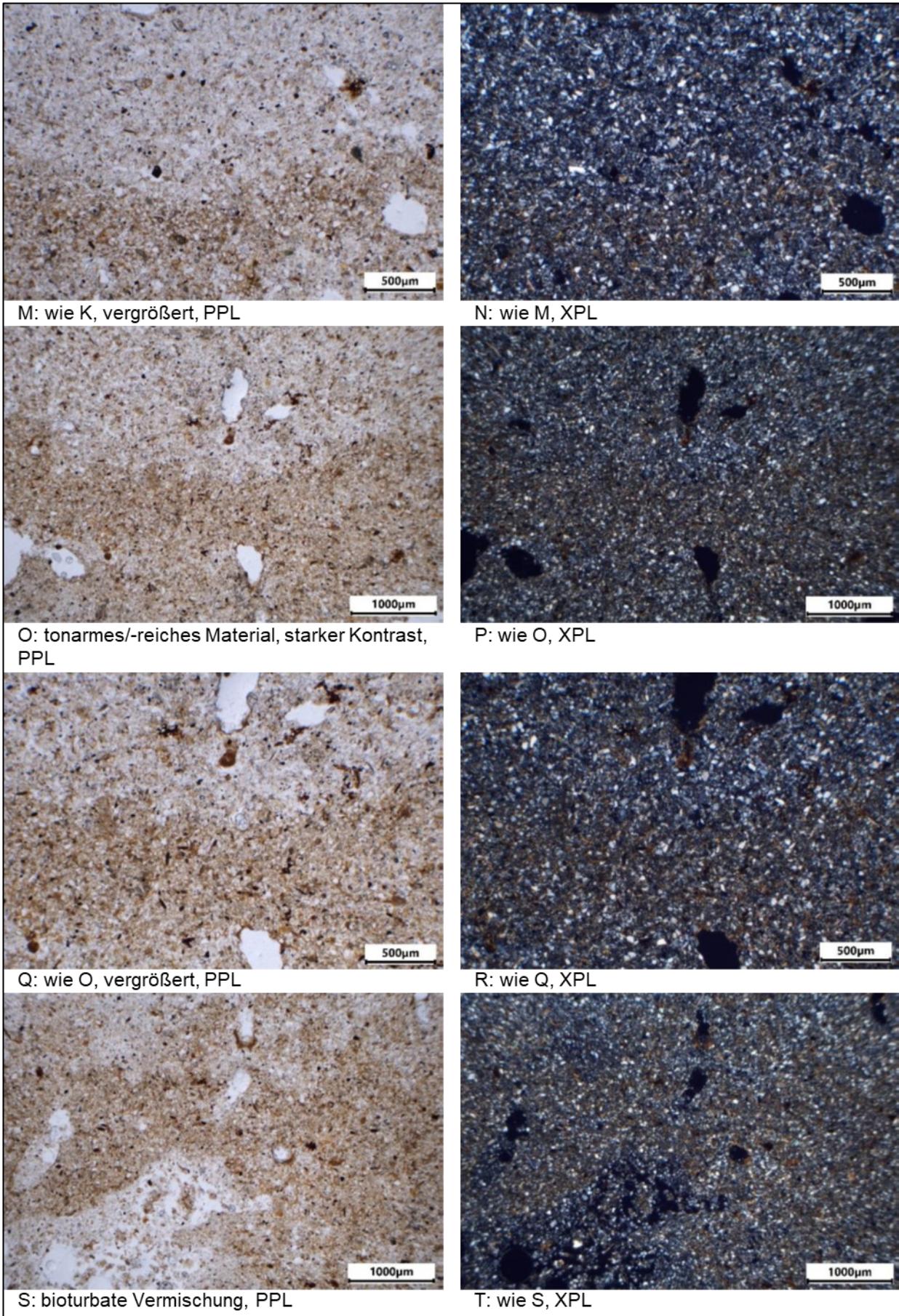


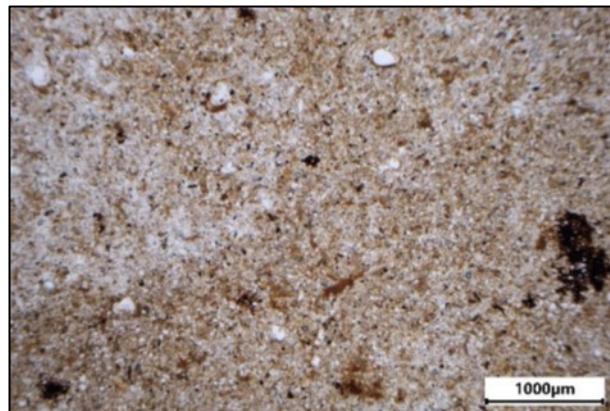
Abbildung A 5: Fotodokumentation zu Probe 3



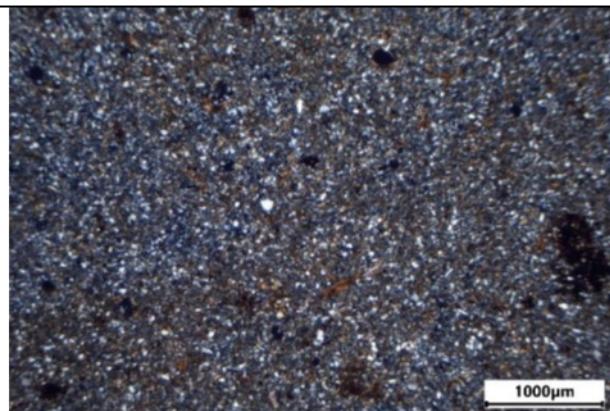
Fortsetzung Abbildung A 5



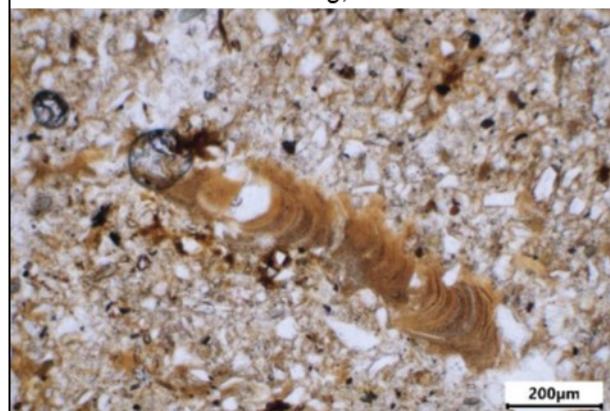
Fortsetzung Abbildung A 5



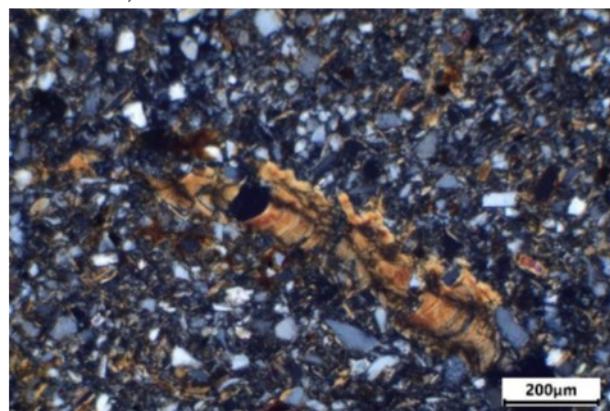
U: bioturbate Vermischung, PPL



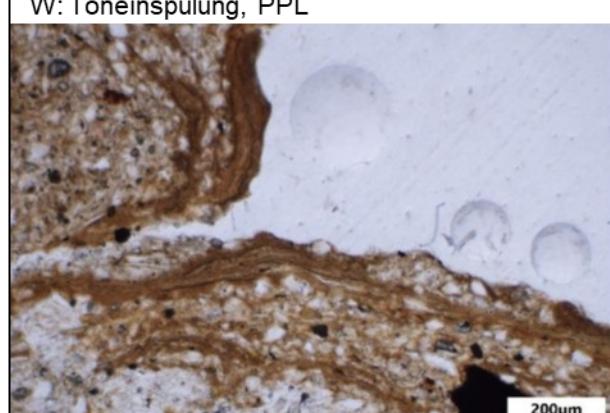
V: wie U, XPL



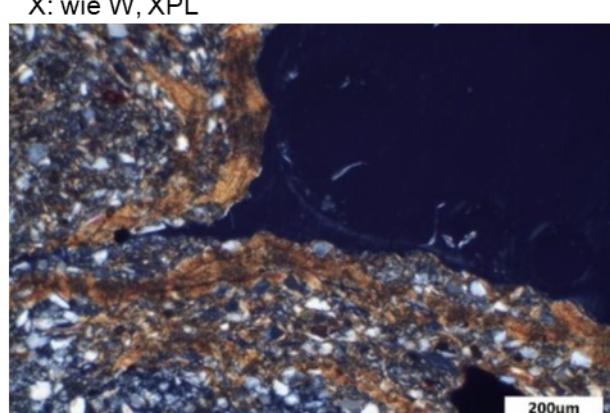
W: Toneinspülung, PPL



X: wie W, XPL



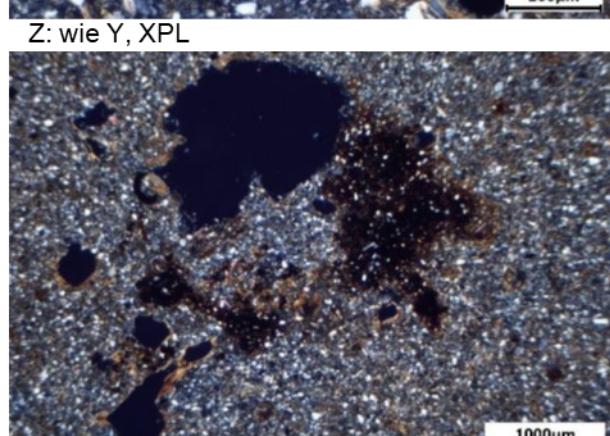
Y: Ton- und Schluffeinspülung, PPL



Z: wie Y, XPL



Z1: Eisen-Manganoxid-Ausfällung, PPL



Z2: wie Z1, XPL

Fortsetzung Abbildung A 5

A 2.3.2 Probe 2 – Entnahmetiefe 255–265 cm

Der Scan des Dünnschliffs (Abbildung A 6) zeigt braun gefärbtes, feines Material ohne Aggregierung. Im unteren Drittel des Schliffs sind einige große Hohlräume zu erkennen. Das Substrat ist in diesem Bereich sehr stark aufgelockert. Die Hohlräume und die Struktur des Materials sind auf intensive bioturbate Prozesse zurückzuführen. Die sehr stark ausgeprägte bioturbate Überformung des Materials ist in diesem Schliffabschnitt schon mit dem bloßen Auge gut zu erkennen, jedoch auch im restlichen Dünnschliff intensiv wirksam, wenn auch in kleineren, weniger gut sichtbaren Strukturen. Auch in diesem Dünnschliff ist Material mit unterschiedlichen Tongehalten nebeneinander zu finden. Die bänderartige Struktur ist aber weniger gut zu sehen, da einerseits die Tongehaltsunterschiede geringer sind und einen weniger starken farblichen Kontrast erzeugen. Andererseits ist an vielen Stellen das verschieden tonhaltige Material bioturbat vermischt worden. Die Ausprägung der Tonbänder ist aber auch in diesem Dünnschliff gleichartig: eine scharfe obere Begrenzung der Tonlamelle und ein allmählicher Übergang zur darunterliegenden Zwischenlamelle.

