

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Abschlussbericht zum DBU-Projekt

„Machbarkeitsstudie zum Aufbau eines Langzeitmonitoringprogramms zur Abschätzung der Auswirkungen von Klimawandel und intensiver landwirtschaftlicher Nutzung auf das archäologische Kulturerbe in sächsischen Agrarlandschaften“ (Az 37235/01)

Antragsteller

Landesamt für Archäologie Sachsen
vertreten durch die Landesarchäologin Dr. Regina Smolnik
Zur Wetterwarte 7
01109 Dresden
Leitung: Dr. Thomas Westphalen, Dr. Michael Strobel (Redaktion)

Kooperationspartner

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Referat 42 Boden, Altlasten
August-Böckstiegel-Straße 1
01326 Dresden Pillnitz

Gutshof Raitzen Drs. Kübler GbR
Landweg 1
04758 Naundorf OT Raitzen

Bearbeiter

Projektteil I
Dr. Falk Hieke, Dipl.-Geoökologin Franziska Kunth
BfBw-Büro für Bodenwissenschaft
Nonnengasse 28
09599 Freiberg
Dipl. Geol. (FH) Ralf Sinapius
Büro für Bodenkunde
Am Kirchberg 2
09619 Dorfchemnitz OT Voigtsdorf
Projektteil II
Dr. Burkart Dähne, Dipl.-Ing. (FH) Christof Schubert, Dr. Michael Strobel
Landesamt für Archäologie Sachsen
Zur Wetterwarte 7
01109 Dresden

Projektbeginn: 01. April 2021, Laufzeit: 1 Jahr, Dresden, Juni 2022

Inhaltsverzeichnis	
Tabellenverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	3
Zusammenfassung.....	7
Bericht.....	11
1. Anlass und Projektziele.....	10
2. Bodendauerbeobachtung und archäologische Denkmalpflege.....	12
2.1. Untersuchungsraum.....	12
2.2. Bodenmonitoring auf landwirtschaftlichen Nutzflächen – Arbeitsschritte und Methoden.....	12
2.2.1. Veranlassung und rechtliche Grundlagen.....	12
2.2.2. Stand des Bodenmonitorings in Deutschland.....	13
2.2.3. Methodik des Bodenmonitorings im Freistaat Sachsen.....	14
2.2.4. Ergebnisse des Bodenmonitorings im Freistaat Sachsen.....	15
2.2.5. Konzeptvergleich Bodenmonitoring.....	16
2.2.5.1. Veranlassung und rechtliche Grundlage.....	15
2.2.5.2. Standortauswahl.....	16
2.2.5.3. Datenerhebung und Parameterauswahl.....	16
2.2.5.4. Methodik.....	16
2.2.5.5. Auswertung.....	16
2.2.5.6. Ableitung von Handlungsbedarf.....	16
2.3. Auswahl möglicher Monitoring-Flächen.....	17
2.4. Vorschläge für potentielle Untersuchungsgebiete.....	22
2.5. Repräsentanz-Böden für ein archäologisches Bodenmonitoring in den Löss-Bodenlandschaften Sachsens.....	23
2.5.1 Bedeutung von Repräsentanz-Böden.....	23
2.5.2 Sächsische Lösslandschaften und Repräsentanz-Böden.....	23
2.5.3 Bodengeologische Grundlagen für Löss-Repräsentanz-Böden von Sachsen.....	24
2.5.4 Abschätzung der Übertragbarkeit der Standorteigenschaften von Untersuchungs- flächen auf nahegelegene Bodendenkmale.....	27
2.5.4.1. Untersuchungsraum 8: Wermsdorf.....	28
2.5.4.2. Untersuchungsraum 19: Salzenforst.....	30
2.5.4.3. Untersuchungsraum 22: Kitzen.....	31
2.5.4.4. Untersuchungsraum 28: Nosswitz.....	34
2.5.4.5. Untersuchungsraum 59: Schmorren.....	36
2.5.4.6. Untersuchungsraum Leuben.....	39
2.6. Ergebnisse: Vorschläge für ein Langzeitmonitoring-Konzept von archäo- logischen Denkmalflächen auf intensiv ackerbaulich genutzten Schlägen.....	45
2.6.1. Prüfung der Bodendenkmalflächen eines Gebietes oder einer Region zur archäologischen Spezifik und Relevanz.....	45
2.6.2. Vorplanung von Anzahl, Größe und Lage potentieller Monitoringfläche(n).....	45
2.6.3. Felduntersuchungen auf den Auswahlflächen.....	46
2.6.4. Festlegung der Monitoringfläche(n).....	46
2.6.5. Planung der zukünftigen Überwachung.....	46
2.6.6. Ereignisbasiertes Handeln bei gefährdungsrelevanten Veränderungen.....	46
2.6.7. Physikochemische Analysedaten.....	46

2.6.8 Abschätzungen zum Aufwand für eine Neueinrichtung von Monitoringflächen.....	47
2.6.9.. Aufwand zur Monitoring-Einrichtung in den Auswahlgebieten.....	48
2.7. Diskussion und Fazit.....	51
3. Digitale Höhenmodelle und Luftbilder.....	52
3.1 Ziele.....	52
3.2. Ausgangslage und Forschungsstand.....	53
3.3. Arbeitsschritte und Methodik.....	53
3.3.1. Datengrundlagen.....	53
3.3.2. DGM-Vergleiche.....	56
3.3.2.1. Methodik.....	56
3.3.2.2. Zwischenfazit und –diskussion.....	59
3.3.2.3. Weiterführende Analysen.....	62
3.3.2.3.1 Plausibilitätskontrollen.....	62
3.3.2.3.2 Drittmessungen.....	63
3.3.2.3.3 Verschneidung mit ABAG-Karten.....	63
3.3.2.4. Ergebnisse: Potentiale und Grenzen des Monitoring durch den DGM-Ver- gleich.....	66
3.4. Monitoring durch Fernerkundung (Orthofotos und Luftbilder).....	68
3.4.1. Archäologische Luftbilder und Orthophotos im Vergleich.....	68
3.4.2. Bewuchsmerkmale und Ausgrabungsbefunde.....	70
3.4.3. Ergebnisse.....	71
3.5. Monitoring durch einen Vergleich von Ausgrabungsbefunden?.....	71
3.6. Diskussion und Fazit.....	71
4. Öffentlichkeitsarbeit.....	72
Abbildungsteil.....	74

Tabellenverzeichnis

- Tab. 1 Untersuchungs-Standorte in räumlicher Nähe zu dokumentierten Denkmalflächen, Waldflächen sowie Lagebezug innerhalb des Freistaates Sachsen (* Lage n der BAB4 **andere Elbseite)
- Tab. 2 Überblick über dokumentierte Denkmalflächen in direkter Nähe (< 500 m) zu Untersuchungsstandorten
- Tab. 3 Kategorisierung der Untersuchungsflächen (/3/) nach Eignung für Langzeitmonitoringaufgaben bezüglich der Gefährdung von Bodendenkmalflächen (*Abkürzungen Geologie: Lol - Lösslehm / +GDr - Granodiorit / gf - Schmelzwasserablagerungen / * Gn - Gneis / Lg - Geschiebelehm / Sf - Flusssand / Sfo - Auensand / Slo - Lösssand / Sp - (Geschiebe-)-Decksand / Ufo – Auenschluff)
- Tab. 4 Böden und bodenbildende Substrate von Aufschlüssen der Catena Wermsdorf
- Tab. 5 Böden und bodenbildende Substrate von Aufschlüssen der Catena Salzenforst
- Tab. 6: Horizonte und Schichten des Standortes 22: Kitzen
- Tab. 7 Erosionsgrade nach KA5, ergänzt mit dem Beispiel Braunerde-Tschernosem.
- Tab. 8 Erosionsgrade nach KA5, ergänzt mit dem Beispiel Fahlerde-Pseudogley.
- Tab. 9 Horizonte und Schichten des Standortes 59: Schmorren
- Tab. 10: Erosionsgrade nach KA5 mit dem Beispiel Tschernosem-Parabraunerde ergänzt.
- Tab. 11 Erosionsgrade nach KA5, Beispiel Parabraunerde ergänzt.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Bis zu 1 m tiefe Erosionsrinne in einem Maisschlag bzw. im Bereich einer vorgeschichtlichen oder mittelalterlichen Siedlung südlich von Leuben (Untersuchungsraum Leuben, Foto: M. Strobel).
- Abb. 2 Winderosion
- Abb. 3 Bodenlandschaften in Sachsen (LfULG).
- Abb. 4 Schwarzerdekolluvium unter neuzeitlichem Kolluvium in Dresden-Torna (Foto: R. Sinapius)
- Abb. 5 Bodenmonitoring ist ein zwingender Bestandteil des Bodenschutzes auf Grund der Daseinsvorsorge.
- Abb. 6 Bodentypen und ihre Verteilung unter den BDF in Sachsen (Quelle vgl. Anm. 7)
- Abb. 7 Datenergebnisse auf BDF in Sachsen.
- Abb. 8 Das Standarduntersuchungsprogramm.
- Abb. 9 Schema der BDF-Flächenbeprobung
- Abb. 10 Feldarbeiten der BDF-Flächenbeprobung (Typ I)
- Abb. 11 Die Publikation BDF-Standortcharakteristika des LfULG (<https://www.boden.sachsen.de/download/STO.pdf>).
- Abb. 12 Die Publikation zur Entwicklung der Schwermetallgehalte auf BDF des LfULG (<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/34468>).
- Abb. 13 Lage von Standort 8 (Wermsdorf) und angrenzende Denkmalflächen (links), im DGM (rechts).
- Abb. 14 Lage von Standort 19 (Salzenforst) und angrenzende Denkmalflächen (links), im DGM (rechts).
- Abb. 15 Lage von Standort 22 (Kitzen) und angrenzende Denkmalflächen im DGM. Rosa schraffiert sind potentielle Reste von Wölbäckern, rote Dreiecke: geplante Aufnahmepunkte der Catena, rotes Quadrat: Standort 22, rot: Bodendenkmale.
- Abb. 16 Lage von Standort 28 (Nosswitz) und angrenzende Denkmalflächen (links), im DGM (rechts).
- Abb. 17 Lage von Standort 59 (Schmorren) und angrenzende Denkmalflächen (links), im DGM (rechts).
- Abb. 18 Bodenmosaik verschiedener Skalen, Beispiel Mittelsächsisches Lösshügelland bei Ostrau
- Abb. 19 Übersicht der Löss-Bodengroßlandschaften und zugehörige Bodenlandschaften von Sachsen.
- Abb. 20 Denkmalflächen (blau) und Bodenlandschaften im Südraum von Dresden.
- Abb. 21 Löss und Bodentypen in Sachsen.
- Abb. 22 Vereinfachtes Schema des lössstratigrafischen Zusammenhanges der Pedogenese (Ackerböden). Grafik von Meszner 2015 (rechts im Bild, eigene Ergänzung links im Bild).
- Abb. 23 Aufschluss Standort Pillnitz (links).

Abb. 24 Aufschluss Standort Pillnitz - Profilfoto Gley-Pseudogley-Braunerde aus Terrassensedimenten: 1: Ah-Horizont, 2: rAp-Horizont, 3: Sw-Bv-Horizont, 4: Go-Sw-Horizont, 5: Go-Sd-Horizont, 6: Go-Sd-Horizont, 7: Go-Horizont; LH: Hauptlage, LM: Mittellage, LB: Basislage, η: periglaziär- σ uviatile Schichtung (Foto: F. Hieke, rechts).

Abb. 25 Untersuchungsraum 8: Wernsdorf rot schraffiert: Reste von Wölbäckern, rote Dreiecke: Aufnahmepunkte der Catena, rotes Quadrat: Standort 8; orange: Bodendenkmale.

Abb. 26 Das maßgebende Bodenprofil für den Untersuchungsraum 8.

Abb. 27 Das Untersuchungsgebiet Wernsdorf mit den Kartierpunkten 8-1 bis 8-6 im DGM (oben) und im Orthophoto (unten).

Abb. 28 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Wernsdorf.

Abb. 29 Untersuchungsraum 19: Salzenforst rote Dreiecke: Aufnahmepunkte der Catena, rotes Quadrat: Standort 19; rote Flächen: Bodendenkmale.

Abb. 30 Das maßgebende Bodenprofil für den Untersuchungsraum 19 Salzenforst.

Abb. 31 Das Untersuchungsgebiet 19 Salzenforst mit den Kartierpunkten 19-1 bis 19-9 im DGM (oben) und im Orthophoto (unten).

Abb. 32 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Salzenforst.

Abb. 33 Untersuchungsraum der BDF 22: Kitzen - Profilschnitt oben: Profilschnitt, unten: Reliefsituation.

Abb. 34 Standort 22: Kitzen - Profilfoto Kolluvisol über Braunerde-Tschernosem aus Löss LH: Hauptlage, LM: Mittellage, LB: Basislage (Foto: F. Hieke).

Abb. 35 Die Topografie im Gebiet Kitzen mit der Lage der Bodenprofile K-1 bis K-8. Braune Areale sind Bodendenkmale.

Abb. 36 Das Untersuchungsgebiet im Bereich der Kartierpunkte Profile K-3 bis K-5 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 37 Die Lage der Kartierungspunkte im DGM.

Abb. 38 Bodengeologisches Löss-Normalprofil Untersuchungsraum Kitzen.

Abb. 39a Das Leitprofil Kitzen. Der A_{xh}-Horizont zeigt teilweise eine schwache Verbraunung, auf den Aggregatbruchflächen ist die Verbraunung aber kaum erkennbar. Der B_v-Horizont besitzt noch sehr geringe Humusgehalte. Die Poren und Klüfte enthalten sehr schwach ausgeprägte Ton-Humus-Cutane ((Foto: R. Sinapius).

Abb. 39b Der Horizontübergang A_{xp}/A_{xh}/B_v-A_{xh} (Foto: R. Sinapius).

Abb. 40 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Kitzen (Foto: R. Sinapius).

Abb. 41 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Untersuchungsraum Kitzen mit angrenzendem Bodendenkmal (braun).

Abb. 42 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Gebiet Kitzen mit Bodendenkmalen.

Abb. 43 Kartierung der Erosionsgrade nach KA5 (=Standort Kartierpunkt) sowie der Aufträge (dm) der Kartierpunkte K-1 bis K-8. Rotbraun: Denkmalflächen.

Abb. 44 BK-50-Flächeneinheiten und Bodenlandschaften, Bodenkarte ergänzt.

Abb. 45 Untersuchungsraum 28: Noßwitz rosa: mutmaßliche Reste von Wölbäckern im Osten und eine Deponie im Süden, rote Dreiecke: Aufnahmepunkte der Catena, rotes Quadrat: Standort 28, rote Flächen: Bodendenkmale.

Abb. 46 Die Landschaft von Untersuchungsgebiet Noßwitz, Blick nach Norden. Im Vordergrund die Hangmulde mit den Profilen (N-)11 und 12 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 47 Topografie des Untersuchungsraums Noßwitz mit Lage der Kartierpunkte.

Abb. 48 Lage der Kartierungspunkte und das Untersuchungs-Leitprofil 28 (Noßwitz) im DGM. Das Leitprofil 28 ist mit Δ L dargestellt. Braune Flächen sind Bodendenkmale.

Abb. 49 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Noßwitz (Foto: R. Sinapius).

Abb. 50 Das bodengeologische Normlprofil für das Untersuchungsgebiet Noßwitz

Abb. 51 Parabraunerde-Pseudogley (Standort 28-Leitprofil) / LfULG 2020 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 52 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Untersuchungsraum Noßwitz mit Bodendenkmalen (braun).

Abb. 53 Die Erosionsgrade nach KA5 und Aufträge (dm) im Gebiet Noßwitz lt. Feldbefunden.