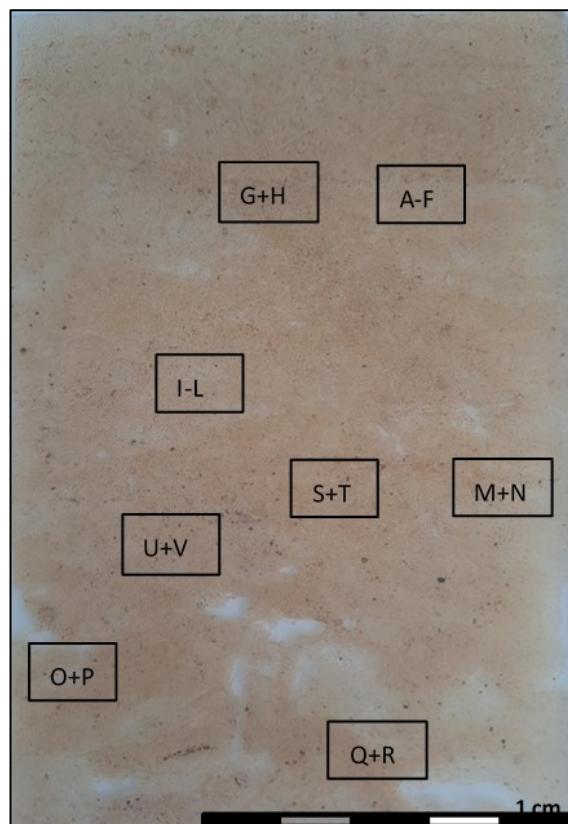


Abbildung A 6: Scan des Dünnschliffs Probe 2, Markierungen zeigen Positionen der Mikrobilder (siehe Fotodokumentation Abbildung A 7)

Im Dünnschliff-Scan sind zwei waagerecht verlaufende Linien zu erkennen, die sich in dunkelbrauner Färbung von der heller braun gefärbten Matrix abheben. Die Linien ziehen sich nicht durch den gesamten Schliff, sondern scheinen abrupt abzubrechen. Bei diesen linienhaften Strukturen handelt es sich

um Tonbänder, die sich in den dunkelbraunen Abschnitten durch einen höheren Eisenoxidgehalt auszeichnen. Unterhalb des oberen Bandes ist eine tonärmere Zwischenlamelle entwickelt. Unter dem unteren Band im Dünnschliff ist das nicht der Fall, deswegen ist die Kontrastwirkung hier weniger stark. Es sind im Dünnschliff keine Schichtwechsel, Struktur- oder Materialänderungen erkennbar, die eine Erklärung für diese ton- und eisenoxidangereicherte Bandstruktur bieten.

Die sehr starke Bioturbation ist in vielen Schliffbereichen für ein fleckenhaftes nebeneinander von hellem und dunkler braun gefärbtem Material verantwortlich. Einerseits liegt das an der Einmischung helleren, tonärmeren Materials in dunkler braun gefärbtes, tonreicheres Material. Andererseits reicht an vielen Stellen allein die Auflockerung des Substrats für die farbliche Kontrastierung.

Entlang von biogenen Hohlräumen finden sich auch hier Überzüge an Hohlräumrändern aus eingewaschenem laminiertem Ton. Die einzelnen Einspülungsphasen lassen sich anhand unterschiedlicher Färbung (verschiedene Eisenoxidgehalte) voneinander unterscheiden. Dennoch weisen die Einspülung bei der Betrachtung mit gekreuzten Polarisatoren Auslöschungslinien auf, die für laminare Fließbewegungen sprechen mit denen der Ton eingespült worden ist.