Abb. 54 Untersuchungsraum 59: Schmorren - Profilschnitt N-S oben: Profilschnitt, unten: Reliefsituation, die Profillinie ist N-S orientiert

Abb. 55 Untersuchungsraum 59: Schmorren - Profilschnitt O-W oben: Profilschnitt, unten: Reliefsituation, die Profillinie verläuft in W-O Richtung

Abb. 56 Standort 59: Schmorren - Profildfoto Tschernosem-Braunerde aus Löss LH: Hauptlage, LM1, 2: Mittellage, LB1, 2: Basislage, Ln : Lage unbestimmt (Foto: F. Hieke, Farben verfälscht).

Abb. 57 Der Untersuchungsraum Schmorren, Blick nach Nordwesten u.a. zum Bereich von Profil S-9 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 58 Topografie von Gebiet Schmorren und Lage der tatsächlichen Kartierpunkte (ΔL - entspricht der des BDF-Leitprofiles).

Abb. 59 Lage der Kartierungspunkte und der Standort Profil 59 im DGM. Das Leitprofil 59 ist mit ΔL dargestellt.

Abb. 60 Bodengeologisches Löss-Normalprofil Untersuchungsraum Schmorren.

Abb. 61 Das BDF-Leitprofil „Tschernosem-Parabraunerde aus Löss/xx und diagnostische Bodenaggregate des Profils (Foto: R. Sinapius).

Abb. 62 Eiskeil-Struktur in Leitprofil BDF 59 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 63 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Schmorren (Foto: R. Sinapius).

Abb. 64 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Untersuchungsraum Schmorren mit Bodendenkmalflächen (braun).

Abb. 65 Die Erosionsgrade nach KA5 und Aufträge (dm) im Gebiet Schmorren lt. Feldbefunden.

Abb. 66 M-Horizont 12 dm und wahrscheinlich nicht verkürzter Al-Axh-Horizont in Profil S-10 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 67 Extreme Profilverkürzung mit W γ 1-Löss unter M-Horizont in Profil S-12 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 68 Dunkles Kolluvium bis mind.16 dm Tiefe im Profil S-7 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 69 Topografie des Untersuchungsraums Leuben und Lage der Kartierungspunkte.

Abb. 70 Lage der Kartierungspunkte im DGM dargestellt

Abb. 71 Bodengeologisches Löss-Normalprofil Untersuchungsraum Leuben.

Abb. 72 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Leuben (Foto: R. Sinapius).

Abb. 73 Erodierte Fahlerde aus Lösslehm in Profil L-13 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 74 Lössderivat an der Basis von Profil L-13 (Foto: R. Sinapius).

Abb. 75 Das Bodenprofil L-6 im Bohrstock (Foto: R. Sinapius).

Abb. 76 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Untersuchungsraum Leuben mit angrenzender Bodendenkmalfläche (braun).

Abb. 77 Die Erosionsgrade nach KA5 und Aufträge (dm) im Gebiet Leuben lt. Feldbefunden.

Abb. 78 Dokumentierte Aufnahmepunkte der Catena und Klassenflächen der Bodenschätzung mit Klassenzeichen (KLZ).

Abb. 79 KLZ der Boden(altschätzung).

Abb. 80 Identifikation von Erosion /Deposition auf Basis von Bodenart und Zustandsstufe. Brauner Pfeil: Deposition humosen Sedimentes führt bei Beibehaltung der Bodenart Lehm zu besseren Zustandsstufen und höheren Bodenzahlen. Roter Pfeil: Intensive Erosion führt zu sandigeren Bodenarten, schlechteren Zustandsstufen und niedrigeren Bodenzahlen. Ausgangspunkt ist das Klassenzeichen L 4 L \ddot{o} mit Bodenzahlen zwischen 65 bis 73 (roter Rahmen).

Abb. 81 Dauerbeobachtungsflächen des LfULG innerhalb der Bodenlandschaften in Sachsen (https://www.boden.sachsen.de/download/Bodenlandschaften_in_Sachsen_200309_mit_Rahmen.jpg)

Abb. 82 Übersicht der Dauerbeobachtungsflächen und archäologischen Kulturdenkmale.

Abb. 83 Technische Spezifikationen der Laserhöhenmessungen für ausgewählte Bearbeitungsgebiete (Etappen) nach GeoSN.

Abb. 84 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Laserscan-Punktklassen <http://www.landesvermessung.sachsen.de/fachliche-details-5304.html>.

Abb. 85 Oberfläche des Programms ‚las2txt.exe‘; 1 – Browserbereich mit Auswahl der Laserscandatei; 2 – Einstellungsbereich der Ausdehnung des zu filternden Bereiches; 3 – Einstellungen des Ausgabeformats.

Abb. 86 Festlegung der Testflächen am Beispiel von Hof/Stauchitz.

Abb. 87 Vergleichsübersicht der Punktdichte innerhalb der Testflächen mit 1m x 1m Raster.

Abb. 88 Statistik der Bodenmesspunkte im einfach gemessenen Bereich.

Abb. 89 Distanzanalyse zum nächstgelegenen Punkt im einfach gemessenen Bereich.

Abb. 90 Statistik der Bodenmesspunkte im Überlappungsbereich.

Abb. 91 Distanzanalyse zum nächstgelegenen Punkt im Überlappungsbereich.

Abb. 92 Oberfläche des Programms ‚Surfer‘ beim Datenimport.

Abb. 93 Oberfläche des Programms ‚Surfer‘ bei den Kriging-Einstellungen; 1 – Zuweisung der Koordinatenspalten; 2 – Ausdehnung der zu rasternden Fläche und Einstellung der Rasterdichte.

Abb. 94 Oberfläche des Programms ‚KooTransSN‘; 1 – Einstellung der Rasteroption ‚cubic‘.

Abb. 95 Hof-Stauchitz, Höhenkalibrierung der Daten von 2008 und 2018.

Abb. 96 Korrigierte Differenzberechnung der Höhenmodelle von 2008 und 2018 im Gebiet Hof/Stauchitz mit hinterlegtem Höhenmodell von 2018.

Abb. 97 Bereiche mit Auftrag von mehr als 0.05 m zwischen 2008 und 2018 im Gebiet Hof/Stauchitz.

Abb. 98 Differenzberechnung der Höhenmodelle von 2008 und 2018 im Gebiet Pitschütz.

Abb. 99 Erosionsspurenmuster zwischen Leuben und Eulitz im Sommer 1977 (nach Kramer 1981)

Abb. 100 Differenzberechnung der Höhenmodelle von 2008 und 2018 im Gebiet Leuben.

Abb. 101 Bereiche mit Abtrag von mehr als 0.1 m. Überlagerung mit Orthofoto für den Vergleich mit sichtbar erodiertem Oberboden.

Abb. 102 Leuben - dem Höhenmodell von 2018 angeglichenes Orthofoto mit Blick von Nordosten.

Abb. 103 Leuben - dem Höhenmodell von 2018 angeglichenes Orthofoto mit Blick von Südwesten.

Abb. 104 Methau, LfULG-Versuchsfläche, unkalibrierte Differenzmessung.

Abb. 105 Methau, LfULG-Versuchsfläche, korrigierte Differenzmessung.

Abb. 106 Lüttewitz, LfULG-Versuchsflächen.

Abb. 107 Waldenburg, Vergleich von Feldflächen: Direktsaatverfahren – konventionelle Bestellung.

Abb. 108 Waldenburg, Vergleich von Feldflächen: Direktsaatverfahren – konventionelle Bestellung.

Abb. 109 Waldenburg: Vergleich von Feldflächen: Direktsaatverfahren – konventionelle Bestellung.

Abb. 110 Erosionsgefährdungsstufen.

Abb. 111 Erosionsgefährdungsstufen.

Abb. 112 Leuben, KSR-M und potentieller tatsächlicher Abtrag.

Abb. 113 Leuben, KLSR-M und potentieller tatsächlicher Abtrag.

Abb. 114 Pitschütz, KSR-M und Relief.

Abb. 115 Pitschütz, KSLR-M und tatsächlicher Abtrag.

Abb. 116 Pitschütz, KSLR-M-und Auftrag.

Abb. 117 Ausschnitt aus der Karte des Thüneninstituts zur Landnutzung in der Agrarlandschaft im Untersuchungsgebiet von Pitschütz mit Legende.

Abb. 118 Der Tanzberg von Piskowitz/Prositz von Westen. Auf der Kuppe lag ein ausgedehntes Gräberfeld. Die heterogenen Bodenverhältnisse lassen sich allein am unterschiedlichen Maisaufwuchs ablesen (foto: R. Vogt).

Abb. 119 Untersuchungsgebiet Pitschütz im Orthophoto von 2018. In dem trockenen Sommer entwickelten sich Standortheterogenitäten und Bewuchsmerkmale, z. B. in kolluvial gefüllten Rinnen und Dellen, die gewöhnlich nicht in diesem Ausmaß sichtbar werden. Eingetragen sind die Fruchtarten nach der Karte des Thüneninstituts zur Landnutzung in der Agrarlandschaft (WW: Winterweizen, WG: Wintergerste, ZR: Zuckerrüben, LEG: Leguminosen, vermutlich Erbsen, WR: Winterraps).

Abb. 120 Überlagerung von entzerrtem Luftbild (1998) und tatsächlich untersuchten Grabungsbefunden.

Abb. 121 Überlagerung von entzerrtem Luftbild (1998) und tatsächlich untersuchten Grabungsbefunden.

Abb. 122 Überlagerung von entzerrtem Luftbild (1998) und tatsächlich untersuchten Grabungsbefunden.

Zusammenfassung

Anlass und Ziele

In intensiv genutzten Agrarlandschaften ist das archäologische Kulturerbe stark bedroht. Mit einer wachsenden Nutzungsintensität und dem Klimawandel steigt auch die Gefährdung des Archivs im Boden (Archivfunktion des Bodens gem. BBodSchG, §2, Abs. 2) durch Erosion, Austrocknung und mechanische Beanspruchung. Diese Prozesse verlaufen schleichend und entziehen sich bislang einer Dokumentation bzw. systematischen Beobachtung über längere Zeiträume. Für ein Langzeitmonitoring fehlen bislang Methoden und Parameter. Ziel der Machbarkeitsstudie sind daher die Evaluierung gängiger Monitoringverfahren sowie konzeptionelle Vorarbeiten für eine praxistaugliche Monitoringstrategie, die von einer Fachbehörde im Rahmen ihrer eingeschränkten personellen und finanziellen Ressourcen realisiert und auf andere Bundesländer übertragen werden kann. Zum einen wird die Übertragbarkeit standardisierter Methoden der Bodendauerbeobachtung auf archäologische Kulturdenkmale untersucht (Teil I). Zum anderen werden digitale Geländemodelle und Luftbilder herangezogen, um durch Vergleiche vorhandener Datenbestände die Auswirkungen von erosiver und technisch bedingter Bodenverlagerung über längere Zeiträume empirisch mess- und visualisierbar zu machen (Teil II).

Arbeitsschritte und Methoden

Teil I: Bodendauerbeobachtung und archäologische Denkmalpflege: Seit den 1990er Jahren betreibt der Freistaat Sachsen durch das LfULG in den unterschiedlichen Bodenlandschaften ein Standortnetz von 56 landwirtschaftlichen Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF Typ I und II). Daher wurden Denkmalflächen in unmittelbarer Umgebung von BDF-Standorten in den Lössbodenlandschaften mit besonders hoher archäologischer Relevanz und großem Gefährdungspotential recherchiert und 5 Untersuchungsflächen ausgewählt, um die bodenkundliche Kongruenz mit der Umgebung, insbesondere den Denkmälern zu prüfen. Dafür wurde das Konzept der bodengeologischen Normalprofile und der Referenz-Böden angewendet. Besonders für die mächtigen Lössböden ab ca. >1,5 m zeigte sich die Bedeutung von Löss-Paläosolen (i.S. Lieberoth 1963) für die Verifizierbarkeit der Schicht- und Horizontfolgen zur Einschätzung von Profilverkürzungen und räumlichen Beziehungen.

Teil II: Digitale Geländemodelle und Luftbilder: Der Vergleich digitaler Geländemodelle kann sich im Freistaat Sachsen auf mindestens zwei, inzwischen z.T. sogar drei Laserscan-Messungen stützen, die vom Staatsbetrieb GeoSN zur Verfügung gestellt werden. Ferner liegen für ausgewählte obertägig ablesbare Denkmale eigene SfM (Structure from motion)-Modelle des LfA vor. Nach mehreren Testdurchläufen erfolgte die Analyse der Bodenpunkte in einer Rasterweite von 0,5 m, die Berechnung eines Rasters mit einfacher Kriging-Methode im Programm Surfer, die DGM-Differenzberechnung dann mit QGIS. Während die hohe Datenqualität Lagefehler weitgehend ausschließt, machen Unschärfen der Höhengenaugigkeit eine Kalibrierung notwendig. Vergleichsberechnungen wurden für eine obertägig sichtbare Wallanlage sowie zwei besonders erosionsgefährdete Dellenrillensysteme angestellt, von denen eines zusätzlich bodenkundlich untersucht werden konnte. Ergänzt wurden die Modellvergleiche durch Plausibilitätskontrollen auf Feldflächen, u.a. Versuchsflächen des LfULG, mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung (konventionell, pfluglos, Direktsaat). Ferner wurden archäologische Luftbilder und Orthophotos visuellen Vergleichen unterzogen.

Diskussion und Ergebnisse

Teil I: Bodendauerbeobachtung und archäologische Denkmalpflege: Die ausgewählten Untersuchungsräume repräsentieren die große Bandbreite der Lössböden mit einem komplexen Nebeneinander von Boden- und Reliefformen, das auf der Basis von gebietspezifischen Normal- bzw. Referenzprofilen beschrieben werden kann. Diese ermöglichen die Interpretation reliefabhängiger Schicht- und Horizontfolgen sowie die Ermittlung von Profilverkürzungen bzw. Erosionsgraden und eignen sich für ein Monitoring archäologischer Denkmalflächen in der Umgebung. Daher können die betrachteten BDF mit einem begrenzten Aufwand für ergänzende Profilaufnahmen zur Überwachung der benachbarten Kulturdenkmale genutzt werden. Für künftige Vergleichskontrollen wird die standardisierte Dokumentation lagegenauer Indikator-Bodenprofile empfohlen, um kleinskalige, „schleichende“ Bodenverlagerungen nachzuweisen. Insbesondere die bodenphysikalischen Daten des BDF-Programms bilden für Gefährdungsabschätzungen im Kontext des *Klimawandels* auch für archäologische Belange eine wertvolle Grundlage. Deutlich komplexer und kostenintensiver ist die Einrichtung neuer Monitoringflächen, für die ein mehrstufiges Vorgehen (Auswahl, Lage, Flächeneingrenzung, Felduntersuchungen, künftige Überwachung) vorgeschlagen wird. Dabei muss eine archäologische Vorauswahl und anschließende bodenkundliche Priorisierung vorgenommen werden. Der Aufwand für die Neueinrichtung hängt von Größe bzw. Flächenheterogenität ab und kann im Einzelfall 10000 € übersteigen.

Teil II: Digitale Geländemodelle und Luftbilder: Vergleiche von digitalen Geländemodellen eignen sich für die Abschätzung prozesshafter Veränderungen an archäologischen Kulturdenkmälern, sofern – wie im Freistaat Sachsen – Laserscandaten mit hoher Qualität zur Verfügung stehen und einer Kalibrierung bzw. Plausibilitätskontrolle unterzogen werden. Insbesondere bei obertägigen Bodendenkmälern (Wallanlagen, Grabhügel etc.) ist der DGM-Vergleich ein praktikables und kostengünstiges Instrument, um Oberflächenveränderungen in Größenordnungen von weniger als 10 cm und damit schleichende schädliche Prozesse für Zeiträume von 10 bis 15 Jahren nachweisen zu können. Dies gilt gleichermaßen für größere, morphologisch differenzierte Landschaftsausschnitte, wenn (teil-)schlag- und nutzungsspezifische Faktoren ausreichend berücksichtigt werden. Obwohl bearbeitungsbedingte Unterschiede (konventionell, pfluglos, Direktsaat) bereits sichtbar werden, sollten DGM-Vergleiche vorläufig nicht ohne eine Plausibilitäts- und Einzelfallprüfung für ein generalisierendes Monitoring eingesetzt werden. Vor allem der Feldzustand zum Messungszeitpunkt hat sich im Laufe der Berechnungen als Unsicherheitsfaktor erwiesen, der noch vertiefender Untersuchungen bedarf. Da im kartographischen Vergleich zwischen DGM-Berechnungen einerseits und Erosionsprognosekarten oder ED3-Modellierungen andererseits tatsächliche Reliefveränderungen von einer prognostizierten Gefährdung abweichen können, sollten technikbedingte Verlagerungen künftig stärker in die Modellierungen einbezogen werden. Dagegen erlaubt die Auswertung von Luft- und Orthophotobildserien derzeit keine direkten und generalisierenden Schlüsse auf die Bodenbeschaffenheit oder den Zustand bzw. die Gefährdung archäologischer Strukturen. Allenfalls in Kombination mit pedologischen Untersuchungen oder Differenzmodellen lassen sich auf Fotos Bereiche mit hoher Erosionsdynamik identifizieren.