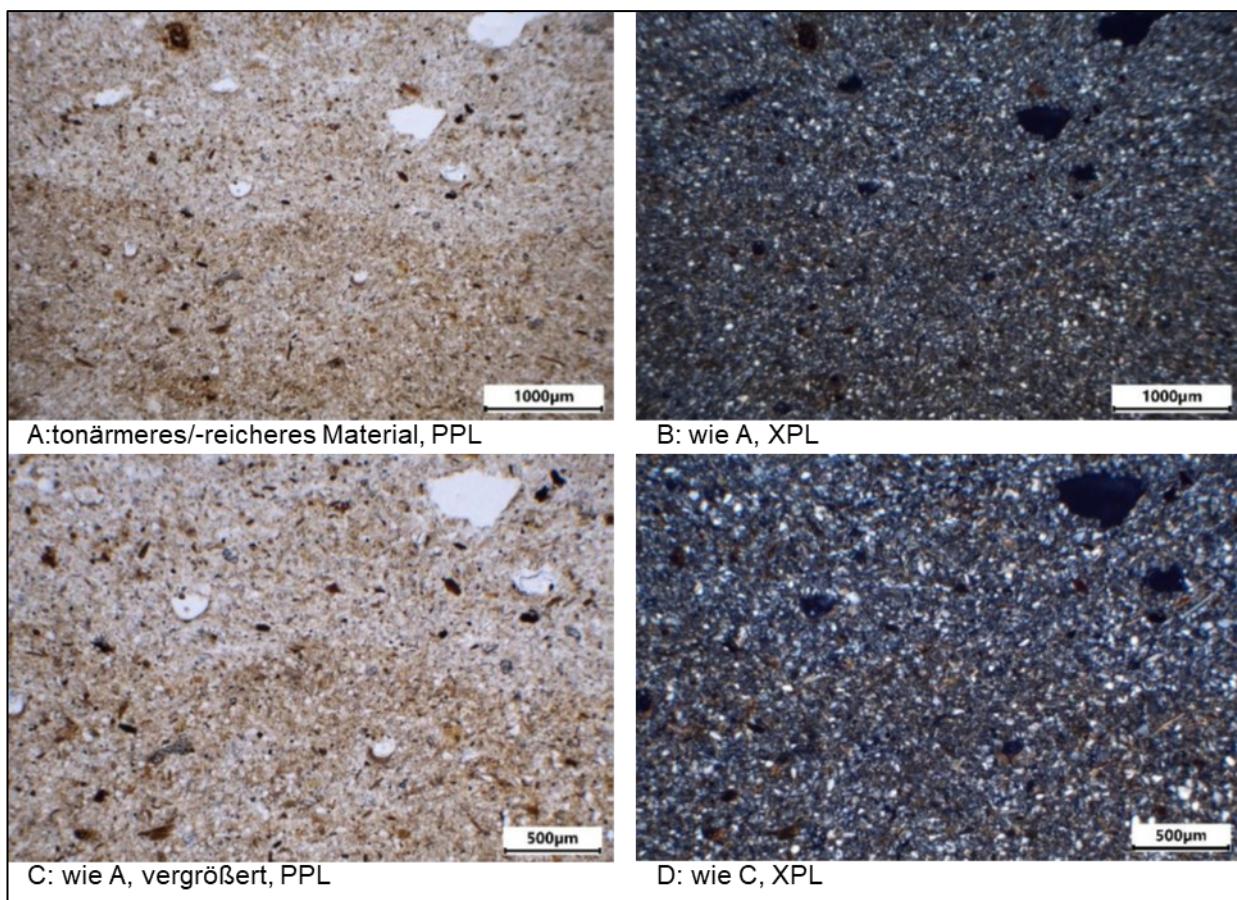
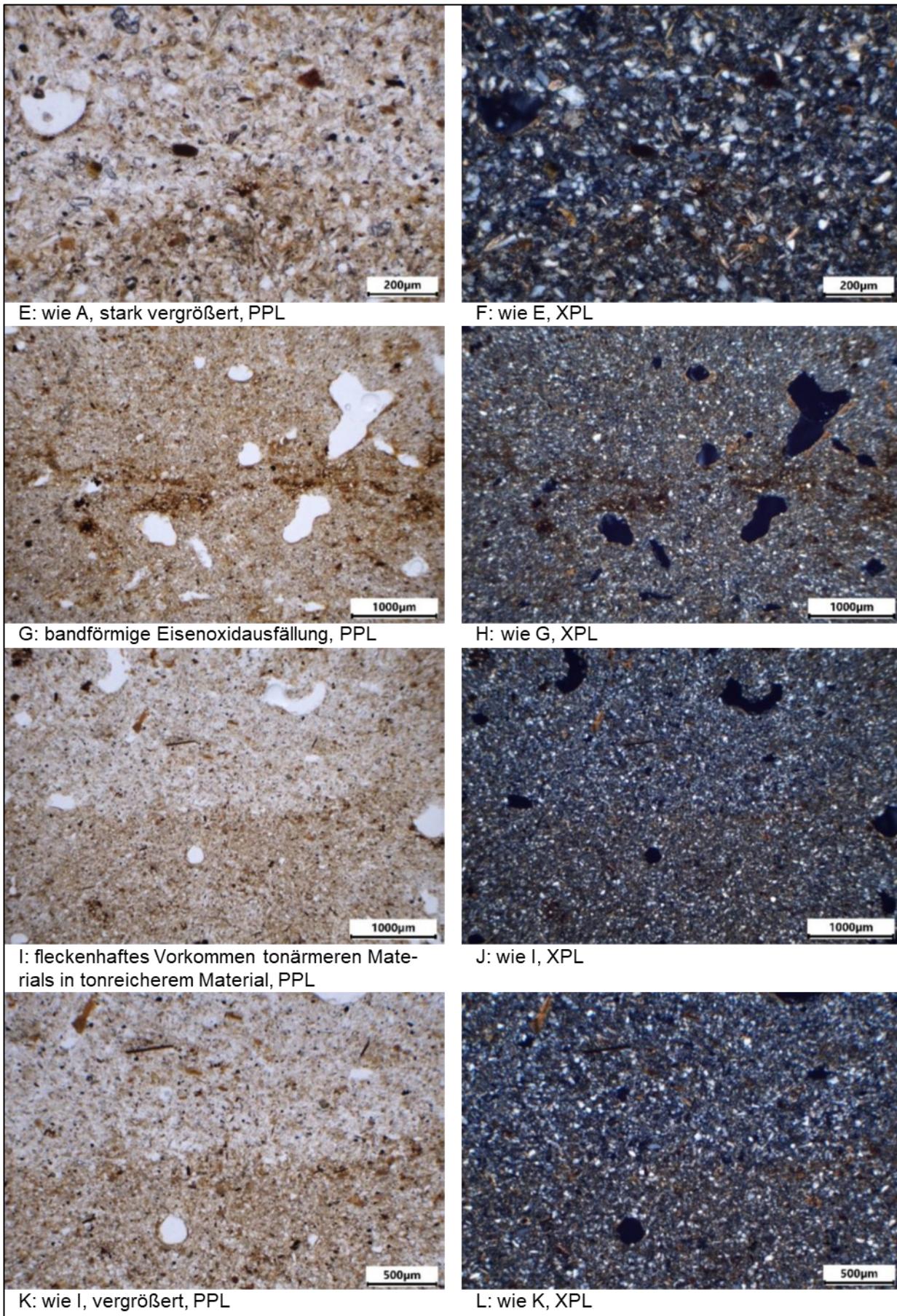
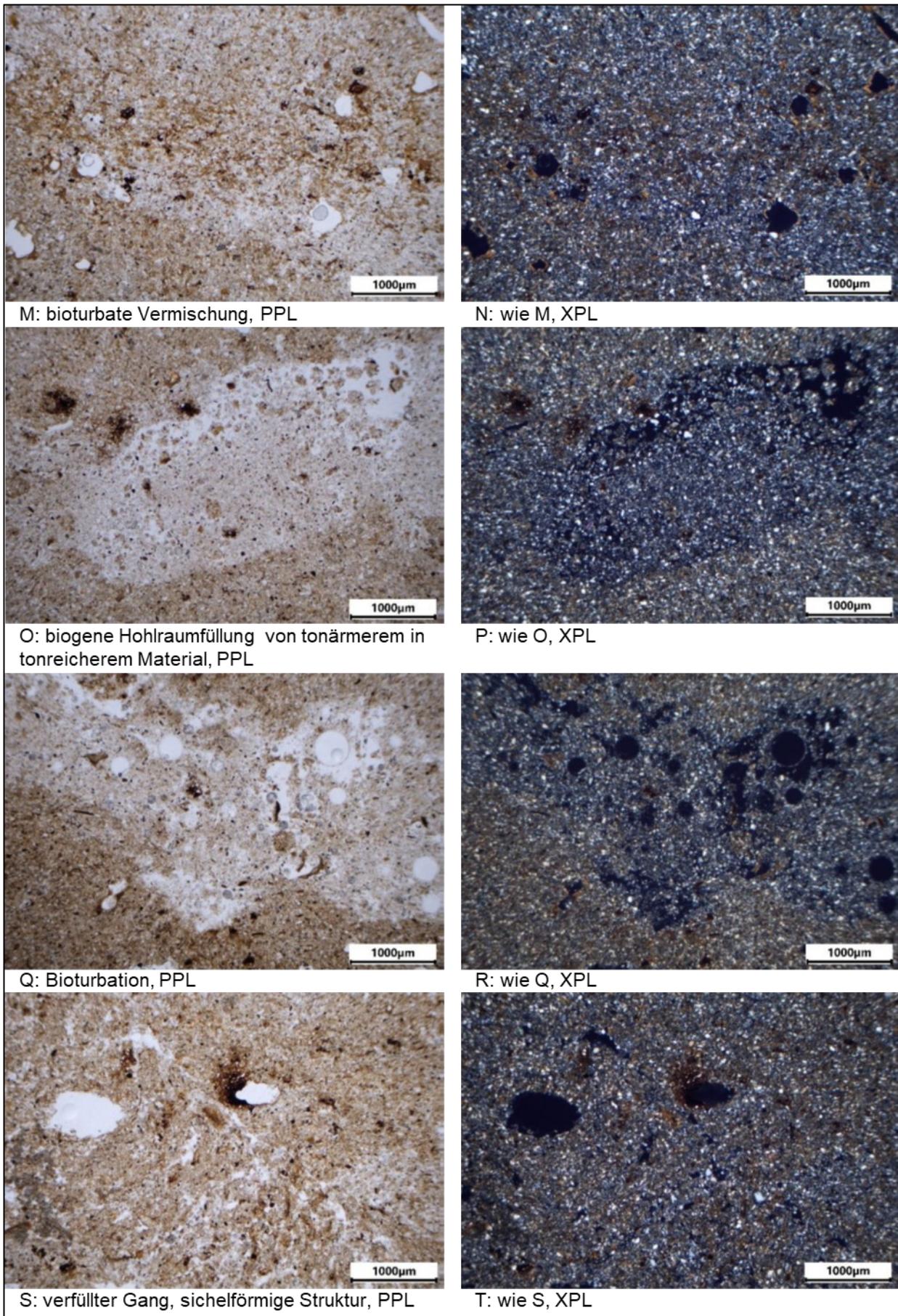


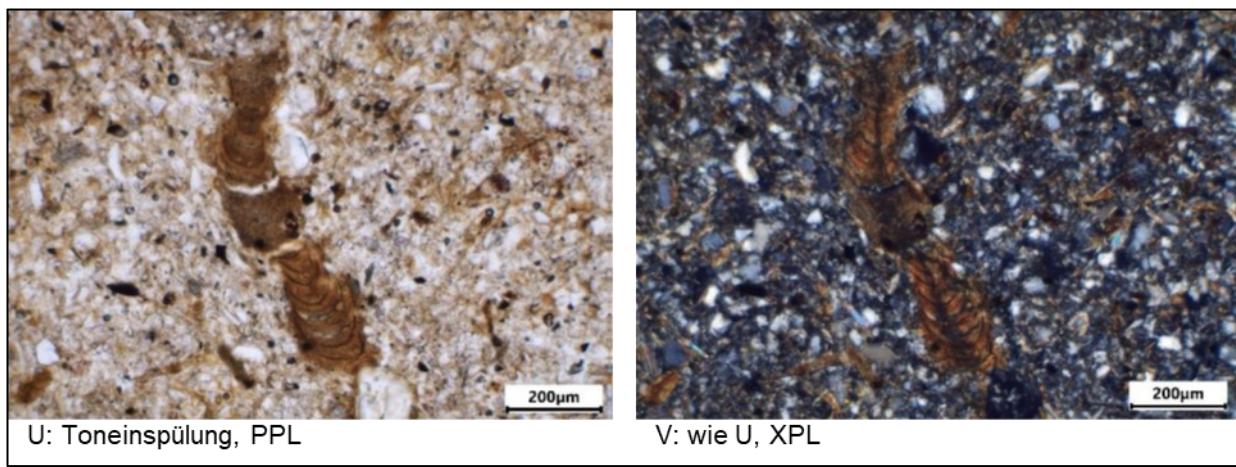
Abbildung A 7: Fotodokumentation zu Probe 2



Fortsetzung Abbildung A 7



Fortsetzung Abbildung A 7



Fortsetzung Abbildung A 7

A 2.3.3 Probe 1 – Entnahmetiefe 295–305 cm

Der Scan des Dünnschliffs (vgl. Abb. 5) zeigt sehr kompakt gelagertes, feines Material ohne Aggregation. Die Färbung des Substrats ist braun, wobei sich dunkler braun gefärbtes, tonreicheres Material netzartig über den Dünnschliff verteilt und die Zwischenräume mit heller braunem, tonärmerem Material ausgefüllt sind. In den anderen drei analysierten Dünnschliffen ist diese Materialdifferenzierung recht stark waagerecht und bandförmig ausgeprägt, hier ist die Verteilung unregelmäßiger und insgesamt eher fleckenhaft.

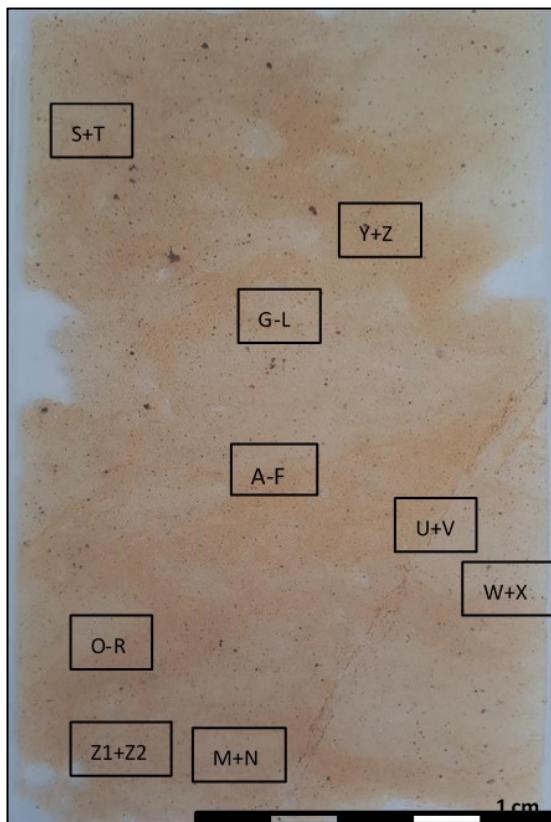


Abbildung A 8: Scan des Dünnschliffs Probe 1, Markierungen zeigen Positionen der Mikrobilder (siehe Fotodokumentation Abbildung A 9)

Die doppellinienartige Struktur in der rechten unteren Schliffhälfte ist biogenen Ursprungs. Es handelt sich dabei um einen mit Material verfüllten Gang oder eine ehemalige Wurzelbahn. Die Füllung ist diskontinuierlich und entlang der Hohlraumränder ist Eisenoxid ausgefällt, da hier, durch die geringere Lagerungsdichte, ein verstärkter Zutritt von Sauerstoff erfolgt.