Fazit und Ausblick

Bodendauerbeobachtung und DGM-Vergleiche verschaffen dem Langzeitmonitoring archäologischer Denkmalflächen nicht zuletzt im Hinblick auf Klimawandel und Nutzungsintensivierung neue

Perspektiven. Die Kartierung und Auswertung der untersuchten Bodendauerbeobachtungsflächen erbrachte eine plausible Übertragbarkeit von BDF-Ergebnissen auf ein archäologisches Bodenmonitoring. Vorhandene BDF können für die Überwachung archäologischer Kulturdenkmal genutzt werden. Für die Neueinrichtung von Beobachtungsflächen wird ein mehrstufiges, angepasstes, denkmalgerechtes Vorgehen vorgeschlagen.

Der Vergleich digitaler Geländemodelle zur Abschätzung von Zustandsveränderungen an Bodendenkmalen hat sich als effektives und kostengünstiges Verfahren erwiesen, das jedoch im Hinblick auf nutzungsspezifische Parameter (Bodenbearbeitung, Bestandsführung) durch ergänzende Untersuchungen, u.a. UAV-Befliegungen und SfM-Modelle in Verbindung mit Landwirtschaftsbetrieben künftig noch verfeinert und verbessert werden muss.

1. Anlass und Projektziele

Als kulturelle und natürliche Archive bergen Bodendenkmale nicht nur die Relikte menschlicher Entwicklung und Kulturgeschichte, sondern gleichzeitig pflanzliche und tierische Überreste sowie Spuren der Umweltgeschichte, unter besonders günstigen Überlieferungsbedingungen sogar begrabene natürliche Böden, für die ein fossiler Boden unter dem frühbronzezeitlichen Grabhügel Bornhöck zwischen Leipzig und Halle ein herausragendes Beispiel darstellt.¹ Der seit ca. 3.800 Jahren konservierte Boden bietet eine einmalige bodengeologische Retrospektive.

In intensiv genutzten Agrarlandschaften ist das archäologische Kulturerbe stark bedroht. Mit einer wachsenden Nutzungsintensität und dem Klimawandel steigt auch die Gefährdung des Archivs im Boden durch Erosion, Austrocknung und mechanische Beanspruchung. Diese Prozesse verlaufen schleichend und entziehen sich bislang einer Dokumentation bzw. systematischen Beobachtung über längere Zeiträume. Besonders betroffen ist ackerbaulich genutztes Offenland. Auf bindigen Bodensubstraten führt vor allem Wassererosion zu Bodenabtrag (Abb. 1), auf sandigen Substraten Winderosion (Abb. 2).

Während auf der Grundlage des sächsischen Denkmalschutzgesetzes im Vorfeld von Baumaßnahmen und Rohstoffabbau präventiv Ausgrabungen zur Dokumentation des Archivs im Boden durchgeführt werden können, vollzieht sich der Verlust auf ackerbaulichen Nutzflächen durch Erosion und technikbedingte Verlagerung schleichend und undokumentiert. Um Maßnahmen ergreifen oder gar anordnen zu können, müssen schädliche Veränderungen an Bodendenkmälern nachgewiesen, erfasst sowie qualifiziert und quantifiziert werden. Für ein Langzeitmonitoring fehlen bislang Methoden und Parameter. Ziel der ebenso modellhaften wie innovativen Machbarkeitsstudie sind daher die Erhebung und Evaluierung gängiger Monitoringverfahren sowie konzeptionelle Vorarbeiten für eine praxistaugliche Monitoringstrategie, die von einer Fachbehörde im Rahmen ihrer eingeschränkten personellen und finanziellen Ressourcen - ggf. in Kooperation mit anderen Fachinstitutionen, Forschungseinrichtungen oder Dienstleistern - realisiert und auf andere Bundesländer übertragen werden kann.

Die Machbarkeitsstudie verfolgt dabei zwei Ansätze: Die eine Aufgabe (Kapitel 2) besteht darin zu prüfen, wie die seit den 1990er Jahren standardisierte Landzeitbodenbeobachtung auf archäologische Denkmalflächen übertragen werden kann. Ein Schwerpunkt liegt dabei jeweils im mittelsächsischen Lösshügelland, wo nicht nur die Denkmaldichte, sondern auch die Gefährdung des Denkmalbestandes durch schädliche Bodenveränderungen wie Erosion, mechanische Verlagerung, Schadverdichtung und Austrocknung überdurchschnittlich groß ist. Daher liegt auch die Mehrzahl der Untersuchungsstellen in diesem Naturraum. Verfolgt werden dabei drei Hauptfragestellungen:

¹ H. Meller u. T. Schunke, Die Wiederentdeckung des Bornhöck – Ein neuer frühbronzezeitlicher Fürstengrabhügel« bei Raßnitz, Saalekreis: Erster Vorbericht. In: H. Meller u.a. (Hrsg.), Arm und Reich - zur Ressourcenverteilung in prähistorischen Gesellschaften: 8. Mitteldeutscher Archäologentag vom 22. bis 24. Oktober 2015 in Halle (Saale). Tagungen des Landesmuseums für Vorgeschichte Halle (Saale) Band 14,2 (Halle 2015) 427-466.

- a. Wie repräsentativ ist eine Bodendauerbeobachtungsfläche, die direkt auf einem ungleich größeren archäologischen Kulturdenkmal oder in dessen näherer Umgebung liegt?
- b. Wie müsste eine potentielle Bodendauerbeobachtungsfläche konfiguriert sein, um Veränderungen an einem archäologischen Kulturdenkmal über größere Zeiträume und in ausreichender Repräsentativität für das Denkmal beobachten zu können?
- c. Welcher Aufwand müsste betrieben werden, um durch eine Bodendauerbeobachtung Veränderungen an einem Denkmal gezielt langfristig zu dokumentieren?

Zum anderen (Kapitel 3) sollen vor allem digitale Geländemodelle und in zweiter Linie auch Luftbilder auf ihre Potentiale untersucht werden, durch Vergleiche vorhandener Datenbestände die Auswirkungen von technisch bedingter Bodenverlagerung und Bodenerosion über längere Zeiträume empirisch mess- und visualisierbar zu machen. Dabei stehen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

- a. Welche methodischen und technischen Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit öffentlich zugängliche Laserscandaten bzw. Höhenmodelle verglichen und für Differenzberechnungen herangezogen werden können?
- b. In welchem Ausmaß lassen sich vorhandene archäologische Luftbilder und Orthophotos der Landesvermessung für Zustandsbewertungen bzw. –vergleiche archäologischer Denkmalfächen heranziehen?
- c. Welche Anhaltspunkte liefern archäologische Ausgrabungen, die im Abstand von mindestens zehn Jahren im Bereich desselben Bodendenkmals durchgeführt wurden?

2. Bodendauerbeobachtung und archäologische Denkmalpflege

2.1. Untersuchungsraum

Die Machbarkeitsstudie konzentriert sich auf jenen Teil Sachsens, der nördlich der BAB 4 die historischen, überwiegend seit der Jungsteinzeit genutzten historischen Kultur- bzw. Altsiedellandschaften einschließt. Es handelt sich um die Bodengroßlandschaften (Abb. 3) der Auen und Niederterrassen, Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands, Sander und trockene Niederungssande sowie der sandigen Platten und sandigen Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands, der Niederungen und Urstromtäler des Altmoränengebietes, der Lössböden sowie der Lösslandschaften des Berglandes (Becken, Talweitungen, Senken, Berglandhänge und Lösshügelländer). Im Fokus stehen dabei besonders die Landschaften mit lössbürtigen Bodensubstraten, auf denen die bäuerliche Besiedlung bereits in der frühen Jungsteinzeit um 5400 v. Chr. einsetzt und die agrarische Nutzung weitgehend kontinuierlich bis heute andauert. In diesen fruchtbaren Gebieten mit hohen Ertragspotentialen ist einerseits die historische Besiedlungs- und damit Denkmaldichte besonders groß, andererseits führen das erosionsanfällige Substrat sowie das bewegte Relief zu einer drastischen Gefährdung dieser archäologischen Kulturdenkmale durch Erosion und landwirtschaftliche Bearbeitung.

2.2. Bodenmonitoring auf landwirtschaftlichen Nutzflächen – Arbeitsschritte und Methoden

2.2.1. Veranlassung und rechtliche Grundlagen

Kulturell induzierte schädliche Bodenveränderungen begleiten die Menschheit spätestens seit der Bronzezeit, setzten aber möglicherweise bereits im Neolithikum ein. Erosion und Versalzung der Böden in der sumerischen Bewässerungswirtschaft leiteten den Niedergang der mesopotamischen Hochkultur ein. Auch in China führte Bodenerosion bereits seit dem Altertum zur Landaufgabe, zu Hungersnöten und zu katastrophalen Überschwemmungen des Gelben (Löss)Flusses Huang He.² In Sachsen sind erhebliche Bodenumlagerungen spätestens seit der Bronzezeit zu beobachten (Abb. 4).³

Seit dem 19. Jh., vor allem jedoch den 1960er Jahren mit der Industrialisierung der Landwirtschaft sowie der Flurbereinigung in Deutschland, kamen weitere Gefährdungskomplexe von Böden hinzu: Anorganische stoffliche Kontaminationen, z.B. radioaktive Isotope und Schwermetalle, organische stoffliche Kontaminationen, z.B. Dioxine, PCP etc., Nährstoffüberfrachtungen, v.a. Nitrat- und Phosphat-Einträge, Versauerung der Waldböden durch SO₂-Immission, Waldsterben, Bodenverdichtungen auf Grund mechanischer Überlastungen, Schädigungen der Bodenflora und Bodenfauna durch Pflanzenschutzmittel, schließlich Zerstörung und Versiegelung.

Die Liste der schädlichen Bodenveränderungen durch (fremd)stoffliche und nichtstoffliche Belastungen ist erweiterbar. Mit dem gestiegenen Umweltbewusstsein von Gesellschaft und Politik konnte 1998 das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) verabschiedet werden und 1999 in Kraft treten. Das Gesetz wird durch die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) ergänzt. Weitere

²D. R. Montgomery, Dreck - Warum unsere Zivilisation den Boden unter den Füßen verliert. Reihe Stoffgeschichten (München 2010).

³R. Sinapius, Grundlagen zum Erosionsmonitoring im Stadtgebiet Dresden. Unveröff. Abschlussbericht für das Umweltamt der Stadt Dresden (Dresden 2012).

grundlegende Regelungen zum Boden finden sich im Baugesetzbuch (BGB), Bundes-Naturschutzgesetz (BNatSchG), Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und weiteren Gesetzeswerken. Auf EU-Ebene wurde 2006 der Entwurf einer Bodenrahmenrichtlinie vorgelegt, deren Ratifizierung von einigen Staaten, auch Deutschland, bis heute blockiert wird. Die zentralen Begriffe im deutschen Bodenschutzrecht sind die Gewährleistung der Bodenfunktionen sowie die Vorsorge und der Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen. Die Notwendigkeit eines Bodenmonitorings ergibt sich aus dem Vorsorgeprinzip (Abb. 5). Ohne Kenntnis von natürlichen Ausgangszuständen können Veränderungen nicht oder nur ungenügend beurteilt werden.

Diese Notwendigkeit wird allgemein formuliert in §7 BBodSchG: „(...) Vorsorgemaßnahmen sind geboten, wenn wegen der räumlichen, langfristigen oder komplexen Auswirkungen einer Nutzung auf die Bodenfunktionen die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht. (...)“, und ebenfalls im sächsischen Kreislaufwirtschafts- und Bodenschutzgesetz §16 SächsKrWBodSchG: „Die zuständige Behörde hat darüber zu wachen, dass die abfall- und bodenschutzrechtlichen Vorschriften eingehalten und auferlegte Pflichten erfüllt werden“ (Überwachung) (...).

2.2.2. Stand des Bodenmonitorings in Deutschland

In Deutschland hat sich vor allem seit den 1990er Jahren ein umfangreiches Netz von Standorten der Bodenbeobachtung etabliert.⁴ Es existieren unterschiedliche Forschungsprojekte und Langzeitprogramme. Im Wesentlichen sind dies die bundesweite Bodenzustandserhebung Landwirtschaft 2011-2018 des Thünen-Institutes⁵, die Dauerfeldversuche zu Fragen der Pflanzenernährung, Stoffkreisläufen, Ertragssteigerungen durch agrarwissenschaftliche Forschungseinrichtungen des Bundes, der Länder sowie Universitäten⁶, die agrarmeteorologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes mit Messreihen zu Bodentemperatur und Bodenfeuchte⁷, die Musterstücke der Bodenschätzung mit Zielsetzung Einschätzung der Ertragsfähigkeit und einheitlicher Besteuerung sowie Vergabe landwirtschaftlicher Fördermittel und ökologischer Maßnahmen sowie insbesondere die Bodendauerbeobachtungsflächen der Bundesländer. Mit dem Stand 2021 dürften sich in Deutschland >10.000 teils sehr unterschiedliche Bodenmonitoringstandorte befinden. Im Freistaat Sachsen wurde seit den 1990er Jahren durch die damalige Fachbehörde Landesamt für Umwelt und Geologie ein Standortnetz von landwirtschaftlichen Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) aufgebaut: 1. Phase 1995-1998 26 BDF verteilt in verschiedenen Regionen von Sachsen 2. Phase 2002 28 BDF zur Komplettierung unterschiedlicher Bodenlandschaften 3. Phase 2006-2016 4 BDF zum Ersatz entfallener Standorte sowie 2 BDF zur Komplettierung. Insgesamt werden in Sachsen mit dem Stand von 2021 auf Acker- und Grünland 56 Bodendauerbeobachtungsflächen unterhalten.

2.2.3. Methodik des Bodenmonitorings im Freistaat Sachsen

Das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) betreibt zwei unterschiedliche Typen von BDF: 1. BDF Typ I als Basismessfläche (52 BDF) mit ca. fünfjähriger wiederholter Untersuchung, 2. BDF Typ II als Intensivmessfläche (4 BDF) mit komplexer Messstation im Dauerbetrieb (Abb. 7).⁸

⁴ <https://docplayer.org/2250216-Bodenmonitoring-in-deutschland-fuer-die-zukunftgeruestet.html>

⁵ <https://www.thuenen.de/de/thema/boden/boden-monitoring-stethoskop-am-boden>

⁶ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/boden-schuetzen/bodenbeobachten-bewerten#bodenzustandserhebung-landwirtschaft>

⁷ <https://www.boden.sachsen.de/bodenmonitoring-17257.html>

⁸ <https://www.boden.sachsen.de/15-jahre-bodenmonitoring-in-sachsen-am-30-09-01-10-2010-in-dresden-18354.html>

Die Auswahl der BDF-Standorte erfolgte nach Repräsentanz der verschiedenen Böden in den unterschiedlichen Bodenlandschaften Sachsens (Abb. 6).⁹

Weiterhin wurden folgende Standorte mit erhöhter stofflicher Deposition von Schwermetallen (Pb, As, Cd) auf Grund des Altbergbaus im Erzgebirge festgelegt: BDF Hilbersdorf bei Freiberg, BDF Neuhilbersdorf / Freiburger Mulde sowie BDF Colditz / Vereinigte Mulde zur Beobachtung der Schwermetallgehalte. Die Ersteinrichtung der BDF umfasst jeweils eine Gebietsauswahl, Prospektion und Homogenitätsprüfung der Fläche um deren Eignung abzusichern. Neben den geografischen und bodengeologischen Standard-Daten wurden bzw. werden in wiederholten Untersuchungen umfangreiche Analysen durchgeführt (Abb. 6 und 8).¹⁰ Parallel zu den Bodenuntersuchungen erfolgt die Dokumentation der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsdaten sowie die Archivierung von Rückstellproben.