Die tonreichen Bereiche setzen sich beiderseits der „Störung“ durch den biogenen Hohlraum fort. Damit ist die bioturbate Überformung zeitlich nach der Bildung der Tonanreicherung geschehen. Fleckenhaft über den Dünnschliff verteilt finden sich *in situ* entstandene, kleine Eisen- und Mangan-Oxidausfällungen in Form von Konkretionen und Imprägnierungen der Matrix. Das Material in der oberen rechten Ecke des Dünnschliffs erscheint besonders hell gefärbt. Dies hat allerdings keine substrat- oder pedogen bedingte Ursache, sondern ist nur der etwas geringeren Dicke des Dünnschliffs an dieser Stelle geschuldet.

Der Kontrast zwischen den helleren, tonärmeren Bereichen und dem tonreicherem, dunkler braun gefärbten Material ist im Dünnschliff unterschiedlich stark ausgeprägt, jedoch überwiegt der scharfe Kontrast. Stellenweise ist auch hier die Grenze bioturbat überformt. Entlang von biogenen Hohlraumrändern findet sich in Laminen abgelagerter, eingespülter Ton. Die Einregelung der Tonpartikel ist meistens nicht besonders gut ausgeprägt, da die Auslöschung bei der Betrachtung mit gekreuzten Polarisatoren eher fleckig erscheint. Das spricht für die Verlagerung mit einem schnelleren, teilweise turbulenten Sickerwassertransport entlang präferentieller Fließwege. Das wird durch den Befund unterstützt, dass überall zwischen den Toneinspülungslamellen auch Lamellen aus größeren Körnern vorkommen, die ebenfalls einer größeren Transportenergie bedürfen.

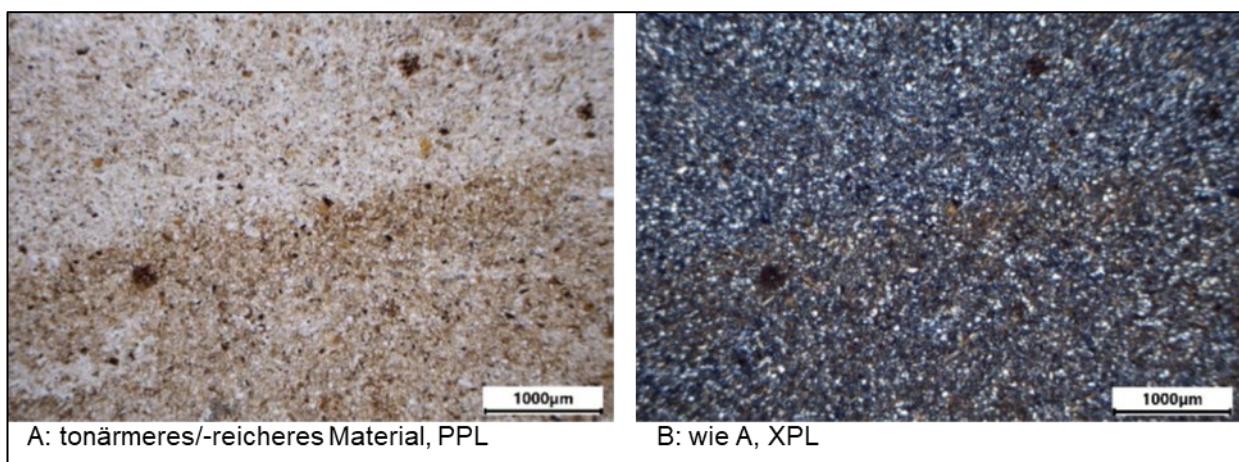
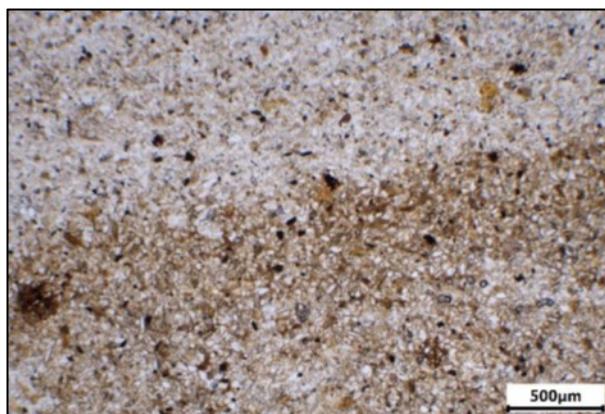
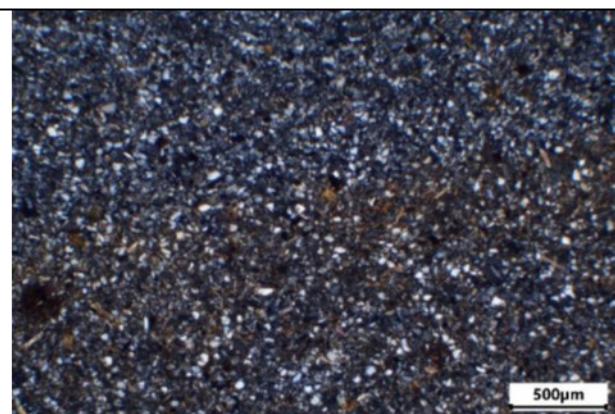


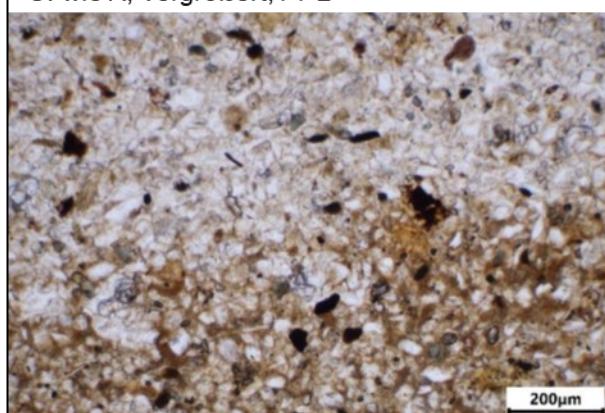
Abbildung A 9: Fotodokumentation zu Probe 1