Das Standarduntersuchungsprogramm der der BDF in Sachsen umfasst (Abb. 8):

BDF Typ I und BDF Typ II

Bodenphysikalische Eigenschaften: Korngrößenzusammensetzung, Wasserdurchlässigkeit, Rohdichte, Gesamtporenvolumen (Grob-, Mittel-, Feinporen)

Bodenchemische Eigenschaften: pH-Wert, potenzielle und effektive Austauschkapazität, Gesamtgehalte an Hauptelementen, Gesamtgehalte an Schwermetallen und Arsen, Gesamtgehalte an Nichtmetallen, mobile Anteile an Schwermetallen und Arsen (Extraktion), pflanzenverfügbare Nährstoffe.

BDF Typ II: Pflanzeninhaltsstoffe, Bodentemperatur, Wassergehalt, pH-Wert im Sickerwasser, elektrische Leitfähigkeit im Sickerwasser, Hauptelemente im Sickerwasser, Schwermetalle im Sickerwasser, Nichtmetalle im Sickerwasser¹¹

Standard für die Durchführung der Beprobung einer BDF Typ I

Die Beprobung einer BDF I erfolgt mit ca. fünfjähriger Wiederholung entlang eines Probenahmekreuzes, auf dessen Strahlen in vorbestimmten Abständen Mischproben getrennt aus Ober- und Unterboden entnommen werden (Abb. 9 und 10). Die Lage des Kreuzes wird bei jeder Beprobungskampagne um einen definierten Winkel weitergedreht, um die Überschneidung mit den vorherigen Entnahmestellen zu vermeiden. Anschließend erfolgt aus definierten Entnahmestellen entlang der Strahlen des Kreuzes die Herstellung von Mischproben. Die Mischproben werden getrennt aus jeweils Ober- und Unterboden hergestellt, verpackt und mit Probennummern versehen. Anhand der Mischproben kann die Bestimmung von Körnung des Fein- und Grobbodens sowie die Ermittlung der bodenchemischen Eigenschaften erfolgen (Abb. 8). Am Rand der BDF wird in der Regel ein Schurf angelegt. Die Lage des Schurfes wird im Vorfeld mit einer Peilstange (Länge: 1 bzw. 1,5 m) vorbestimmt, der aufgegrabene Boden dokumentiert und ebenfalls beprobt. Aus dem Schurf ist die Entnahme von ungestörten Proben (Stechzylinder mit 100 cm³-Volumen) möglich, die zur Ermittlung der Parameter Wasserdurchlässigkeit, Lagerungsdichte und Porenvolumen im Labor dienen.

⁹ <https://www.boden.sachsen.de/15-jahre-bodenmonitoring-in-sachsen-am-30-09-01-10-2010-in-dresden-18354.html>

¹⁰ <https://www.boden.sachsen.de/15-jahre-bodenmonitoring-in-sachsen-am-30-09-01-10-2010-in-dresden-18354.html>

¹¹ Ebd.

2.2.4. Ergebnisse des Bodenmonitorings im Freistaat Sachsen

Die bodenkundlichen Standard-Daten und Standardanalysen der BDF von Sachsen sind publiziert im Dokument „BDF-Standortcharakteristika“ (Abb. 11).¹² Darin werden die Böden der BDF bodengeologisch-bodenkundlich mittels der Leitprofile vorgestellt. Bodenkundliche Kennwerte sind in Diagrammen und Tabellen dargestellt. Die Entwicklung der Schwermetall-Gehalte ist ebenfalls publiziert.¹³ Neben den Standard-Messreihen werden aktualitätsbezogene Sonderforschungsprojekte durchgeführt. Ein Beispiel hierfür ist das Projekt „Analyse von Kohlenstoff- und Stickstoffkreisläufen an Bodendauerbeobachtungsflächen 2012-2014“ als Beitrag zur Klimawandel-Bodenforschung in Sachsen (Abb. 12).¹⁴ Anhand der Wechselwirkungen zwischen den Kompartimenten Boden, Klima und Wasser sowie durch den Einfluss der Bewirtschaftung können die Dynamik und Tendenzen der Stoffkreisläufe auf den sächsischen BDF abgeleitet und bewertet werden.¹⁵

2.2.5. Konzeptvergleich Bodenmonitoring

Das etablierte BDF-Programm des Freistaates Sachsen wird im Folgenden konzeptuell mit einem zukünftigen möglichen Langzeitmonitoring des archäologischen Kulturerbes verglichen.

2.2.5.1. Veranlassung und rechtliche Grundlage

Die Gefährdung und Zerstörung archäologischer Schutzgüter in Agrarlandschaften ist real.¹⁶ Die Bodenfunktion „Archiv der Natur- und Kulturgeschichte“ nach Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) §2 Abs. 2 ist betroffen. Nach §2 BBodSchG Absatz 3 gilt: „Schädliche Bodenveränderungen im Sinne dieses Gesetzes sind Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen.“ Somit sind grundsätzlich rechtliche Voraussetzungen für ein Bodenmonitoring archäologischer Schutzgüter gegeben.

2.2.5.2. Standortauswahl

Die Standortauswahl für ein Bodenmonitoring archäologischer Schutzgüter kann ebenfalls wie für BDF entweder nach Repräsentanz oder nach spezifischer erhöhter Gefährdung erfolgen. Beide Kriterien sollten für ein archäologisches Bodenmonitoring berücksichtigt werden. Die Flächengröße für ein archäologisches Monitoring muss entsprechend der jeweiligen Schutzgut-Situation flexibel angepasst sein, im Gegensatz zur Standardgröße von 1000 m² der BDF. Das Prinzip für BDF von Kernfläche und Umgebungsfläche muss für archäologisches Bodenmonitoring diskutiert und ggf. angepasst werden.

¹² Barth, N., Forberg, H., Sinapius, R., 2020: BDF-Standortcharakteristika. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Dresden, Download unter: <https://www.boden.sachsen.de/download/boden/BDF-Standortcharakteristik-2020.pdf>

¹³ Vgl. Anm. 8.

¹⁴ Tannert, R., Barth, N., Lausch, C., Beuge, A., 2019: Stoffkreisläufe an Bodendauerbeobachtungsflächen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)

¹⁵ Ebd.

¹⁶ Z. B. Strobel, M. u. Westphalen, T., 2019: Ist Gana noch zu retten? Über den Zustand frühmittelalterlicher Burgen im ländlichen Sachsen. In: I. Florkiewicz u. M. Wołoszyn (Hrsg.), *Gone with the wind? Early medieval central places in today rural areas between research, preservation and re-enactment*. *Analecta Archaeologica Resoviensia* 13 (Rzesów [2018] 2019) 187–214

2.2.5.3. Datenerhebung und Parameterauswahl

Die Kenntnis des Ausgangszustandes der Böden ist zwingend erforderlich für die nachfolgenden Einschätzungen der zeitlichen Entwicklung und möglichen Gefährdung. Hier sollte beachtet werden, dass neben den bereits bekannten Zeigerdaten, z.B. für die Bodenerosion, auch andere bodenbasierte Daten und Parameter festgestellt und beobachtet werden, die potentiell in der Zukunft einen Gefährdungsfaktor darstellen könnten (Vorsorge-Prinzip). Nach Möglichkeit in Kooperation mit dem LfULG sollten die bestehenden Messreihen der BDF zum Wasser- und Stoffhaushalt genutzt werden. Die Erarbeitung und Diskussion von schutzgutrelevanten Bodendaten und Parametern erfolgt im Rahmen des Projektes.

2.2.5.4. Methodik

Bestandsaufnahmen müssen in situ (analog zu BDF) durchgeführt werden. Die Ersteinrichtung einer archäologischen Bodenmonitoringfläche sollte die gesamte Komplexität des Standortes bzw. der aussagekräftigen Parameter erfassen. Die nachfolgenden Beobachtungen und Messreihen können dann spezifisch entsprechend der potentiellen sowie akuten Gefährdungsfaktoren vorgenommen werden. Die Installation von Messeinrichtungen muss erwogen werden.

2.2.5.5. Auswertung

Analog zu den BDF wird die komplexe erstmalige Bestandsaufnahme einschließlich einer Analyse und Interpretation des Gefährdungspotentials für das archäologische Schutzgut dokumentiert. Erst die gewonnenen Daten des Ist-Zustandes im Zusammenhang mit der Langzeitbeobachtung ermöglichen ein tieferes Prozessverständnis und die Ableitung von Prognosen.

2.2.5.6. Ableitung von Handlungsbedarf

Vergleichbar zum (fremd)stofflichen Bodenschutz (Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmewerte) können Bewertungsmaßstäbe auf Parameterbasis entwickelt werden. Die Maßnahmen und Strategien zur Abwendung schädlicher Bodenveränderungen müssen rechtzeitig entwickelt werden. Diese sind als Empfehlungen oder Bedingungen zur schutzgutgerechten Flächennutzung zu erarbeiten.

Standortnr.	Entfernung Untersuchungsfläche [m]	Denkmal von	Nähe Waldflächen zu	Sächsisches Lössverbreitungsgebiet*
5	< 500		X	x
6	< 500			x
8	< 500		X	x
10	< 500			x
14	< 500		X	x
18	< 500		X	x
19	< 500			x
26	< 500		X	x
27	< 500		X	
28	< 500		X	x
30	< 500**			x
33	< 500		X	x
38	< 500		X	
43	< 500		X	
44	< 500			
58	< 500		X	x
59	< 500			x
60	< 500		X	
2	700			x
3	1500		X	x
9	700			x
15	820		X	x
16	850		X	x
17	1000			x
20	1200		X	x
22	700			x
29	600			x
39	1000		X	
41	1500		X	x
42	1500		X	

Tab. 1 Untersuchungs-Standorte in räumlicher Nähe zu dokumentierten Denkmalflächen, Waldflächen sowie Lagebezug innerhalb des Freistaates Sachsen (* Lage n der BAB4 **andere Elbseite)

2.3. Auswahl möglicher Monitoring-Flächen

Um eine geeignete Auswahl von Denkmalflächen für das geplante Langzeitmonitoring zu treffen, wurden zunächst mittels GIS-Analyse bereits angelegte Untersuchungsflächen gewählt¹⁷, die sich in räumlicher Nähe zu bekannten Bodendenkmalen befinden (Tab. 1-2).¹⁸ Dazu wurde ein Pufferkreis (d = 1000 m) um jede Untersuchungsfläche gelegt und die Schnittmenge mit den Denkmalen ermittelt. Bei einer anschließenden Überprüfung der auf diese Weise selektierten Denkmalflächen wurden historische Stadt- und Dorfkern ausgeklammert, da überbaute Flächen nicht für die weiteren Untersuchungen geeignet sind. Diejenigen Untersuchungsflächen, welche keine archäologisch dokumentierten Denkmale im Umkreis von 500 m aufweisen, wurden überprüft, ob im weiteren Umfeld

¹⁷ LfULG (Hrsg.), 2020: Materialien zum Bodenschutz: Boden-Dauerbeobachtungsprogramm des LfULG in Sachsen Standortcharakteristika, Dresden /4/ LfULG, BDF-Karte:

https://www.boden.sachsen.de/download/Bodenlandschaften_in_Sachsen_200309_mit_Rahmen.jpg, Zugriff: 01.06.2021

¹⁸LfA, „ArchDm_SHP_UTM“: Shape-Datei des Landesamt für Archäologie Sachsen, projektinterne Datenübergabe; Stand: April 2021

(bis 1,5 km Entfernung) noch weitere Bodendenkmale anzutreffen sind, um mögliche Alternativflächen zu erhalten.

Denkmal-ID	Beschreibung/Datierung	Standort-Nr.
D-66140-02	Siedlungsspuren (Spätmittelalter)	5
D-55100-02	Siedlungsspuren (unbekannt)	6
D-6693a-03	Siedlungsformen (Neolithikum)	8
D-6648a-03	Siedlungsspuren (Bronzezeit) + Siedlungsspuren (Frühmittelalter) + Siedlungsspuren (Spätneolithikum)	
D-44250-05	Siedlungsspuren (Bronzezeit) + Siedlungsspuren (Spätmittelalter)	10
D-51680-02	Flachgräber (Bronzezeit) + Flachgräber (Spätneolithikum) + Siedlungsspuren (älteres Mesolithikum) + Siedlungsspuren (Spätmittelalter)	14
D-66650-05	Siedlungsspuren (Neolithikum)	18
D-66470-03	u.a. Gräber (Bronzezeit) + Gräber (Jungsteinzeit) + Gräber (Mittelalter) + Gräber (unbekannt) + Siedlung (Jungsteinzeit) + Siedlung (römische Kaiserzeit) + Siedlung (vorrömische Eisenzeit) + Sonstiges	
D-66650-11	Flachgräber (ältere römische Kaiserzeit) + Flachgräber (ältere vorrömische Eisenzeit) + Flachgräber (Spätneolithikum) + Siedlungsspuren (Frühbronzezeit) + Siedlungsspuren (Jungbronzezeit) + Siedlungsspuren	
D-16230-02	Siedlungsspuren (Bronzezeit)	19
D-14080-05	Siedlungsspuren (Bronzezeit) + Siedlungsspuren (Hochmittelalter)	
D-14080-07	Siedlungsspuren (Frühmittelalter)	
D-14080-06	Flachgräber (Römische Kaiserzeit) + Siedlungsspuren (Bronzezeit)	
D-14080-13	Siedlungsspuren (unbekannt) + Verkehrssysteme (Mittelalter)	
D-30690-06	Siedlungsformen (unbekannt) + Sonstiges (unbekannt)	26
D-30690-05	Siedlungsformen (unbekannt)	
D-30690-03	Siedlungsspuren (unbekannt)	
D-36160-03	Bergbau und Verhüttung (Hochmittelalter)	27
D-36080-19	Hauswirtschaft (Mittelalter)	
D-72400-03	Siedlungsspuren (Bronzezeit) + Siedlungsspuren (Frühmittelalter) + Siedlungsspuren (Mesolithikum)	28
D-72400-03	Siedlungsspuren (Bronzezeit) + Siedlungsspuren (Frühmittelalter) + Siedlungsspuren (Mesolithikum)	
D-72640-03	Siedlungsspuren (Bronzezeit) + Siedlungsspuren (Frühmittelalter) + Siedlungsspuren (Neolithikum) + Siedlungsspuren (Spätmittelalter) + Sonstiges (Paläolithikum)	
D-72640-19	Siedlungsspuren (15. Jh.) + Siedlungsspuren (Steinzeit)	
D-30630-04	Flachgräber (Mittelbronzezeit) + Siedlungsspuren (Bronzezeit)	30
D-72280-02	Gräber (Bronzezeit) + Gräber (Frühmittelalter) + Siedlung/Gräber (unbekannt)	33
D-87080-02	Befestigung (unbekannt)	38
D-36160-05	Verkehrssysteme (unbekannt)	43
D-89570-03	Siedlungsspuren (Neolithikum)	44
D-8647a-04	Siedlungsspuren (Frühmittelalter)	58

D-28840-04	Siedlungsspuren (unbekannt)	59
D-28840-03	Siedlung/Gräber (Spätneolithikum)	
D-28840-05	Siedlung/Gräber (Jungbronzezeit) + Siedlungsformen (Frühmittelalter) + Siedlungsformen (Vorgeschichte) + Siedlungsspuren (unbekannt)	
D-12120-16	Verkehrssysteme (Mittelalter)	60

Tab. 2 Überblick über dokumentierte Denkmalflächen in direkter Nähe (< 500 m) zu Untersuchungsstandorten

Die im GIS ausgewählten Untersuchungs- bzw. Denkmalflächen wurden tabellarisch dokumentiert und anschließend hinsichtlich weiterer Kriterien eingestuft. Zu den ausschlaggebenden Kriterien hinsichtlich der Eignung für ein Langzeitmonitoring zählen: Entfernung der Untersuchungs- von Denkmalfläche (nach Möglichkeit < 500 m), Nähe zu Wald-/Forstflächen (ermöglicht Vergleich mit landwirtschaftlich wenig bzw. unbeeinflusster Bodenentwicklung; Hinweise auf historische Landnutzung, z. B. Wölbäcker), bevorzugt eine Lage im sächsischen Lössverbreitungsgebiet, da diese Gebiete aufgrund der Substratzusammensetzung besonders erosionsgefährdet sind, weil die Reliefdynamik Erosionserscheinungen (Wasser/Wind?) begünstigt.¹⁹

¹⁹ Nutzung des DGM 2: Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN): Höheninformationen Sachsen: Digitales Geländemodell (DGM2), WMS, URL: https://geodienste.sachsen.de/wms_geosn_hoehe/guest

Standortnr.	Name	Geologie*	Reliefsituation	Ort	Lage der Denkmalfläche	Art der Eignung	Besonderheiten	Anmerkung	Eignung	Begründung
8	Wermisdorf	Lol/Lg	Hang		Acker	Forst in Nähe	Profilabfolge BDF vollständig		++	Relief vorhanden, Lg
28	Nosswitz	Lol	Hang		Acker				++	Relief vorhanden, Lol
59	Schmorren	Lol	Hang, hügelig		Acker		Schwarzerden, Griserden; Lagen sehr gut ((LH:4), LM: 7; LB: 10,5)		++	Relief vorhanden, Lol
18	Schweta	Lol	Hang		Acker				+	Relief vorhanden, Lol; in Nähe Hof/Stauchitz
19	Salzenforst	Lol/gf	Hang		Acker				+	Relief vorhanden, Lol
5	Lampertsdorf/Wermisdorf	Lg	Hang		Acker	Forst in Nähe			+ -	Relief vorhanden, Lg oberflächlich; weniger erodierbar als Lol
6	Priesteblich	Slo, Sp/Lg	Verebnung	Priesteblich	Acker		Schwarzerden auf westlicher Seite der Straße B186		+ -	kein Relief
14	Spola	Terrasse	Verebnung		Acker	Forst in Nähe		Wölbäcker angrenzenden Forsten	+ -	kein Relief; Grundwasserboden (PP-GG)
26	Radebeul	Lol/+G Dr	Hang, hügelig		Acker				+ -	Relief vorhanden, Lol
27	Freiberg	Lol/*G n	Hang		Acker				+ -	südl. der Autobahn
30	Niederwartha	Ufo, Sfo	Aue, Terrasse		Grünland				+ -	kein Relief, periodische Überschwemmungen
58	Neukollau	Terrasse	Verebnung		Acker				+ -	kein Relief, periodische Überschwemmungen möglich; Neueinrichtung

Standortnr.	Name	Geologie*	Reliefsituation	Ort	Lage der Denkmalfläche	Art der Eignung	Besonderheiten	Anmerkung	Eignung	Begründung
2	Belgern	Aue / Terrasse	Verebnung	Belgern	Acker				?	kein Relief
3	Melpitz	gf	Verebnung	Dahlen-Dübener Heide	Forst	Forst in Nähe	Wölbacker	Wölbacker unter Hügel-gräbern?	-	
10	Großenhain	Lol/Sf	Verebnung		unter Straße				-	unter Straße
33	Colditz	Sfo	Aue		Grünland				-	Aue, Überschwemmungs-/Erosionsgefährdet
38	Oybin	Lol/Sandstein	Hang, hügelig		Grünland				-	südl. der Autobahn
43	Hilbersdorf	Lol, *Gn	Hang, hügelig		Acker				-	südl. der Autobahn
44	Schlunzig/ Zw. Mulde	Aue / Terrasse	Verebnung, Aue		Acker				-	Aue, Überschwemmungs-/Erosionsgefährdet
60	Eibenstock								-	südl. der Autobahn

Tab. 3 Kategorisierung der Untersuchungsflächen (/3/) nach Eignung für Langzeitmonitoringaufgaben bezüglich der Gefährdung von Bodendenkmalflächen (*Abkürzungen Geologie: Lol - Lösslehm / +GDr - Granodiorit / gf - Schmelzwasserablagerungen / * Gn - Gneis / Lg - Geschiebelehm / Sf - Flusssand / Sfo - Auensand / Slo - Lösssand / Sp - (Geschiebe-)-Decksand / Ufo – Auenschluff)

2.4. Vorschläge für potentielle Untersuchungsgebiete

Die GIS-Auswertung ermöglichte die Auswahl von 30 Untersuchungsstandorten, die sich in der Nähe zu einer dokumentierten Bodendenkmalfläche befinden (Tab. 1). Davon liegen 18 Standorte im unmittelbaren Umfeld der Bodendenkmale, d.h. innerhalb eines Radius' von 500 m. Im Sächsischen Lössverbreitungsgebiet befinden sich 13 Untersuchungsflächen, von denen 8 eine Nähe zu angrenzenden Waldflächen aufweisen. Weitere 10 Beobachtungsstandorte liegen ebenfalls in der nördlichen Hälfte von Sachsen, sind jedoch zwischen 600 und 1500 m vom Bodendenkmal entfernt.

In Tabelle 2 sind alle Bodendenkmalflächen in direkter Nähe (≤ 500 m) zu einer Untersuchungsfläche aufgelistet. Vor allem im Umfeld der Standorte 8, 18, 19, 26, 28 und 59 sind zahlreiche Siedlungsspuren sowie Bestattungsplätze aus einem breiten Zeitspektrum (Neolithikum bis Spätmittelalter) dokumentiert. Eine Übersichtstabelle (Tab. 3) gibt einen detaillierten Überblick über die Kategorisierung der Standorte hinsichtlich ihrer Eignung für ein Langzeitmonitoring bezüglich der Erosionsgefährdung von Bodendenkmalflächen. Die fünf besonders günstig gelegenen Untersuchungsflächen (Nr. 8, 19, 22, 28 und 59) sind in den Abb. 13 bis Abb. 17 dargestellt. Die räumliche Position zu den Denkmalflächen ist in den Abbildungen ebenso zu erkennen wie das Relief (dargestellt als Schummerungsbild des DGM2) der näheren Umgebung.

Der Standort 8 (Wermsdorf) befindet sich südlich von Wermsdorf in der Bodenlandschaft „Nordwestsächsisches Lösshügel- und Vulkanitkuppenland“ in einer Randlage zu den Bodenlandschaften „Mittelsächsisches Lösshügelland“ und „Nordsächsisches Lössstief- und Plattenland“. Im näheren Umfeld sind sowohl neolithische, bronzezeitliche als auch früh- und spätmittelalterliche Siedlungsspuren dokumentiert (Abb. 13).

Etwa 2 km nordwestlich von Bautzen am Nordrand der Bodenlandschaft „Bautzener Lösshügelland“ liegt der Standort 19 (Salzenforst) in unmittelbarer Nähe zu mittelalterlichen Verkehrssystemen. Auch Siedlungsspuren aus Bronzezeit, Römischer Kaiserzeit und dem Mittelalter sind im Umfeld dokumentiert (Abb. 14).

Der Untersuchungsraum 22 (Kitzen, Abb. 15) liegt am Ostrand des Weißenfelder Lössstieflandes in Nachbarschaft von „Hallenser“ und „Leipziger Lössstiefeland“ sowie „Elster-Luppen-Auen“. Der Standort befindet sich auf einem verebneten Plateau-Ausläufer. In der Umgebung liegen Flächen, die vielleicht parallel verlaufende Wölbstrukturen anzeigen könnten (rosa schraffierte Flächen). Die nächstgelegenen bekannten Denkmalflächen sind ca. 400 m sowie 800 m entfernt.

Gelegen zwischen Geithain und Rochlitz befindet sich die Untersuchungsfläche 28 (Nosswitz) im westlichen Bereich des „Mulde-Lösshügellandes“. Der Standort liegt sowohl innerhalb als auch direkt benachbart von Arealen, in denen Siedlungsspuren aus den unterschiedlichsten Epochen vom Neolithikum bis zum Spätmittelalter verzeichnet sind (Abb. 16).

Die Fläche 59 (Schmorren) bei Ostrau befindet sich etwa 15 km südöstlich von Standort 8 sowie 5 km von Untersuchungsfläche 18 entfernt, im „Mittelsächsischen Lösshügelland“. Innerhalb eines Radius von 500 m sind diverse Gräber und Siedlungsspuren (neolithisch, bronzezeitlich, frühmittelalterlich) bekannt (Abb. 17).

Für weitere bodenkundliche Erkundungen wurde außerdem der Untersuchungsraum Leuben (Mittelsächsisches Lösshügelland) ausgewählt. Dieser Untersuchungsraum besitzt ebenfalls archäologische Bedeutung und zeigt ein besonders intensives Erosionsmuster der Böden.

2.5. Repräsentanz-Böden für ein archäologisches Bodenmonitoring in den Löss-Bodenlandschaften Sachsens

2.5.1 Bedeutung von Repräsentanz-Böden

In der Bodengeografie werden dominierende Bodenformen innerhalb jeweiliger Flächeneinheiten als Leitböden bzw. Leitboden bezeichnet. Die weiteren Bodenformen werden als Begleitböden bezeichnet. Die „Bodenform“ ist der zusammenfassende Begriff für Pedogenese (Bodentyp) und Substratzusammensetzung eines Bodenprofils und daher namensgebend für die Flächeneinheiten von bodengeografischen Kartenwerken.

Für das archäologische Bodenmonitoring wird vorgeschlagen, den Begriff „Repräsentanz-Böden“ für die charakteristischen Bodenprofile von archäologischen Monitoring-Flächen zu verwenden. Dadurch werden Widersprüche oder Verwechslungen zu bodenkundlichen, insbesondere bodengeografischen Fachtermini vermieden. Das Repräsentanz-Bodenprofil – der Repräsentanz-Boden – kann sowohl einem Leit- oder Begleitboden der BK50 oder BDF Sachsen aber auch einer anderen subdominanten Bodenform der jeweiligen bodengeografischen Flächeneinheit entsprechen. Dieser Sachverhalt ist dem heterogen kleinflächigen Bodenformen-Mosaik insbesondere des sächsischen Hügel- und Berglandes geschuldet (Abb.3).

Die Repräsentanz-Böden ermöglichen als Vergleichsböden die Beurteilung sowohl historischer als auch zukünftiger Bodenveränderungen von archäologischen Monitoringflächen. Die Bodenveränderungen umfassen räumlich die flächenhafte (horizontale) und die vertikale Dimension. In einer Monitoringfläche auftretende Abweichungen von Horizont- und Substratzusammensetzung gegenüber dem Repräsentanz-Boden können Gefährdungen für Bodendenkmale indizieren. Die Monitoringflächen können in Abhängigkeit von Geomorphologie und Flächengröße unterschiedliche Bodenformen mit Repräsentanz-Charakter aufweisen (Abb. 18). Man muss daher davon ausgehen, dass häufig 1 bis >2 Repräsentanz-Böden je Monitoringfläche heranzuziehen sind. Die Repräsentanz-Böden können nur durch bodengeologische Detailuntersuchungen spezifisch für eine Monitoringfläche verifiziert werden.²⁰

2.5.2 Sächsische Lösslandschaften und Repräsentanz-Böden

Es existieren in Sachsen, sowohl im Tiefland als auch im Hügelland, zahlreiche Bodenlandschaften mit dominanten Löss-Bodenformen. In der Übersicht (Abb. 19) sind die Löss-Bodenlandschaften Sachsens aufgeführt.²¹

²⁰<https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/p/bk50?>; R.Sinapius: Einrichtung der Bodendauerbeobachtungsflächen Neu-Kollau, Neu-Schmorren, Neu-Eibenstock. Unveröff. Abschlussbericht. LfULG. Freiberg 2017.

²¹https://www.boden.sachsen.de/download/Bodenlandschaften_in_Sachsen_200309_mit_Rahmen.jpg; LfULG (Hrsg.), 2020: Materialien zum Bodenschutz: Boden-Dauerbeobachtungsprogramm des LfULG in Sachsen Standortcharakteristika, Dresden

Diese Vielfalt von Lössbodenlandschaften ist auf die Spezifik des geologischen Unterbaus sowie der periglazialen Lithofazies mit daraus resultierenden geomorphologisch-bodengeografischen Flächeneinheiten zurückzuführen. Dadurch bestehen sowohl spezifische Horizont- und Substratfolgen (Bodenprofile, vertikale Dimension) als auch charakteristische Bodenmosaiken (Vergesellschaftung, horizontale Dimension) innerhalb der jeweiligen Bodenlandschaft. Die Repräsentanz-Böden des archäologischen Monitorings einer Bodenlandschaft können daher nicht für benachbarte Bodenlandschaften angewendet werden. Trotz der bodengeologischen Ähnlichkeitsmerkmale der Löss-Bodenformen verschiedener Bodenlandschaften müssen die Repräsentanz-Böden entsprechend der bodengeografischen Lokalisierung der archäologischen Areale ermittelt werden (Abb. 21). Im Einzelfall können sich archäologische Relevanzgebiete im Grenzbereich von Bodenlandschaften befinden. Ein Beispiel hierfür ist der Südraum von Dresden mit einer hohen Dichte prähistorischer Besiedlung (Abb. 20)²², wo gleich drei Lössbodenlandschaften aneinandergrenzen: Die Dresdner Elbtalweitung, das Mittelsächsische Lösshügelland und das Mulde-Lösshügelland. Das hat zur Folge, dass trotz räumlicher Nähe der Denkmalflächen zueinander (blau in Abb. 20) besonders vielfältige unterschiedliche Repräsentanz-Böden für die einzelnen Denkmalflächen vorhanden sind.²³ Die Repräsentanz-Böden als Vergleichsböden von Monitoringflächen müssen neben der räumlichen Nähe die geologisch-bodengeografische Vergleichbarkeit gewährleisten.

2.5.3. Bodengeologische Grundlagen für Löss-Repräsentanz-Böden von Sachsen

Die Lössen in Sachsen sind lithologisch allgemein gegliedert in

- Löss, kalkführend, i.d.R. autochthon, „Primärlöss“,
- Lösslehm, entkalkt, ± allochthon, Paläoböden möglich,
- Lössderivate, stark allochthon, Paläoböden möglich, teils mit Fremdgesteinsanteil,
- Kolluvial-Löss.

Die Lösslehme, Lössderivate und Kolluvial-Lössen werden im allgemeinen Sprachgebrauch zusammenfassend mit „Löss“ bezeichnet. Nach Lieberoth 1963 existieren vier Löss-Komplexe ($W\alpha$, $W\beta$, $W\gamma$, Riss), die in sich ebenfalls gegliedert sind.²⁴ Die Löss-Gliederung überarbeitete Meszner 2015 (Unit I – V) und konnte auf Grund von OSL-Datierungen die Löss-Stratigrafie weiterentwickeln (Abb. 22).²⁵ Für bodengeologische Untersuchungen in situ sind die Ergebnisse von Lieberoth sehr relevant, da durch dessen Arbeit pedostratigrafische Vergleiche, auch von archäologischen Böden mit Repräsentanz-Böden, ermöglicht werden.

Die Lössböden Sachsens weisen trotz der ähnlichen Korngrößen-Zusammensetzungen eine sehr große Bandbreite von Pedogenesen (Bodenentwicklungen) auf (Abb. 21), die sich in den unterschiedlichen Parametern und Eigenschaften der Löss-Böden widerspiegelt.

²² P. de Vries, Prähistorische Siedlungsplatzwahl in der Dresdner Elbtalweitung. Veröffentlichungen des Landesamtes für Archäologie, Band 58. Dresden 2013.