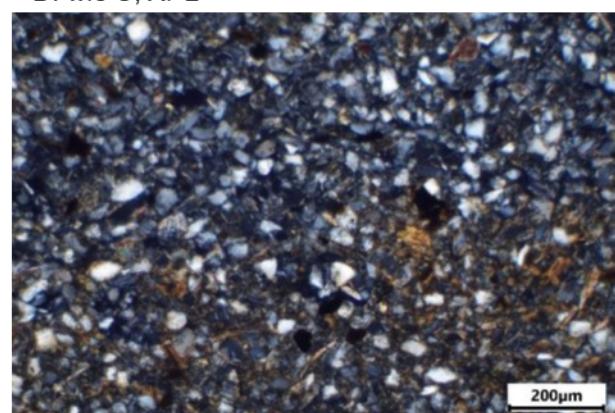
C: wie A, vergrößert, PPL



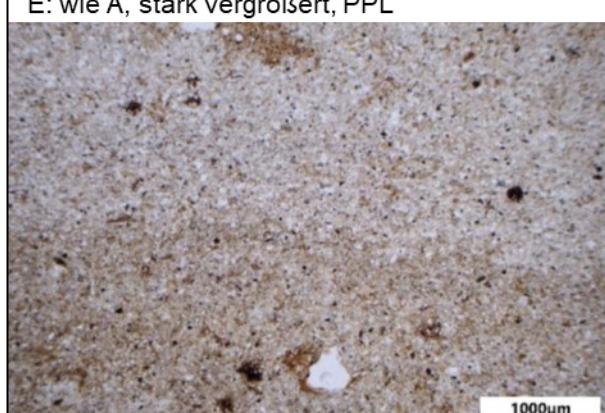
D: wie C, XPL



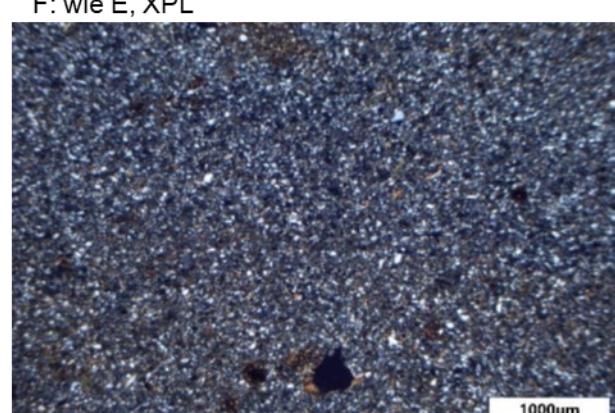
E: wie A, stark vergrößert, PPL



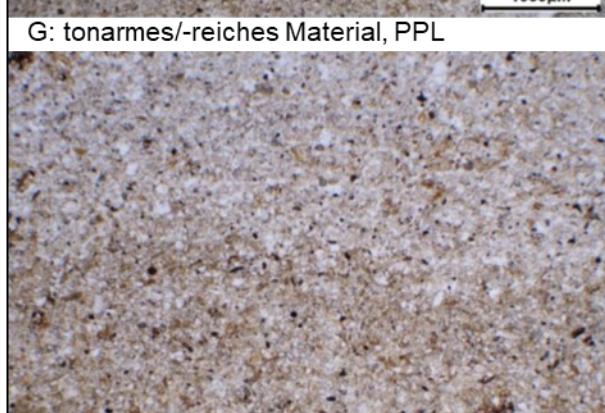
F: wie E, XPL



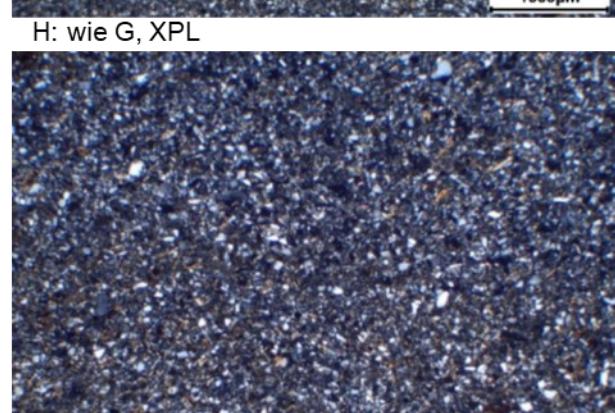
G: tonarmes/-reiches Material, PPL



H: wie G, XPL

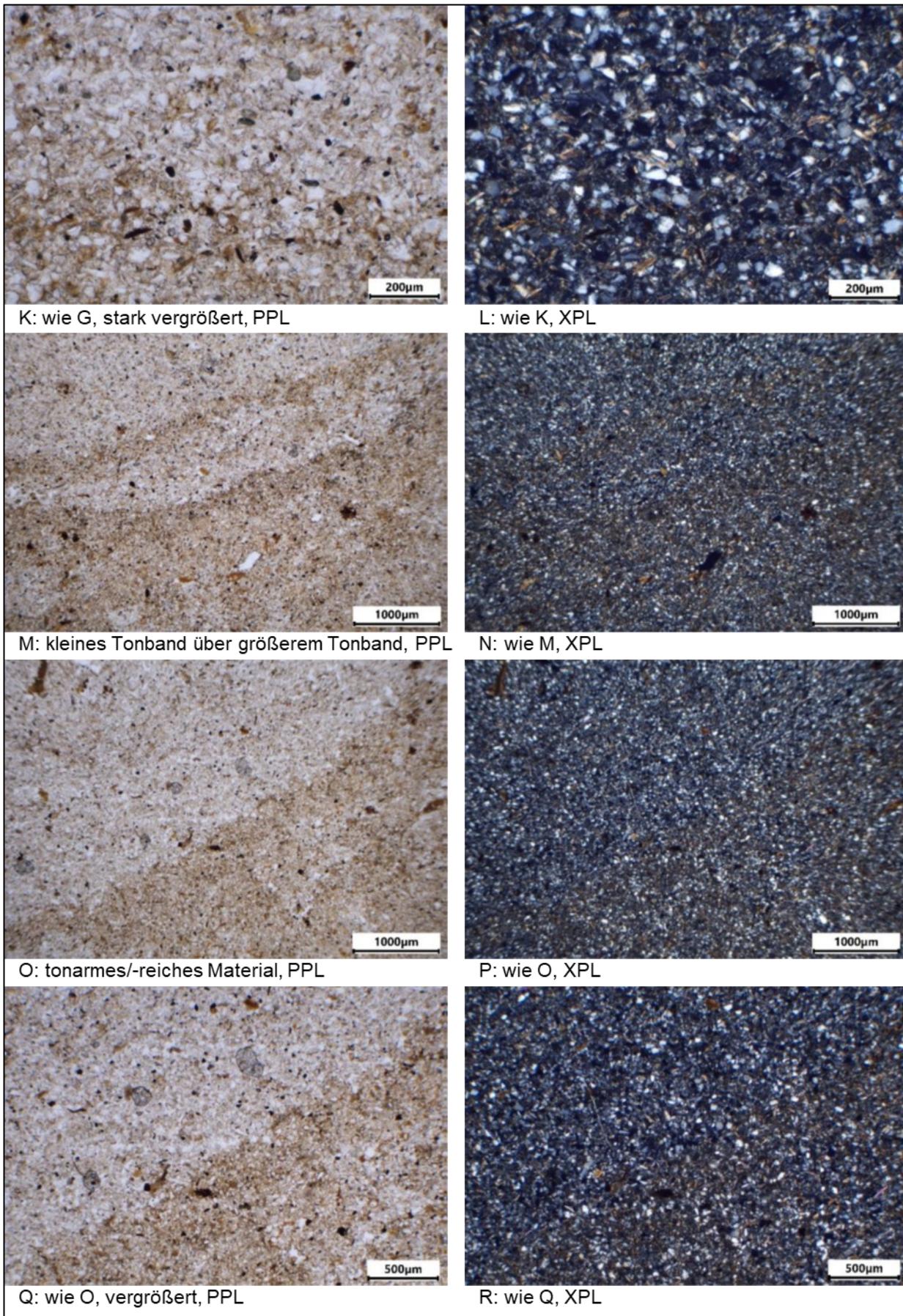


I: wie G, vergrößert, PPL

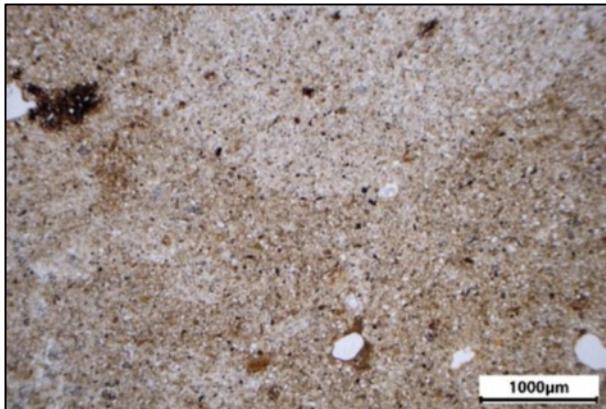


J: wie I, XPL

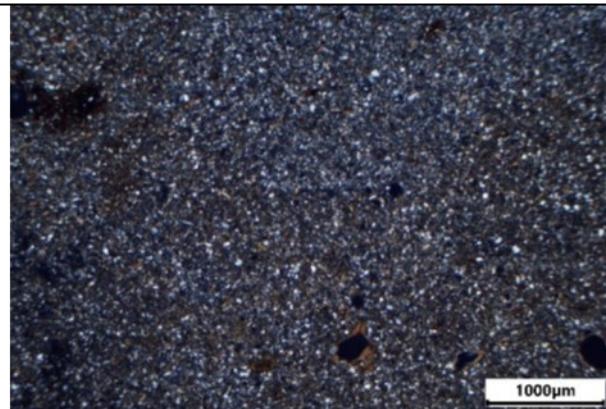
Fortsetzung Abbildung A 9



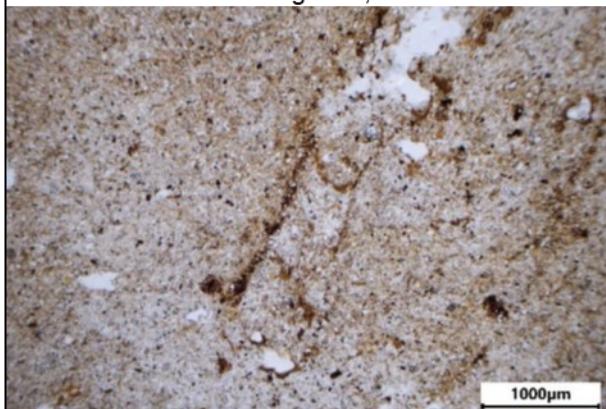
Fortsetzung Abbildung A 9



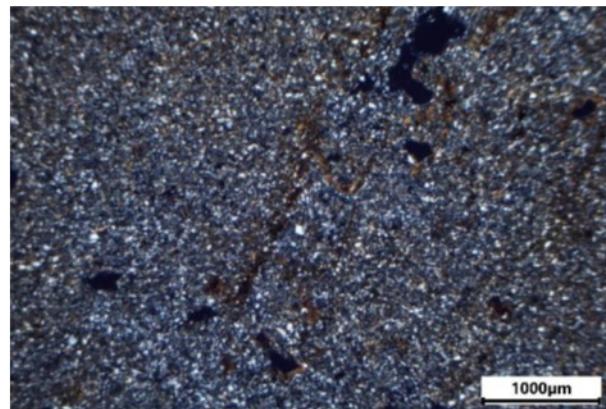
S: fleckenhaftes Nebeneinander von Material mit unterschiedlichem Tongehalt, PPL



T: wie S, XPL



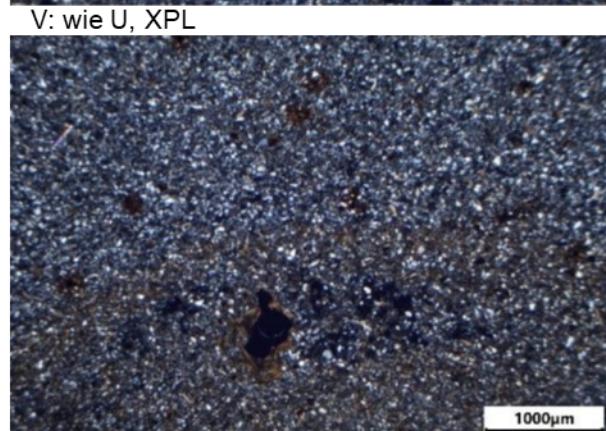
U: Eisenoxidausfällung am Hohlraumrand, PPL



V: wie U, XPL



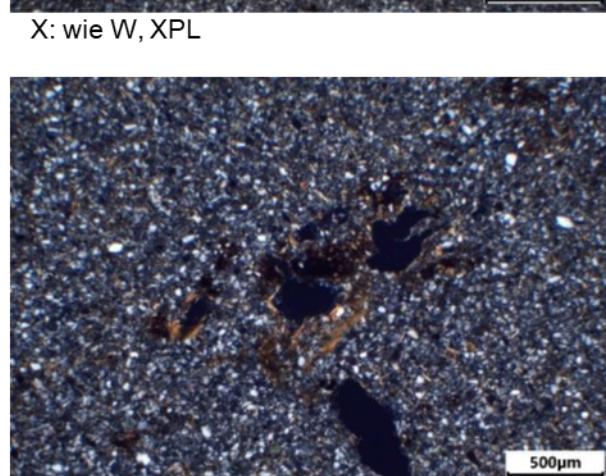
W: Eisenoxidausfällung in tonarmem und tonreichem Material, PPL