²³ F. Hieke, R. Sinapius, Bodenkundliche Überarbeitung der Bodenkarte Dresden. Umweltamt Dresden. Unveröff. Berichte. Dresden 2018 -2021. 23,24.

²⁴ I. Lieberoth, Lösssedimentation und Bodenbildung während des Pleistozäns in Sachsen. In: Zeitschrift für Geologie, Heft 2, Jahrgang 12, Akademie-Verlag, Berlin 1963. Richter et al. 1970: 33. H. Richter, G. Haase, I. Lieberoth, R. Ruske, R. (Hrsg.), Periglazial –Löß –Paläolithikum im Jungpleistozän (1970).

²⁵ S. Meszner 2015: Löss in Sachsen. Rekonstruktion der spätpleistozänen Landschaftsentwicklung und Paläoumwelt anhand von Löss-Paläobodensequenzen aus Sachsen (Deutschland) TUD Dresden 2015.

Die diagnostischen Horizontfolgen der sächsischen Lössböden zeigen häufig mindestens zwei Pedogenesen so dass nach KA5 verschiedene Übergangs- oder Abweichungs-Subtypen vorliegen. Die unterschiedlichen Bodenentwicklungen der Lössböden, abgesehen von Kolluvien, sind grundsätzlich durch die periglaziale Lithofazies determiniert. Diese Fazies entspricht den Löss-Schichten nach Lieberoth 1963 bzw. Meszner 2015. Je nachdem, welche Löss-Schichten den Lössboden bilden, werden die Horizontfolgen der Bodenprofile, also die Bodentypen, in spezifischer komplexer Weise vorbestimmt. Die Faktoren Untergrundgestein, Relief und Klimastufe haben für die Lössböden mit >12 dm Lössmächtigkeit nur eine subdominante bzw. sekundäre pedogenetische Funktion. Eine Abweichung von diesem engen stratigrafisch- pedogenetischen Zusammenhang bilden die Kolluvisole und die Gley-Böden.

Die Zusammenhänge der periglaziale Lithofazies, also der unterschiedlichen Löss-Schichtung, mit den Löss-Bodenformen bilden das bodengeologische Fundament der Anwendung von Repräsentanz-Böden für das archäologische Bodenmonitoring. Ohne Beachtung dieser Grundlagen sind Fehlinterpretationen bei Auswertungen und Interpretationen von Löss-Böden zwangsläufig.

Insbesondere im Mittelsächsischen Lösshügelland, in dem die Dichte prähistorischer Bodendenkmalfächen besonders groß ist, sind die mächtigen Lössböden (ab ca. >15 dm) i. S. der Lössstratigrafie von Lieberoth 1963 zusammengesetzt. Das bedeutet, dass die Deckschichtengliederung nach KA5 (Ober-, Haupt-, Mittel-, Basislage) nicht hinreichend den Profilaufbau darstellen kann. Teilweise existieren stark erodierte Böden, in denen die periglaziären Deckschichten (KA5-Lagen) völlig fehlen. Weiterhin sind im Bereich des oberflächennahen Wy1-Lösses die Übergänge von Haupt-, Mittel- und Basislage sehr unscharf ausgebildet. Das erschwert die Abschätzung von Profilverkürzungen. Es bestehen relevante Möglichkeiten von pedogenetischen Fehlinterpretationen der Lamellenfleckenzone mit den Lessivé-Entwicklungen der Haupt- bis Mittellage. Außerdem besteht die Gefahr, dass der „arcticbrownsoil“ (Wy1¹) unzutreffend als rezenter „Bv“ der Hauptlage fehlinterpretiert wird. Auf Grund seiner primären C_{org}-Gehalte ist der „arcticbrownsoil“ auch mit einem M-Horizont zu verwechseln. Die fossilen Nassböden innerhalb von Wy1-2 sind lokal bei intensiver Ausprägung ebenfalls ein kritisches Momentum der Bodenansprache bei Unkenntnis der Löss-Paläosol-Folgen von Mittelsachsen. Daher ist für die mächtigen, geringer verwitterten Lössen von Mittelsachsen einschließlich der Dresdner Elbtalweitung (Abb. 21), die Einbeziehung und Anwendung der Löss-Stratigrafie nach Lieberoth 1963 zwingend für die Felduntersuchung. Sie ermöglicht eine lössgeologisch verifizierte Bezeichnung von Schichten und Pedogenesen und somit eine objektivere Interpretation der Profilverkürzungen sowie der Lagebeziehungen der Bodenschichten.

Aus den kartierten Einzelprofilen und den vorliegenden plausiblen Altdaten eines Untersuchungsgebietes kann das bodengeologische **Normalprofil** abgeleitet werden. Weitere Synonyme der geologischen Literatur sind die Begriffe „Idealprofil“, „Generalprofil“ oder „Säulenprofil“. Das Normalprofil stellt keinen Profilschnitt mehrerer Punkte dar. Es zeigt die vollständige (idealisierte) vertikale Abfolge der teilweise auch lückenhaft auftretenden Schichten eines Gebietes für einen bestimmten stratigrafischen Abschnitt. Demgegenüber ist das „Leitprofil“ bzw. die „Leitbodenform“ (Bodengeografie) der flächenhaft häufig bis überwiegend auftretende Boden in einem Areal.

Ein bodengeologisches Normalprofil kann auf Grund seiner zusammenfassenden Darstellung die Bodenvergesellschaftung eines Gebietes sehr übersichtlich vermitteln und zeigt, welche Schichten und Horizonte die realen Repräsentanz-Bodenprofile (auch Referenz- oder Eichprofile) in spezifischen

Reliefpositionen besitzen können. Für wesentliche Untersuchungsräume dieser Studie wurden auf Grundlage der Kartierungen und des BDF-Leitprofils jeweils diese Normalprofile erstellt und reale Repräsentanz-Böden zugeordnet.

Der Deckschichtenaufbau von Böden mit geringen Lössmächtigkeiten (i.A. von 0,4 - 1,2 m) außerhalb holozäner Umlagerung soll in diesem Abschnitt näher erläutert werden. Die periglaziären Deckschichten sind durch die KA5-Lagengliederung eingeteilt (vgl. z. B. Schema in Abb. 22). Die Oberlage ist für die Lössböden nicht relevant. Auf Lössböden tritt in der oberen Schicht die Hauptlage (LH) auf. Diese reicht zumeist bis 4 (\pm 1-2) dm Tiefe unter der Geländeoberfläche. Ist Grobboden (Kiese, Gerölle, Grus und Steine) am Substrataufbau beteiligt, formiert sich dieser oft zu einer Skelettsohle, die die Hauptlage von der darunter folgenden Mittellage abtrennt. Das Substrat der Hauptlage selbst ist generell im Lösshügelland arm an Grobboden. Die Skelettsohle ist im Lösshügelland jedoch oft erst an der Basis der Mittel- oder Basislage ausgebildet. Merkmal der Hauptlage ist deren interne Substrathomogenität und damit verbunden oft auch Farbhomogenität. Die Hauptlage ist in der Regel etwas schluffreicher als das Liegende. Sie ist mit nahezu oberflächenparalleler Unterkante landschaftsunabhängig ausgebildet. Die Hauptlage ist nach jetzigem Kenntnisstand eingliedrig. Der obere Abschnitt der Hauptlage ist meist verbraunt (\rightarrow Bv-Horizont), besitzt aber im Lösshügelland flächendeckend Merkmale von Lessivierung, Nassbleichung (Grund- und Stauwasser) oder Humusanreicherung. Die Hauptlagen von Schwarzerden sind durch Humusanreicherung dunkel bis schwarz gefärbt. Im oberen Lösshügelland bis Bergland ist die Hauptlage häufig durch langanhaltendes, oberflächennah wirkendes Wasser intensiv nassgebleicht.

Unter der Hauptlage folgt die Mittellage (LM) von ca. 1-4 dm Mächtigkeit. Typischerweise endet sie in ca. 5-8 dm Tiefe der Geländeoberfläche. Ihre Untergrenze ist zumeist wellig ausgebildet und mitunter nicht mehr oberflächenparallel. Merkmal der Mittellage ist ein, besonders im Vergleich zur Hauptlage, inhomogenes Substrat und häufig Fleckigkeit. Die Mittellage kann durch eine Skelettsohle von der Basislage im Liegenden abgetrennt sein. Gegenüber der eingliedrigen Hauptlage kann die Mittellage in zwei Subzonen geteilt (LM1 und LM2) sein. Die obere Zone der Mittellage (LM1) ist stärker mit der Hauptlage verwandt, die untere Zone (LM2) lehnt sich im Habitus (Zusammensetzung, Färbung, etc.) mitunter bereits an die Basislage an. Die Mittellage ist in der Regel ein parautochthones \pm kryoturbates Sediment als Übergangsbereich zwischen Haupt- und Basislage. Sie enthält gegebenenfalls die (jüngst-) reliktsche periglaziäre Deflationsoberfläche. Die Zone der Mittellage ist im Bergland häufig bereits periglazial erodiert. Im Liegenden der Mittellage folgt die Basislage (LB). In der Regel ist ein mehrgliedriger Basislagen-Komplex vorhanden. Die Anzahl und Mächtigkeiten der Basislagen-Glieder ist abhängig von Geomorphologie und periglaziärer Lithofazies. Das liegende autochthone Gestein unterhalb der Basislage wird im lössarmen Hügelland ab ca. 8-15 dm Tiefe erreicht, im Gebiet der mächtigen Lössen überwiegend bei 15 – >20 dm Tiefe. Die Basislagen-Glieder enthalten in den Lösslandschaften häufig Paläosole. Im Altmoränengebiet von Sachsen sind ebenfalls in den Grundmoränenplatten Paläosole („tundragleysoil“) archiviert. Der fossile „Finowboden“, nachgewiesen von Nordsachsen (Frauenhain) bis in den Ostseeraum (Polen, Insel Rügen), ist für die Lösslandschaften von Sachsen nicht relevant auf Grund seines finalen spätglazialen Alters von ca. 11.500-13.000 ka BP.²⁶ Ein eventuell ursprünglich vorhandenes Merkmal dieses Paläobodens ist im sächsischen Lösshügelland bisher nicht nachgewiesen und wahrscheinlich auch nicht nachweisbar.

²⁶ N. Schlaak, Der Finowboden. Poster. LBGR 2015.

Durch die Lagengliederung nach KA5 können die bereits primär geringmächtigen Lössböden von ca. <12 dm Mächtigkeit in einem Gebiet verglichen und verifiziert werden. Die Gliederung der periglaziären Deckschichten in vier Lagen (oder Folgen, Zone u.a. Begriffe) ist seit den 1960er Jahren Standard in der Bodengeologie.²⁷ Für den Fall, dass Lagenglieder abgetragen wurden, sind die verbliebenen Lagen nur bei guter Regionalkennntnis interpretierbar. Besonders in Bohrstocksondierungen ist die Identifikation der Lagen mit Unsicherheiten behaftet. Böden aus holozänen Substraten zeigen die Lagenabfolge nicht.

Aufgrund der Aufschlusstiefe und -größe wird zur Veranschaulichung ein Profil aus Dresden/Pillnitz vorangestellt (Abb. 23-24). Der Standort befindet sich mit 116 m ü. NN sieben Meter über dem aktuellen mittleren Wasserspiegelniveau der Elbe bzw. drei bis sechs Meter über dem rezenten Auenniveau. Es ist ein Niederterrassenstandort des Elbtals. Das Solum besteht bis 12 dm Tiefe aus schluffig-lehmigen Substraten. Eine markante Schichtgrenze mit geringfügiger Skelettanreicherung in 6 dm Tiefe u. GOF trennt homogen braunen, leicht humosen lehmigen Schluff im Hangenden von periglaziär überprägten, ebenfalls z. T. lössartigen Hochflutlehm im Liegenden. Dieser Bereich ist die Hauptlage (LH). Sie ist hier etwas mächtiger ausgebildet als üblich und/oder evtl. durch Bodenauftrag (max. ca. 1 dm) etwas erhöht. Die oberen ca. 3 dm sind gepflügt (1, 2). Eine weitere markante Grenze zwischen 8-9 dm u. GOF zeichnet die untere Grenze der Mittellage (LM) nach. Sie ist wellig ausgebildet und schließt mit einem Band, welches einen erhöhten Anteil an Grobsand und Kiesen enthält zum Liegenden hin ab. Die Mittellage selbst ist fleckig, u. a. bedingt durch eine inhomogene Substratzusammensetzung. Die Basislage (LB) endet exakt bei 12 dm u. GOF. Darunter beginnt die fluviatile Schichtung (6, 7). Die deutlichste Schichtgrenze im Solum verläuft in 15 dm Tiefe u. GOF. Die periglaziären Lagen sind in Abfolge und Tiefenlage vollständig vorhanden. Bis auf eine zu vermutende geringfügige Erhöhung des Solums muss dieser Standort als autochthon angenommen werden.

2.5.4 Abschätzung der Übertragbarkeit der Standorteigenschaften von Untersuchungsflächen auf nahegelegene Bodendenkmale

Auf insgesamt sechs vorausgewählten Flächen erfolgten Abschätzungen zur Übertragbarkeit der Standorteigenschaften von Bodendauerbeobachtungsflächen auf nahegelegene archäologische Denkmale durch umfassende pedologische Untersuchungen. Dabei wurden flache Aufgrabungen kombiniert mit Bohrstockeinschlägen entlang von Catenen in Text bzw. Bild unter folgenden Kriterien dokumentiert: Bodenhorizonte (Bezeichnung, Zusammensetzung, Mächtigkeit, ...), Schichten bzw. Lagen (Art und Tiefenlage), eventuelle anthropogene Überprägungen historischer / rezenter Art, Aufschlusstiefe, etc.

Als Referenzböden wurden die Leitprofile der jeweiligen Bodendauerbeobachtungsflächen einbezogen. Diese Leitprofile sind im Ergebnis der LfULG – Prospektionen zur BDF-Einrichtung ermittelt worden (s. Kap.2.2.3.). Aus internen Gründen der Handhabung wird die Bezeichnung „Bodendauerbeobachtungsfläche“ sowohl im fortlaufenden Text als auch in den Abbildungen vermieden.

Von der Bodenprofilgrube ausgehend folgen die Catenen jeweils dem Relief, das für die Denkmalfächen typisch ist. Es sind die verschiedenen Geländepositionen - sowohl Kuppen, Hänge,

²⁷ M. Altermann u.a., Zur Kennzeichnung und Gliederung von periglaziär bedingten Differenzierungen in der Pedosphäre. Landforschung und Naturschutz 6. 2008.

Senken und Rinnen als auch Verebnungen – berücksichtigt worden. Kuppen sind häufig Zonen intensiver Erosion. In Senken und Rinnen lagert sich das erodierte Bodensubstrat ab. Es handelt sich um Depositionsbereiche. Auf den Hängen halten sich z. T. Erosion und Deposition die Waage, so dass es kaum zu Nettoabträgen kommt. Die Wahrscheinlichkeit hier wenig erodiertes Solum zu finden ist relativ hoch. Auf den Verebnungsflächen spielt Erosion eine untergeordnete Rolle. Lediglich auf besonders windexponierten Standorten bewirkt Winderosion eine Verkürzung des Solums.

Feldbodenkundlich untersucht wurden die folgenden ausgewählten Standorte bzw. Bodendenkmäler:

Untersuchungsraum 8: Wermsdorf,
Untersuchungsraum 19: Salzenforst,
Untersuchungsraum 22: Kitzen
Untersuchungsraum 28: Noßwitz,
Untersuchungsraum 59: Schmorren und
exemplarisch für ein sensibles Dellen-Rinnen-System: Untersuchungsraum Leuben.

Ferner wurden im Umfeld der Untersuchungsräume mit Hilfe des DGM2 Flächen identifiziert, welche Indizien historisch anthropogener Bodenüberprägungen zusätzlich zu den bekannten Bodendenkmälern bergen. Art und Umfang der Überprägungen haben das Potential ebenfalls die Böden der Denkmalflächen zu beeinflussen.

So sind nordöstlich des Untersuchungsraumes 8 im Wald Strukturen zu erkennen, die sich möglicherweise als Reste von Wölbackern interpretieren lassen (Abb. 13). Die Technik der Wölbackerbewirtschaftung verursachte enorme Bodenverlagerungen auf engem Raum.²⁸ In Folge der Streifenbewirtschaftung wurde Bodensubstrat stets zur zentralen Längsachse einer Wölbstruktur verschoben, so dass über den Bewirtschaftungszeitraum von Dekaden bzw. Jahrhunderten eine Struktur aus parallelen Rinnen und Scheiteln entstand, die Wellenkamm und Wellental entsprechen. Die Mächtigkeit der Aufwölbungen kann 10 Dezimeter und mehr betragen. Dieses Bodensubstrat fehlt in den „Wölbackertälern“. Oberflächennahe Artefakte jeglicher Art wurden so zerstört oder verlagert und aus dem archäologischen Kontext gerissen. Lediglich unter der zentralen Achse eines Wölbackerkamms ist das ursprüngliche Solum weitgehend erhalten und sogar durch den darüber liegenden Wölbacker geschützt. Die wellenförmig-kanalisierende Struktur begünstigt Wasser- und Winderosion. Wölbacker sind besonders im glazigen geprägten Tiefland „Ausgangspunkt“ und Ursache ausgedehnter mittelalterlicher „Dünenfelder“. Weitere derartige Strukturen finden sich in den Untersuchungsräumen 22 (Kitzen, Abb. 15) und 28 (Nosswitz, Abb. 16). Südlich angrenzend an den Standort 28 (Nosswitz) lassen bewegte Strukturen dagegen auf eine Deponie schließen.

2.5.4.1. Untersuchungsraum 8: Wermsdorf

Der Standort 8 (Wermsdorf) befindet sich etwas abseits der nächstgelegenen bekannten Denkmalfläche (Abb. 25). Das Relief weist eine bewegte Kuppen-Rinnen-Struktur auf. Die Profilgrube wurde im Bereich einer Hangverflachung mit geringer Erosionsgefahr angelegt. Die in Vollständigkeit und Tiefenlage typische Lagenabfolge für das maßgebende Bodenprofil der Fläche 8 (Abb. 26) ist hier

²⁸ Greger, O., 2015: Gedanken zum Erbe historischer Bodennutzung, In: AFZ - Der Wald, Ausgabe 21/2015. /30/ Greger, O., 2015: Zur waldbaulichen Bedeutung der Landeskulturgeschichte (Teil 1), In: AFZ - Der Wald, Ausgabe 1/2015. /31/ Greger, O., 2015: Zur waldbaulichen Bedeutung der Landeskulturgeschichte (Teil 2), In: AFZ - Der Wald, Ausgabe 2/2015.

Indiz für eine, wenn überhaupt nur geringe Verkürzung des periglaziär geprägten Solums. Die charakteristische Tiefenzonierung von Hauptlage (LH): 4 dm unter der Geländeoberfläche (u. GOF) Mittellage, zweigliedrig (LM1, 2): 8 dm u. GOF Basislage (LB): 12 dm (Unterkante nicht aufgeschlossen) gliedert das Solum in der zu erwartenden Weise. Das Substrat der Hauptlage (LH) setzt sich aus Lösslehm (dominierende Fraktion) und dem Zersatz von Ryolith zusammen. Die Hauptlage ist verbraunt und tonverarmt (Al-Bv-Horizont). Die obere Hälfte der Hauptlage bildet die Pflugzone (Ap-Horizont). Die Hauptlage endet mit einem Farb- und Substratwechsel bei ca. 4 dm u. GOF. Darunter folgt eine zweigliedrige Mittellage. Während die Hauptlage monozonal ist, weist die Mittel- und Basislage eine deutliche Mehrgliedrigkeit auf. Die obere Phase der Mittellage (LM1) endet bei ca. 6,5 dm u. GOF, die untere (LM2) zwischen 8-9 dm u. GOF. Die Lage der Schichtgrenzen wird jeweils durch die Grobskelette angezeigt (Abb. 26, braune Pfeile).

Das Bodenprofil der Fläche 8 dient als "Eichsolum" für die Beurteilung der Aufschlüsse 8-1 bis 8-6 in Bezug auf die Vollständigkeit des jeweiligen Solums (Abb. 27-28). Vollständigkeit und Mächtigkeit des Solums wird durch Erosion/Deposition verändert. Die lagenbasierte Beurteilung zielt auf die Vollständigkeit von Bodenschichten des jeweiligen Bodens unabhängig von deren pedogenetischer Ausbildung. Pedogenetische Prozesse, die zur Ausbildung diagnostischer Bodenhorizonte führen, sind beispielsweise Verbraunung → Bv-Horizont (Braunerden), Tonverlagerung → Al, Ael- und Bt-Horizont (→ Parabraun- und Fahlerden), Staunässe → Sw-, Sd-Horizonte (→ Stauwasserböden) etc.

Im Februar 2022 wurden entlang einer Catena insgesamt sechs Standorte aufgegraben und bodenkundlich dokumentiert (vgl. Tab. 4 und Abb. 28). Sie stehen im räumlichen Bezug sowohl zu Standort 8 als auch zur Denkmalfläche (D-6648a-03, Abb. 27). Die Entfernung von Standort 8 zum Zentrum der betrachteten Denkmalfläche beträgt ca. 250 m. Die Aufschlüsse 8-2 und 8-3 der Catena entsprechen in ihrer Schichtenabfolge und der Substratzusammensetzung im Wesentlichen dem Bodenprofil von Standort 8. Alle weiteren Punkte der Catena (8-1, 8-4, 8-6) sind z. T. stark erodierte bzw. kolluvial überlagerte (8-5) Varianten davon.

Fazit/Diskussion:

Zwei der sechs Catenenstandorte entsprechen in Horizont- und Schichtaufbau dem Bodenprofil der Fläche 8. Es kann angenommen werden, dass das standörtliche Verteilungsmuster von Bodengeologie und Pedogenese der Fläche 8 Wermsdorf vor dem Eingriff des Menschen in den Landschaftshaushalt identisch mit dem der benachbarten Bodendenkmalfläche ist. Diese potentielle Deckungsgleichheit von Bodeneigenschaften und Bodenausbildungen (→ Pedogenesen) benachbarter Flächen bilden die Voraussetzung für die Übertragbarkeit von Bodeninformationen. Da die natürlichen bodenkundlichen Verhältnisse der Fläche 8 Wermsdorf grundsätzlich auf die benachbarte Bodendenkmalfläche (D-6648a-03) projizierbar sind, lassen sich auch Bodeninformationen der Fläche 8 auf das Denkmal übertragen.

Nr.	Pedogenese (Bodentyp)	Substratzusammensetzung	Anmerkung
8-1	Regosol (Initialboden)	Lösslehm, Ryolithzersatz	Standort erodiert
8-2	Fahlerde-Pseudogley-Braunerde (Stauwasserboden; durch Tonverlagerung gekennzeichnet)	Lösslehm, Ryolithzersatz	vermutlich vollständige Profil und Schichtabfolge
8-3	Fahlerde-Pseudogley-Braunerde (Stauwasserboden; durch Tonverlagerung gekennzeichnet)	Lösslehm, Ryolithzersatz	vermutlich vollständige Profil und Schichtabfolge

8-4	Regosol (Initialboden)	Lösslehm, Ryolithzersatz	Standort erodiert
8-5	Pseudogley (Stauwasserboden)	Lösslehm, Ryolithzersatz	kolluvial überlagert
8-6	Regosol (Initialboden)	Lösslehm, Ryolithzersatz	Standort erodiert

Tab. 4 Böden und bodenbildende Substrate von Aufschlüssen der Catena Wermisdorf

2.5.4.2. Untersuchungsraum 19: Salzenforst

Der Untersuchungsraum 19 (Salzenforst) befindet sich auf einem gering konvex geneigten Hang. Der Standort 19 selbst grenzt unmittelbar an eine bekannte Denkmalfläche. In deren Umfeld sind drei weitere Bodendenkmale kartiert (Abb. 29).

Das Solum von Standort 19 ist wenig bis gar nicht verkürzt und somit in Horizont- und Lagenabfolge weitgehend vollständig.²⁹ Aufgrund dessen und aufgrund der unmittelbaren Nachbarschaft zur Denkmalfläche (D-14080-13) kann das Solum als Normprofil und „Eichmaß“ für den Standort gewertet werden (Abb. 30). Im Vergleich dazu sind möglicherweise Überprägungen sowie Bodenab- und -aufträge in der Fläche bewertbar. Der Untersuchungsraum erscheint aufgrund der genannten Konstellationen (Flächennähe, Solumerhalt, etc.) gut geeignet für ein mögliches Langzeitmonitoring.

Die pedogenetische Ausbildung des Solums am Standort 19 ist eine Pseudogley-Parabraunerde aus Lösslehm und Schmelzwassersedimenten (Abb. 30, SS-LL: Lol, gf). Das Solum ist von einer geringen Staunässe geprägt. Die verbraunte Hauptlage (LH, Ap- / Bv-Al-Horizont) reicht bis ca. 4 dm u. GOF. Die Bioturbation (Regenwurmröhren) führt zu einer leichten Humosität der Hauptlage (Bv-Al-Horizont). Im Liegenden schließt sich eine hydromorphe Mittellage an. Sie weist einen erhöhten Gehalt an Kiesen und Geröllen auf. Die ungestörte Hauptlage ist typischerweise sehr skelettarm. Die Mittellage (LM) endet bei ca. 6-8 dm u. GOF mit einer losen Kies-Geröllsohle. Darunter folgt der ebenfalls hydromorphe Basislagen-Komplex (LB). Die Basislagen reichen >13 dm u. GOF. Die hangende Basislage ist noch ein Lössderivat ($W\alpha\text{-}\beta$ - Löss nach Lieberoth 1963). Sie zeigt eine hohe Lagerungsdichte. Die liegenden Basislagen besitzen dominante, nach unten zunehmenden Anteile an Schmelzwassersanden und -kiesen (Abkürzung: Sgf, Ggf → generalisiert: gf) in der Substratzusammensetzung.

Die Denkmalfläche (D-14080-13) wurde im Februar 2022 an acht Stellen feldbodenkundlich prospektiert (vgl. Tab. 5, Abb. 31-32). Die Standorte reihen sich entlang einer E-W und einer N-S verlaufenden Catena (Abb. 31). Dabei entsprechen 19-1, 19-3, 19-4 und 19-5 sowohl in Schicht- und Horizontabfolge als auch in der Substratzusammensetzung (Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein) weiterstehend dem Solum von Standort 19. Die Catenen-Standorte 19-2, 19-6, 19-7 und 19-9 sind davon erodierte Varianten. Am Standort 19-2 ist die Pflugzone mit jüngerem Ziegel- und Bauschutt angereichert. Der Punkt 19-7 befindet sich auf dem Vorgewende. Die oberen Dezimeter des Solums sind hier gestört.

Fazit/Diskussion

Der Untersuchungsraum Salzenforst ist für ein mögliches Langzeitmonitoring aus den folgenden Gründen gut geeignet:

²⁹ LfJULG (Hrsg.), 2020: Materialien zum Bodenschutz: Boden-Dauerbeobachtungsprogramm des LfJULG in Sachsen Standortcharakteristika, Dresden

- a) Der Untersuchungsraum 19 (Salzenforst) befindet sich in unmittelbarer Nähe u. a. zur Denkmalfläche (D-14080-13). Die bodengeologischen Verhältnisse sind heterogen aber plausibel interpretierbar.
- b) Das Solum von Standort 19 ist in Bezug auf die Horizont- und Schichtenabfolge vollständig. Es kann als Vergleichsmaß für benachbarte Bodenstandorte herangezogen werden. Somit können mögliche Erosions- bzw. Depositionsprozesse als auch bodenverändernde Eingriffe durch menschliches Wirken auf dem Standort bewertet werden.
- c) Das Relief im Untersuchungsraum ist wenig gegliedert. Reliefgesteuerte Änderungen von Bodeneigenschaften, wie Substratzusammensetzung, Stau- und/oder Grundwasser-einfluss etc. sind gering.

Die bodengeologische, pedogenetische und oberflächenmorphologische Homogenität prädestinieren den Untersuchungsraum Salzenforst für ein bodenorientiertes Monitoring.

Nr.	Pedogenese (Bodentyp)	Substratzusammensetzung	Anmerkung
19-1	Parabraunerde-Braunerde (Tonverlagerungsboden mit verbraunter Hauptlage)	Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein	
19-2		Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein	Ziegel- und Bauschutt im Pflughorizont
19-3	Parabraunerde-Braunerde (Tonverlagerungsboden mit verbraunter Hauptlage)	Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein	
19-4	Parabraunerde-Braunerde (Tonverlagerungsboden mit verbraunter Hauptlage)	Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein	
19-5	Parabraunerde-Braunerde (Tonverlagerungsboden mit verbraunter Hauptlage)	Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein	
19-6	Regosol (RQ: Initialboden)	Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein	keine Aufgrabung, nur Bohrstock
19-7	Parabraunerde (Tonverlagerungsboden)	Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein	Vorgewende, keine Aufgrabung, nur Bohrstock
19-9	Parabraunerde (Tonverlagerungsboden)	Lösslehm, Schmelzwassersedimente allgemein	

Tab. 5 Böden und bodenbildende Substrate von Aufschlüssen der CatenaSalzenforst

2.5.4.3. Untersuchungsraum 22: Kitzen

Der Untersuchungsraum 22 (Kitzen) liegt im „Weißenfelser Lösstiefland“. Diese wellige Lösslandschaft besitzt Lössdecken von im Allgemeinen 2-3 m Mächtigkeit. Der Verlehmungs- und Umlagerungsgrad des Lösses ist niedrig. Der kalkführende Primärlöss setzt in der Regel bei 7-12 dm ein.³⁰ Lössderivat-Deckschichten sind nicht vorhanden. Der Standort 22 befindet sich auf einem verebneten Plateau-Ausläufer in einer geomorphologischer Terrassenlage der Weißen Elster. (Abb. 33, 35).

³⁰ Grahmann, R.: Geologische Karte 1:25.000 Blatt Zwenkau-Großkörschen. Sächs. Finanzministerium 1920.

In der Umgebung liegen Flächen, die eventuell parallel verlaufende Wölbäckerstrukturen anzeigen. Die nächstgelegene bekannte Denkmalfläche liegt ca. 400 m entfernt im Bereich der Ortslage von Sittel. Aufgrund der bodenlandschaftlichen Grenzlage sind im Gebiet sehr unterschiedliche Bodengesellschaften vorhanden.

Der Untersuchungsraum Kitzen wurde ausgewählt, um Differenzierungsmerkmale zur Unterscheidung der Böden, insbesondere der verschiedenen bodengeologischen Lithofazies, gegenüber den Löss-Gebieten Leuben und Schmorren zu ermitteln. Diese Gebiete weisen ebenfalls Primärlöss auf. Die Landschaft von Standort 22 besitzt weitgespannte wellige Plateaus, die von flachen Hangmulden und Dellen gegliedert sind. Insgesamt ist die Reliefenergie deutlich geringer gegenüber den Mittelsächsischen Lösslandschaften. Die kolluviale Dynamik ist flächenhaft erheblich niedriger als im Lösshügelland.

Das Leitprofil von Standort 22 ist in Tabelle 6 und Abb. 34 dargestellt. Der Axx-Horizont zeigt bereits eine schwache Verbraunung. Auf den Aggregatbruchflächen ist die Verbraunung aber nur schwach erkennbar. Im Bv-Horizont sind noch sehr geringe Humusgehalte enthalten. Die Poren und Klüfte besitzen in einem geringen Flächenanteil sehr schwach ausgeprägte Ton-Humus-Cutane. Ab ca. 8 dm Tiefe setzt der kalkhaltige Primärlöss ein. Den Untergrund des Lösses bildet ab 14 dm Tiefe ein Terrassensediment.