X: wie W, XPL

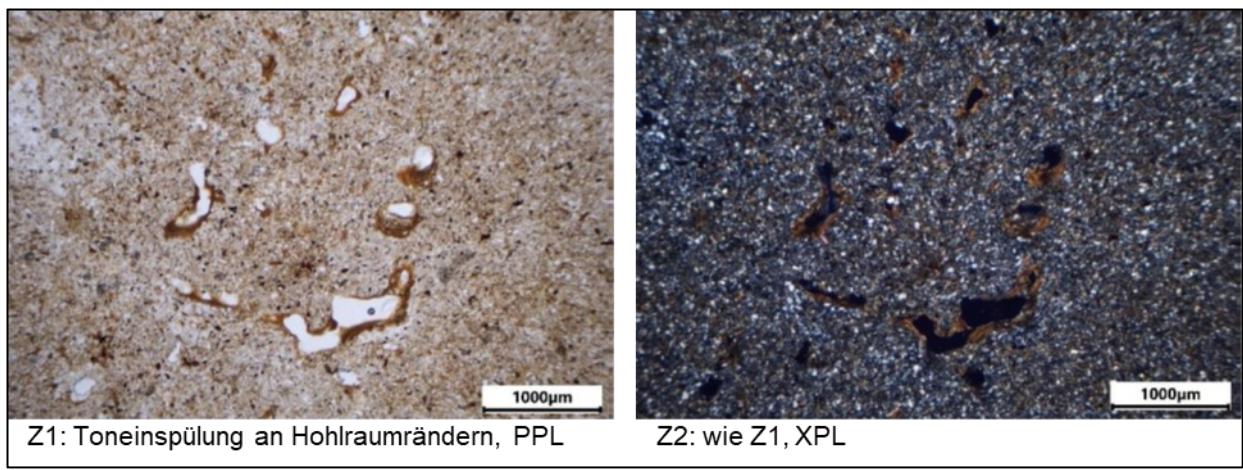


Y: Eisen-/Manganoxidausfällung und eingespülter Ton, PPL



Z: wie Y, XPL

Fortsetzung Abbildung A 9



Fortsetzung Abbildung A 9

A 2.4 Interpretation der Ergebnisse – Schliffe 1 bis 4

Das Substrat (Löss) in allen vier Dünnschliffen ist überwiegend schluffig und durch eine relativ kompakte, nicht aggregierte Lagerung geprägt. Die Lagerungshohlräume sind korngrößenbedingt von mittlerer Größe. Es treten in den Dünnschliffen keine Anzeichen frostbedingter Formung und Überformung des Substrats auf, wie bänderförmige Sortierung unterschiedlicher Korngrößen, Schluffkappen, Vesikel, plattige oder linsenförmige Mikrostrukturen (vgl. VAN VLIET-LANOË, 2010; BERTRAN & TEXIER, 1999; TODISCO & BHIRY, 2008; SCARIGLIA et al.; 2003). Dagegen ist das Substrat in allen Dünnschliffen durch Bioturbationsprozesse (Durchwurzelung, Wühlstrukturen, biogene Hohlraumbildung) geprägt. In keinem der Dünnschliffe konnten Anzeichen für Schichtwechsel, unterschiedliche Substratzusammensetzung oder Hiaten in der Materialsedimentation gefunden werden. Abgesehen von bioturbaten Materialstörungen, wie Auflockerungen, ist die Lagerungsdichte im Material aller Dünnschliffe sehr ähnlich. Es gibt keine Anzeichen besonders dicht gelagerten, möglicherweise verspülten Materials, keinerlei Einregelungen oder bevorzugte Lagerungsrichtungen langgestreckter Körner.

Besonderer Fokus der Dünnschliffuntersuchungen liegt auf der Ausprägung der Lamellen (tonreicher) und Zwischenlamellen (tonärmer), die in allen Dünnschliffen in Form unterschiedlich mächtiger Bänder, Kurzbänder und netzartiger Formen vorkommen. Die tonreichereren Lamellen sind braun gefärbt und zeichnen sich durch eine Anreichung von Ton in den Lagerungshohlräumen der größeren Körner aus. Durch ihren Gehalt an Eisenoxid erscheint dieser Anreicherungsbereich der Lamellen brauner als die tonärmeren Bereiche der Zwischenlamellen. Hier ist der Ton in den Lagerungshohlräumen in deutlich geringerem Ausmaß zu finden. Entsprechend fehlt hier die eisenoxidbedingte, braunere Färbung. Dennoch ist auch hier zwischen den größeren Körnern Ton in den Kornzwischenräumen vorhanden, wenn auch in geringerer Menge.

Der Übergang zwischen den tonreicheren Lamellen und den tonärmeren Zwischenlamellen ist immer gleich entwickelt: Die Oberkante der Lamellen (gleichzeitig die Unterkante der Zwischenlamellen) ist immer sehr scharf ausgebildet, während die Unterkante der Lamellen (gleichzeitig Oberkante der Zwischenlamellen) eher diffus erscheint. Dieses Muster tritt immer auf, unabhängig davon, ob es sich um mächtigere Bänder oder dünnerne Formen handelt, ob diese Bänder wellig oder waagerecht ausgeformt sind oder es sich eher um kurze Bänderungen handelt, die eher ein netzartiges Muster bilden. Die Merkmale der Tonbänder und der tonärmeren, heller gefärbten Zwischenräume entsprechen damit sehr genau der Beschreibung der Lamellenfleckenzone in lessivierten Lössböden (LIEBEROTH, 1959). BAILLY & HARTGE (1966) und ALTEMÜLLER & BAILLY (1976) beschreiben die Lamellenfleckenzone ebenfalls als gebänderten und fleckigen Bereich mit lokaler Tonabwanderung und Anreicherung. In der Regel wird die Genese dieser Lamellenfleckenzone in den Quellen zeitlich dem letzten Glazial zugeordnet (LIEBEROTH, 1959; MESZNER et al., 2011). Lieberoth leitet dies unter anderem durch einen Befund in einem Löss-Aufschluss der Kaolintongrube Querbitzsch bei Mügeln ab, in dem die Lamellenfleckenzone die Struktur einer Eiskeilpseudomorphose nachzeichnet und sichtbar macht. In jüngeren Arbeiten (MESZNER et al., 2011; MESZNER et al., 2013; BAUMGART et al., 2013), dient die linsenförmige Sedimentstruktur der Ableitung starker Frostdynamik, die entlang der Frostrisse in Auftauphasen eine verstärkte Tonverlagerung ermöglicht. Die linsenförmige Sedimentstruktur fehlt indes in allen hier untersuchten Dünnschliffen. GUS-STOLARCYK et al. (2023) interpretieren die Entstehung von Tonbänderungen im Löss (südliches Polen) dagegen als pedogene Phänomene, die sich unabhängig von den Froststrukturen entwickeln, da die Bänderungen nicht mit den Formen der linsenförmigen Aggregate korrespondieren. Eigene Befunde in Lössgebieten Sachsens (Altmügeln, HEINRICH, 2018) zeigen, dass Phänomene, die ebenfalls sehr genau den Beschreibungen der Lamellenfleckenzone (nach LIEBEROTH, 1959) entsprechen, auch in archäologischen Grubenfüllungen ausgebildet sind. Das Vorkommen der Bänderung sowohl innerhalb als auch fortgesetzt außerhalb der Grubenfüllung belegt ein viel jüngeres Alter, da die Bänderung erst nach der Verfüllung der Grube entstanden sein kann. Dies unterstreicht, dass es sich bei der Bildung von Bänderungen auch um einen jüngeren Prozess handeln kann, der auch unter warmzeitlichen Klimabedingungen möglich ist. Im Dünnschliff 4 in der hier vorliegenden Untersuchung zieht die Bänderung über die Gangverfüllung eines zwei Zentimeter breiten, biogenen Hohlraums hinweg und setzt sich im Material der Gangverfüllung fort. Auch dieser Befund spricht eher für ein postglaziales Entstehungsalter der Bänderung.

Die Tonbänderungsphänomene in der vorliegenden Untersuchung sind mit hoher Wahrscheinlichkeit pedogen entstanden. Neben der Tatsache, dass die Bänder sich durch biogene Materialunstetigkeiten hindurch fortsetzen, zeigen sich überall in den Dünnschliffen Merkmale von rezenter bis subrezenter Tonverlagerung: In beiden Bereichen, den tonreicheren Lamellen und den tonärmeren Zwischenlamellen sind biogene Hohlräume vorhanden, entlang derer Ton im Sediment verlagert wurde/wird. Der

Ton ist entlang der Hohlräume in Form von mehrschichtigen Coatings abgelagert. Diese Tonlamellen sind je nach Eisenoxidgehalt unterschiedlich braun und graubraun gefärbt und belegen damit verschiedene Einspülungsphasen. Die dünnen Tonlamellen in den Coatings zeichnen sich überwiegend durch eine sehr gute Einregelung der Partikel aus, was sich bei der Betrachtung mit gekreuzten Polarisatoren in einer mehr oder weniger scharfen Auslöschungslinie äußert. Es ist davon auszugehen, dass diese Partikellagerung Resultat von laminaren Fließbewegungen sind, also auf eher langsame Sickerwasserbewegungen zurückzuführen sind. Zwischen den Tonlaminen finden sich an vielen Stellen jedoch auch Tonlamellen mit größeren Körnern oder gar dünne Schichten, die überwiegend aus Schluff bestehen. Dieses Feinmaterial ist nicht gut räumlich orientiert und zeigt fleckige Auslöschungsmuster bei der Betrachtung mit gekreuzten Polarisatoren. Die Transportenergie, mit der solche größeren Partikel verlagert werden können, ist größer und die schlechte Einregelung der Tonpartikel deutet darüber hinaus an, dass diese Einspülungsphasen möglicherweise mit schnelleren, eher turbulenteren Fließbewegungen erfolgt sein können.

Es treten keine Merkmale in den Dünnschliffen auf, die eine sedimentäre Bänderbildung belegen oder dafür, dass sich Ton, z. B. ausgelöst durch Diskontinuitäten des Porenraums, an Schichtgrenzen anreichert (*pedo-petrogenic lamellae* nach RAWLING, 2000). In Summe machen das Auftreten von Merkmalen pedogener Tonverlagerung und das Fehlen von Anzeichen für sedimentäre oder sedimentär-forcierte Tonbänderbildung eine pedogene Bänderentstehung sehr wahrscheinlich.

Das Vorkommen einspülungsbedingter Tonbänder wird vor allem für sandige Substrate häufig in der Literatur beschrieben (z. B. BERG, 1984; KEMP & MCINTOSH, 1989; SEMMEL & THIEMEYER, 2005), dabei gehen die Autoren aber immer von Tonverschlämmlungen aus einem hangenden, mächtigeren Eluvialhorizont und einer bänderförmigen Einspülung aus. Nach AHL & MEYER (2001) handelt es sich bei diesen Phänomenen dagegen oft um Tondisproportionierungen innerhalb eines Sedimentkörpers (vgl. KEMP & MCINTOSH, 1989), wobei Ton nach seiner Mobilisierung nur sehr kurzstreckig (Millimeter bis Dezimeter) transportiert und danach in Form einer Lamelle wieder abgeschieden wird. Der Sedimentkörper als Ganzes erfährt dabei weder eine Tonabreicherung noch eine Anreicherung, sondern lediglich eine Umverteilung. Ob es sich im vorliegenden Fall um eine Tonverlagerung vom Eluvialhorizont in einen mächtigen Einspülungsbereich (hier Entnahmetiefe der tiefsten Probe mit Bänderung: 305 cm unter GOF) oder eine lokale Umverteilung von Ton handelt, lässt sich allein aus den mikromorphologischen Befunden nicht ableiten. Möglicherweise deutet das Vorkommen von schwächer kontrastierten, dünneren Lamellen/Zwischenlamellen-Bildungen innerhalb mächtigerer Tonbänder auf eine eher kurzstreckige Umverteilung des Tons im Sinne einer Tondisproportionierung (AHL & MEYER, 2001) hin.

Aus den Befunden der Dünnschliffinterpretation lässt sich nicht belegen, dass es sich bei dem Ton, der als Coatings die rezenten/subrezenten biogenen Hohlräume auskleidet und dem zwischen den größeren Körnern angereicherten Ton, der die eigentliche Tonänderung bildet, um den gleichen Ton (Herkunft, Alter) handelt. Einerseits zieht sich die Tonänderung durch wiederverfüllte biogene Hohlräume, andererseits ist die Tonänderung auch bioturbat gestört (Wühlprozesse) und entlang biogener Hohlräume, die Tonbänder durchbrechen, also jünger sind als diese, wird/wurde Ton verspült. Diese Befunde sprechen dafür, dass die Verlagerung von Ton, unabhängig davon, ob es sich um eine Matrixdurchschlämmung (Tonanreicherung zwischen größeren Körnern) oder die Verspülung entlang präferentieller Fließwege (Coatings von Hohlräumen) handelt, möglicherweise ein über längere Zeiträume hinweg wirksamer Prozess ist, der den hier untersuchten Standort prägt.

Neben der Bioturbation und der Verlagerung von Ton sind Merkmale für pedogene Reduktions- und Oxidationsprozesse in allen Dünnschliffen zu finden. Imprägnierungen der Matrix mit Eisen- und Manganoxiden sowie Konkretionsbildungen und unterschiedlich gefärbte Toneinspülungen (Unterschiede im Eisenoxidegehalt) treten in relativ gleichmäßiger Verteilung, sowohl in tonreicheren Lamellen als auch in tonärmeren Zwischenlamellen, in allen Dünnschliffen auf. Die konzentrischen Ausfällungen von Eisenoxiden um noch erkennbare, also rezente, Wurzeln herum belegen die aktuelle Wirksamkeit der Eisendynamik.

A 2.5 Literatur

- AHL, C. & MEYER, B. (2001). Die Systematik der Böden der DBG und Probleme der Anwendung ihrer Nomenklatur auf die Charakterisierung weit verbreiteter Böden. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 96(2), 463–464.
- ALTEMÜLLER, H.J. & BAILLY, F. (1976). Mikromorphologische Untersuchungen an einer nordwestdeutschen Parabraunerde-Pseudogley-Sequenz aus Löss. *Geoderma* 16(4), 327–343.
- BAILLY, F. & HARTGE, K.H. (1966). Porenvolumen und Porengrößenverteilung in Löß-Parabraunerden im südlichen Niedersachsen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 115(1), 17–28.
- BAUMGART, P., HAMBACH, U., MESZNER, S., FAUST, D. (2013). An environmental magnetic fingerprint of periglacial loess: Records of Late Pleistocene loess–palaeosol sequences from Eastern Germany. *Quaternary International* 296, 82–93.
- BERG, R.C. (1984). The origin and early genesis of clay bands in youthful sandy soils along Lake Michigan, USA. *Geoderma* 32(1), 45–62.
- BERTRAN, P. & TEXIER, J.-P. (1999). Facies and microfacies of slope deposits. *Catena* 35, 99–121.
- BULLOCK, P., FEDOROFF, N., JONGERIUS, A., STOOPS, G., TURSINA, T. [Eds.] (1985). Handbook for soil thin section description. Waine Research Publications, Albrighton, Wolverhampton.
- GUS-STOLARCZYK, M., DREWNIK, M., MICHNO, A., SZYMANSKI, W. (2023). The origin and transformation of soil lamellae in calcareous and non-calcareous loess soils in the Central European loess belt – A case study from southern Poland. *Catena* 232, 107399.
- HEINRICH, S. (2018). Mikromorphologische Analysen im Bereich der Fundstelle AMU-07 im Vorfeld eines Kaolintagebaus bei Mügeln. Unveröffentlichtes Gutachten für das Landesamt für Archäologie Sachsen.
- KEMP, R. A. & MCINTOSH, P.D. (1989). Genesis of a texturally banded soil in Southland, New Zealand. *Geoderma* 45(1), 65–81.
- LIEBEROTH, I. (1959). Beobachtungen im nordsächsischen Lößgebiet. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 86(2), 141–155.
- MESZNER, S., FUCHS, M., FAUST, D. (2011). Loess-Palaeosol-Sequences from the loess area of Saxony (Germany). *E&G-Quaternary Science Journal* 60(1), 47–65.
- MESZNER, S., KREUTZER, S., FUCHS, M., FAUST, D. (2013). Late Pleistocene landscape dynamics in Saxony, Germany: Paleoenvironmental reconstruction using loess-paleosol sequences. *Quaternary International* 296, 94–107.
- RAWLING 3rd, J.E. (2000). A review of lamellae. *Geomorphology* 35(1-2), 1–9.
- SCARCIGLIA, F., TERRIBILE, F., COLOMBO, C. (2003). Micromorphological evidence of paleoenvironmental changes in Northern Cilento (South Italy) during the Late Quaternary. *Catena* 54, 515–536.

- SEMMLER, A. & THIEMEYER, H. (2005). Bodenhorizonte und Lagen im Taunus und dessen südlichem Vorland. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 105, 143–153.
- STOOPS, G. (2003). Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America, Inc., Madison.
- TODISCO, D. & BHIRY, N. (2008). Micromorphology of periglacial sediments from the Tayara site, Qikirtaq Island, Nunavik (Canada). *Catena* 76, 1–21.
- VAN VLIET-LANOË, B. (2010). Frost Action. In: Stoops, G., Marcelino, V. & Mees, F. [Hrsg.]: Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo. 81-108.

A 3 Auszug aus dem Endbericht zur Wiederholten Beprobung der Boden-Dauerbeobachtungsflächen des LfULG – Einzeldarstellung der BDF Schmorren, Krögis und Naundorf

A 3.1 BDF Schmorren

Beprobungsdatum: 21. Februar 2023

Nutzung: Acker

Vegetation: Spargel, Oberfläche ohne Vegetation



Abbildung A 10: Die BDF-Kernfläche am 21. Februar 2023 nach Westen gesehen



Abbildung A 11: Lage des Schurfs ca. 1,8 m süd-südwestlich von Eckpunkt P1

Bodenprofilansprache: Erodierte (Acker)Humusparabraunerde



Tabelle A 2: Profilaufnahme BDF Schmorren

untere Hori-zonttiefe [m]	Hori-zont	Beschreibung
0,30	Ap	kolluvialer mittel toniger Schluff, mittel humos, sehr schwach verfestigt, Krümel und Bröckel, Röhren, unregelmäßig mittel durchwurzelt
0,39	rAp	kolluvialer mittel toniger Schluff, schwach humos, mittel verfestigt, Klumpen, Röhren und Poren, unregelmäßig schwach durchwurzelt
0,75	II Bht	kryoturbater stark toniger Schluff, sehr schwach humos, mittel verfestigt, Plattengefüge, Röhren und Poren, unregelmäßig schwach durchwurzelt
0,90	III Sw-Bht+Bvt	kryoturbater stark toniger Schluff, sehr schwach humos, mittel verfestigt, Plattengefüge, Röhren und Poren, schwach durchwurzelt
1,55	IV Bht+Bt-Swd	solifluidaler stark toniger Schluff, sehr schwach humos, mittel verfestigt, Polyedergefüge, Poren und Röhren, schwach durchwurzelt
1,95	V fSw-ilCv	solifluidaler schwach toniger Schluff, humusfrei, mittel verfestigt, Plattengefüge, Röhren und Poren, unregelmäßig sehr schwach durchwurzelt
2,55	VI fSw-elCcv	ablualer schwach toniger Schluff, humusfrei, mittel verfestigt, Schichtgefüge, Poren, nicht durchwurzelt
4,80	VII elCcv	äolischer schwach toniger Schluff, humusfrei, mittel verfestigt, Schichtgefüge, Poren, nicht durchwurzelt

Abbildung A 12: Profil Schmorren

Vergleich der Bodenausbildung 2023 zum Leitboden

Das Profil 2023 zeigt gegenüber dem Leitprofil einen verkürzten Schicht- und Horizontaufbau. Die Hauptlage ist erodiert und der Ap-Horizont bis ca. 0,4 m Tiefe kolluvial geprägt. Darauf folgt der II Bht-

Horizont, dieser wurde in 2023 der Basislage zugeordnet. Aufgrund des fehlenden Axh-Al-Horizontes (Leitprofil) ändert sich der Bodentyp in 2023 zu Humusparabraunerde.

Die Lamellenfleckenzone ist in Profil 2023 nicht ausgebildet. Es wurden fossile Nassbodenmerkmale (Rostbänder, Flecken, Nester) im gesamten Basislagenkomplex sowie dem liegenden Löss festgestellt. Im unteren Basislagenbereich wurde aufgrund der *in situ* festgestellten erhöhten Lagerungsdichte und Rostanflügen auch geringe rezente Staunässe dokumentiert.

Der Übergang zum CaCO_3 führenden (par)autochthonen Löss vollzieht sich unterhalb des scharfen Hauptschichtwechsels, das heißt unterhalb des LFZ-Äquivalentes, in ca. 1,6 m Tiefe mit den Subschichten von V fSw-ilCv und VI fSw-ilCcv-Horizont. Diese zeigen *in situ* einen sehr geringen bis geringen CaCO_3 -Gehalt von < 2 M-% (KA5). Bei ca. 2,6 m setzt der mittel CaCO_3 führende Löss (*in situ* ≥ 2 M-%, KA5) ein. Im Leitprofil war die Grenze zum kalkführenden Löss bei ca. 2 m vorhanden.

A 3.2 BDF Krögis

Beprobungsdatum: 23. Februar 2023

Nutzung: Acker

Vegetation: offene Flächen ohne bzw. mit geringer Vegetation



Abbildung A 13: Die BDF-Kernfläche am 23. Februar 2023 nach Nordosten gesehen



Abbildung A 14: Lage des Schurfs ca. 7 m vom Eckpunkt P2 in Richtung P3

Vergleich der Bodenausbildung 2023 zum Leitboden

Das Leitprofil und das Profil 2023 sind im Substrataufbau und in der Horizontfolge insgesamt sehr ähnlich. Nur die Hauptlage mit Al-Horizont ist in 2023 gegenüber dem Leitprofil verkürzt. In 2023 ist eine deutlich ausgeprägte Lamellenfleckenzone (LFZ) ab ca. 1,1 m bis > 3 m vorhanden. In 2023 ist periglazial bänderartig angelegte oxidative Hydromorphie in der LFZ bei ca. 1,3–1,7 m erkennbar.

Bodenprofilansprache: Erodierte (Acker)Pseudogley-Parabraunerde



Tabelle A 3: Profilaufnahme BDF Krögis

untere Hori-zonttiefe [m]	Hori-zont	Beschreibung
0,20	Ap	kolluvialer mittel toniger Schluff, mittel humos, sehr schwach verfestigt, Bröckel und Krümel, Risse und Poren, unregelmäßig mittel durchwurzelt
0,35	rAp	kolluvialer mittel toniger Schluff, schwach humos, mittel verfestigt, Plattengefüge, Poren, unregelmäßig mittel durchwurzelt
0,48	II Sw-Bt+Al	kryoturbater mittel toniger Schluff, sehr schwach humos, mittel verfestigt, Subpolyeder, Röhren und Poren, unregelmäßig schwach durchwurzelt
0,75	III Sw-Bt	kryoturbater stark toniger Schuff, humusfrei, mittel verfestigt, Platten- und Subpolyedergefüge, Röhren und Poren, unregelmäßig schwach durchwurzelt
1,15	IV Swd-Bt	kryoturbater stark toniger Schluff, humusfrei, mittel verfestigt, Poren und Röhren, Plattengefüge, unregelmäßig schwach durchwurzelt
1,70	V Sw-Bt-ilCv	kryoturbater solifluidaler stark toniger Schluff, humusfrei, mittel verfestigt, Platten- und Polyedergefüge, Poren und Röhren, in Klüften schwach durchwurzelt
2,50	V Bt-ilCv	solifluidaler kryoturbater mittel toniger Schluff, humusfrei, Schichtgefüge, mittel verfestigt, Poren, nicht durchwurzelt
2,70	VI Bt-ilCv	deluvialer mittel toniger Schluff, sehr schwach humos, mittel verfestigt, Schichtgefüge, Poren, unregelmäßig sehr schwach durchwurzelt
4,60	VII ilCv	solifluidaler mittel toniger Schluff, humusfrei, Schichtgefüge, mittel verfestigt, nicht durchwurzelt
5,90	VII ilCv	ablualer stark toniger Schluff, humusfrei, mittel verfestigt, nicht durchwurzelt

Abbildung A 15: Profil Krögis

A 3.3 BDF Naundorf

Beprobungsdatum: 23. Februar 2023

Nutzung: Acker

Vegetation: Ackergras, lückenhafte Vegetation



Abbildung A 16: Die BDF-Kernfläche am 23. Februar 2023 nach Norden gesehen



Abbildung A 17: Lage des Schurfs ca. 5 m vom Eckpunkt P3 in Richtung P2 sowie P3

Bodenprofilansprache: Erodierte (Acker)Fahlerde-Pseudogley



Tabelle A 4: Profilaufnahme BDF Naundorf

untere Horizonttiefe [m]	Hori-zont	Beschreibung
0,18	Ap	kryoturbater solifluidaler mittel toniger Schluff, mittel humos, sehr schwach verfestigt, Röhren, Krümel, Bröckel, unregelmäßig stark durchwurzelt
0,31	rAp	kryoturbater solifluidaler mittel toniger Schluff, sehr schwach humos, mittel verfestigt, Plattengefüge, Poren, unregelmäßig mittel durchwurzelt
0,46	I Bt+Ael-Sw	kryoturbater solifluidaler schwach toniger Schluff, sehr schwach humos, mittel verfestigt, Subpolyeder- und Polyedergefüge, Röhren und Poren, unregelmäßig schwach durchwurzelt
0,90	II Ael+Bt-Sw	solifluidaler kryoturbater mittel toniger Schluff, humusfrei, mittel verfestigt, Röhren und Poren, Plattengefüge, schwach durchwurzelt
1,10	III Bt-Sd	kryoturbater solifluidaler stark toniger Schluff, humusfrei, Platten- und Polyedergefüge, Röhren und Poren, stark verfestigt, sehr schwach durchwurzelt
1,65	IV Sd	kryoturbater solifluidaler stark toniger Schluff, humusfrei, Platten- und Polyedergefüge, Röhren und Poren, stark verfestigt, in Klüften sehr schwach durchwurzelt

Abbildung A 18: Profil Naundorf



Fortsetzung Abbildung A 18

Fortsetzung Tabelle A 3

untere Horizonttiefe [m]	Horizont	Beschreibung
2,00	V Sd	solifluidaler kryoturbater stark toniger Schluff, humusfrei, Platten- und Polyedergefüge, Röhren und Poren, stark verfestigt, in Klüften sehr schwach durchwurzelt
2,45	VI Bt-Sd	solifluidaler kryoturbater stark schluffiger Ton, humusfrei, Plattengefüge, Poren, stark verfestigt, nicht durchwurzelt
2,65	VII Sd	solifluidaler stark schluffiger Ton, humusfrei, Platten- und Polyedergefüge, Röhren und Poren, stark verfestigt, nicht durchwurzelt
3,20	VIII Sd	solifluidaler lehmiger Ton, humusfrei, stark verfestigt, Kohärentgefüge, Poren, nicht durchwurzelt
3,65	IX fSwd	kryoturbater solifluidaler mittel toniger Schluff, humusfrei, Plattengefüge, mittel verfestigt, nicht durchwurzelt
4,10	X fSd	kryoturbater solifluidaler schwach toniger Lehm, humusfrei, stark verfestigt, nicht durchwurzelt
4,50	XI fSwd	solifluidaler kryoturbater stark sandiger Lehm, humusfrei, mittel verfestigt, nicht durchwurzelt

Vergleich der Bodenausbildung 2023 zum Leitboden

Das Leitprofil und das Profil 2023 sind im Substrataufbau und in der Horizontfolge insgesamt sehr ähnlich. Unterschiede bestehen graduell in Tiefenlagen, Bodenarten und den Erscheinungsformen der Lessivierung und Hydromorphie. Aufgrund der charakteristischen Ael-Aufhellung sowie der Verzahnung mit Bt wurde in 2023 pedogenetisch die Fahlerdeentwicklung dokumentiert. Für den Leitboden wurde Parabraunerde-Entwicklung (Al-Horizonte) dokumentiert aufgrund des für Fahlerde unzureichenden Tongehaltanstieges zu den Bt-Horizonten (KA5).

A 3.4 Literatur

SINAPIUS, R., GELLNER, L., & SCHNEIDER, R. (2023). Wiederholte Probenahme BDF 2022. Teil Acker-BDF. Unveröffentlichter Abschlussbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Herausgeber

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0; Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: Poststelle.LfULG@smekul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autoren

Ralf Sinapius
Büro für Bodenkunde Voigtsdorf
Am Kirschberg 2, 09619 Voigtsdorf
E-Mail: sinapius@bodengeologie.de
Dorit Julich
Abteilung 4 / Referat 42
Halsbrücker Str. 31a, 09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 294-2806
E-Mail: dorit.julich@lfulg.sachsen.de

Redaktion

Dorit Julich
Abteilung 4 / Referat 42
Halsbrücker Str. 31a, 09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 294-2806
E-Mail: dorit.julich@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis

Ralf Sinapius (Titelseite, S. 23, 25, 27, 32, 34, 38, 40, 43, 88-93),
Susann Heinrich (S. 63, 65–83)

Redaktionsschluss

07.07.2025

ISSN

1867-2868

Bestellservice

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.