Nr.	Horizont	untere Tiefe [dm]	Substrat	Lage
1	Axp	3	Lösslehm	LH
2	Bv-Axx	4	Lösslehm	LH
3	Axx-Bv	7	Lösslehm	LM
4	Bv	8	Lösslehm	LB
5	Bv+elCv	9	Löss	Keine Lage
7	elCc	13	Löss	
8	elCc	14	Löss	
9	ICc	17	Terrasse	

Tab. 6: Horizonte und Schichten des Standortes 22: Kitzen³¹

Die Felduntersuchung für Fläche Kitzen umfasst 8 Standorte in verschiedenen Positionen des Mesoreliefs (Abb. 35-37):

- Plateau-Lagen (2 Aufnahmepunkte)
- Hanglagen (3 Aufnahmepunkte)
- Dellen und Mulden (3 Aufnahmepunkte).

³¹LfULG (Hrsg.), 2020: Materialien zum Bodenschutz: Boden-Dauerbeobachtungsprogramm des LfULG in Sachsen Standortcharakteristika, Dresden

Die feldbodenkundlichen Ergebnisse und das bodengeologische Normalprofil werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert. Im Anschluss erfolgen Ausführungen zur Bodenerosion. Aus den kartierten Bodenprofilen (K-1 bis K-8) und den Ergebnissen des LfULG wurde ein bodengeologisches Normalprofil für den Untersuchungsraum Kitzen erstellt (Abb. 38). Im Gegensatz zu den Gebieten Schmorren und Leuben im „Mittelsächsischen Lösshügelland“ zeigen die Bodenprofile keine Schichtlücken.

Die Löss-Stratigrafie nach Lieberoth 1963 bezieht sich vorrangig auf die Mittelsächsischen Lössprovinzen und wurde für das Gebiet Kitzen verallgemeinert übertragen. Die typische, flächenhaft vorkommende Leitbodenform des Untersuchungsraumes Kitzen ist ein „Braunerde-Tschernosem aus Löss“. Das Leitprofil von Standort 22 repräsentiert diese Bodenausbildung und ist daher als Referenzprofil für das Gebiet geeignet. Zu beachten ist, dass diese Aussage nur auf den Bereich „Weißenfelser Lössstiefland“ zutrifft, während die ca. 1-2 km weiter östlich des Untersuchungsraumes gelegenen Bodendenkmale im bodengeografischen Grenzbereich liegen und nicht mehr oder nur bedingt vergleichbar sind.

Im Referenzprofil von Standort 22 (Abb. 39a-b) ist der diffuse Übergang von Axp, Axh nach Bv ohne scharfe Abgrenzung ersichtlich. Die Humosität und Verbraunung schwanken horizontal nebeneinander in der cm- bis dm-Skala. Die Lagen-Zuordnungen nach KA5 sind nur als Analogieschluss der Pedogenese möglich. Es bestehen keine periglaziär-makromorphologischen Merkmale zur Unterscheidung von Haupt-, Mittel- und Basislage. Erst der liegende Primärlöss grenzt eindeutig die Basislage-Deckschicht ab.

Die Bodenheterogenität ist außerhalb der Muldenpositionen sehr gering, was sich in den festgestellten vergleichbaren Bodentypen widerspiegelt (Abb. 40-42). Auch die liegende Schichtzusammensetzung der B- und C-Horizonte ist relativ homogen (Abb. 40-41). Der Erosionsgrad nach KA5 wird durch ein vollständiges Vergleichsprofil (Repräsentanz- oder Referenz-Boden) ermittelt (Tab. 7). Das Leitprofil der Untersuchungsfläche 22 mit sehr geringer Profilverkürzung erfüllt diese Voraussetzungen.

Kurzzeichen	Bezeichnung	Profilverkürzung in %	Beispiel Braunerde-Tschernosem
Eg0	nicht feststellbar	0	Braunerde-Tschernosem
Eg1	sehr gering	< 10	Braunerde-Tschernosem (Bv-)Axh noch erkennbar aber reduziert
Eg2	gering	10 - < 30	Erodierter Braunerde-Tschernosem, Reste des Bv-Axh unter Axp,
Eg3	mittel	30 - < 60	stark erodierte Braunerde Bv-Axh vollständig im Axp
Eg4	hoch	60 - < 90	Braunerde, Bv teilweise im Ap
Eg5	sehr hoch	≥ 90	Pararendzina, Regosol, C-Horizont unter Ap

Tab. 7 Erosionsgrade nach KA5, ergänzt mit dem Beispiel Braunerde-Tschernosem.

In Abb. 43 sind die Erosionsgrade nach KA5 sowie die Aufträge (dm) der Kartierpunkte K-1 bis K-8 dargestellt (die Bezeichnungen entsprechen der Lage der Kartierpunkte). Die Profilverkürzungen (Erosionsgrade) sind im Gebiet sehr gering oder zu gering um in situ erkennbar zu sein. Nur Profil K-3 in einer Muldenrandlage weist mittleren Erosionsgrad auf. Die deutlichen Aufträge in den Hangmulden (8-10 dm) entstammen überwiegend dem Einzugsgebiet außerhalb des kartierten Untersuchungsraumes. Die angetroffenen Bodenformen entsprechen damit der insgesamt relativ geringen Reliefenergie des Gebietes. Die Muldenpositionen zeigen aber, dass, wenn auch nur

kleinräumig in situ feststellbar, in der reliefschwachen Lösslandschaft grundsätzlich ebenfalls mit einer Erosions- und Depositionsdynamik gerechnet werden muss.

Fazit/Diskussion

Die Bodenverhältnisse des Untersuchungsraums Kitzen besitzen Leitcharakter für die Bodenlandschaft „Weißenfelser Lössstiefland“ (Abb. 44). Denkmalflächen, die unmittelbar weiter nördlich und östlich in den angrenzenden Bodenlandschaften „Leipziger Lössstiefland“, „Hallesches Lössstiefland“ sowie „Elster-Luppe-Auen“ liegen, sind bodenkundlich nicht vergleichbar mit dem Gebiet Kitzen. Hier befinden sich Schicht- und Horizontfolgen, die nicht durch das bodengeologische Normalprofil bzw. dem Referenzprofil von Kitzen (Standort 22) repräsentiert sind. Daher können nur die unmittelbar nahegelegenen Denkmalflächen des Untersuchungsgebietes in ein vergleichendes Bodenmonitoring einbezogen werden.

2.5.4.4. Untersuchungsraum 28: Nosswitz

Der Untersuchungsraum Nosswitz befindet sich im Grenzbereich zwischen den Bodenlandschaften „Nordwestsächsisches Lösshügel- und Vulkanitkuppenland“ bzw. „Mulde-Lösshügelland“. Die Landschaft umfasst weitgespannte wellige Plateaus, Bergrücken, Kuppen und flache Mulden (Abb. 45-46) und ist durch relativ geringe Lössauflagen i. A. von 1-2(3) m Mächtigkeit charakterisiert. Der kalkführende Primärlöss (Wy1'') ist bisher in diesem Raum nicht nachgewiesen. Die Lössderivat-Decken sind im Bereich der Berge, Kuppen und Rücken ausgedünnt oder fehlen vollständig.

Im Untersuchungsgebiet sind zahlreiche archäologische Denkmalflächen wie im „Mittelsächsischen Lösshügelland“ bekannt (Abb. 45). Die Landschaft ist durch weitgespannte wellige Plateaus, Bergrücken, Kuppen und flache Mulden gekennzeichnet (Abb. 46). Der Standort 28 Nosswitz befindet sich im Bereich der Denkmalfläche D-72640-03 in nach Norden exponierter Hanglage. Die Catena im Untersuchungsraum überspannt sowohl die Plateau- und Hangbereiche als auch die potentiellen Depositionszonen in den Hangmulden (Abb. 47 und 48). Aufgrund der engräumigen Beziehung zwischen Standort 28 und den Bodendenkmalflächen kann hier eine gute Ausgangssituation für ein mögliches Langzeitmonitoring gegeben sein. Dieses Gebiet wurde auch deshalb ausgewählt, weil Differenzierungen zur Unterscheidung der Böden und Denkmalflächen der verschiedenen bodengeologischen Lithofazies, insbesondere gegenüber den Gebieten Leuben und Schmorren dargestellt werden sollen.

Die Felduntersuchung für Fläche Nosswitz umfasst 12 Standorte in verschiedenen Positionen des Mesoreliefs (Abb. 47-48):

- Plateau-Lagen (4 Aufnahmepunkte)
- Ober-, Mittel-, Unterhänge in verschiedenen Neigungsstufen (5 Aufnahmepunkte)
- Dellen und Mulden in verschiedenen Neigungsstufen (3 Aufnahmepunkte).

Die feldbodenkundlichen Ergebnisse und das bodengeologische Normalprofil werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert (Abb. 49). Im Anschluss erfolgen Ausführungen zur Bodenerosion. Die aktuelle Löss-Stratigrafie nach Meszner 2015 (Unit I – V) wurde nicht verwendet auf Grund der

feldgeologischen Relevanz von Lieberoth 1963. Die ursprünglich dominant vorhistorisch vorkommenden, nicht erodierten Böden des Untersuchungsraumes Nosswitz sind

- a) Parabraunerde- bis Fahlerde-Pseudogley aus Lösslehm über sehr tiefer Rhyolithverwitterung,
- b) Pseudogley-Fahlerde aus Lösslehm über sehr tiefer Rhyolithverwitterung,
- c) Braunerde-Fahlerde und Fahlerde aus Lösslehm über sehr tiefer Rhyolithverwitterung.

Die Lessivé-Pseudogley-Böden von a) und b) gehen in der Fläche sehr diffus ineinander über und können nur in sehr großem Maßstab ab ca. M 1:500-1000 dargestellt werden. Von diesen Böden deutlich abgegrenzt sind die anhydromorphen Braunerde-Fahlerde bis Fahlerde-Typen von c). Diese treten in Hangdellen als eigene periglaziale Lithofazies mit nichthydromorpher Lössderivat-Basislage auf. Diese Löss-Schicht ist ein Schwemmlöss und eventuell ein Äquivalent zum Wγ1'''-Löss (allochthoner „arcticbrownsoil“).

Daher können für den Untersuchungsraum Nosswitz zwei Referenz-Bodenprofile mit relativ vollständiger Schicht- und Horizontfolge festgelegt werden (Abb. 49-50):

- 1) Für die Gruppe a) und b) das Standort 28 - Leitprofil mit der Bodenform Parabraunerde-Pseudogley aus Lösslehm
- 2) Für Gruppe c) das Profil N-9 mit der Bodenform Braunerde-Fahlerde aus Lösslehm.

Die Gruppe der Pseudogley-Kolluvisole in den Hauptmulden des Gebietes bilden ebenfalls eine abgrenzbare Einheit mit spezifischer periglaziärer Lithofazies. Insofern diese Böden archäologische Relevanz bekommen, wäre für diese Böden ein weiteres Referenz-Profil festzulegen.

Die größte flächenhafte Bedeutung für Gebiet Nosswitz haben die Lessivé-Pseudogley-Übergangstypen (Bodengruppen a) und b), s.o.) Für diese Böden ist das Leitprofil 28 als Referenzprofil geeignet (Abb. 50). Dieser Leitboden ist zugleich ein typischer Vertreter für die Bodenlandschaft Mulde-Lösshügelland.

Im Folgenden werden Erosion, Profilverkürzungen und Aufträge im Gebiet vorgestellt und diskutiert. Der Erosionsgrad nach KA5 wird am Beispiel des Subtypes Fahlerde-Pseudogley in Tabelle 8 dargestellt.

Kurzzeichen	Bezeichnung	Profilverkürzung in %	Beispiel Fahlerde-Pseudogley
Eg0	nicht feststellbar	0	Fahlerde-Pseudogley
Eg1	sehr gering	< 10	Fahlerde-Pseudogley Ael-Sw noch erkennbar aber reduziert
Eg2	gering	10 - < 30	Erodierter Fahlerde-Pseudogley Reste des Ael-Sw unter Ap, geringe Bt-Verzahnung
Eg3	mittel	30 - < 60	stark erodierter Fahlerde-Pseudogley Axl-Sw-Ael vollständig im Ap Ap teilweise im Bt
Eg4	hoch	60 - < 90	sehr stark erodierter Parabraunerde-Pseudogley Ael-Sw vollständig erodiert, Ap im (Ael+)Bt-Sd, Bt-Sd unter Ap
Eg5	sehr hoch	≥ 90	Pseudogley Sd unter Ap

Tab. 8 Erosionsgrade nach KA5, ergänzt mit dem Beispiel Fahlerde-Pseudogley.

In Abb. 53 sind die Erosionsgrade nach KA5 (= Standort Kartierpunkt) sowie die Aufträge (M-Horizonte) der Kartierpunkte N-1 bis N-12 kartiert. Braune Areale sind die Denkmalflächen, das Leitprofil ist mit **Δ L** bezeichnet. Im Plateaubereich wurde sehr geringe bis geringe Erosion festgestellt (Profile N-1 bis N-4). Die liegende Rhyolithverwitterung befindet sich in dieser Reliefposition höher gegenüber den Hanglagen. Das ist auf die periglaziale Lithofazies zurückzuführen und stellt keine kulturell bedingte Profilverkürzung dar. Die Hänge sind gering erodiert, kleinstflächig kann auch ein mittlerer Erosionsgrad vorhanden sein. In den großen Hangmulden sind Aufträge bis 9 dm Mächtigkeit festzustellen. Teilweise zeigen die Böden der Hangmulden auch vorausgegangene hohe Erosionsgrade mit starker Profilverkürzung. Die Denkmalflächen befinden sich nach derzeitigem Kenntnisstand überwiegend außerhalb der großen Hauptmulden.

Fazit und Diskussion

Das Gebiet Nosswitz weist eine hohe Boden-Heterogenität auf (Abb. 52). Die Feldergebnisse zeigen aber eine plausible reliefabhängige Schicht- und Horizontfolge. Die kartierten Böden konnten in einem konsistenten bodengeologischen Normalprofil zusammengefasst werden. Das Leitprofil von Standort 28 besitzt eine sowohl bodenlandschaftlich als auch gebietstypische Schicht- und Horizontfolge. Daher sind die Ergebnisse plausibel für ein archäologisches Bodenmonitoring der Umgebung verwendbar.

Der Untersuchungsraum kann trotz der auftretenden Komplexität als geeignet für ein archäologisches Bodenmonitoring eingeschätzt werden. Die hier nachgewiesenen Deckschichten und Bodenvergesellschaftung sind unter Beachtung der Gesteinsvielfalt charakteristisch für das westliche und südliche Lösshügelland Sachsens, d. h. dem „Mulde-Lösshügelland“ und dem „Vorerzgebirgischen Becken“.

2.5.4.5. Untersuchungsraum 59: Schmorren

Der Untersuchungsraum Schmorren befindet sich in der Bodenlandschaft „Mittelsächsisches Lösshügelland“ im Norden des kulturgeografischen Raumes der „Lommatzscher Pflege“. Diese typische Lösshügellandschaft besitzt bezogen auf Sachsen die größten Lössmächtigkeiten. Sie betragen flächenhaft 5- 10 m, abschnittsweise auch >10 m. Die Landschaft besitzt welligen Charakter mit Plateaus, Riedeln und Mulden (Abb. 54-55, 57-59). Die Abbildung 57 zeigt den Abschnitt der Standorte S-4, S-9 und S-10 im Bereich der Denkmalfläche.

In ca. 200 m Entfernung zum Standort 59 (Schmorren) ist in östlicher Richtung die Denkmalfläche mit der Nummer D-28840-03 ausgewiesen (Abb. 54-55). In südwestlicher Richtung in ca. 500 Meter Entfernung vom Standort 59 befindet sich eine weitere archäologische Denkmalfläche (D-28840-05). Die Fläche D-28840-03 nimmt einen nach Nordost exponierten flachen Hangbereich ein (Abb. 57). Standort 59 liegt ca. 220 m westlich der Denkmalfläche D-28840-03 bei einem Höhenunterschied von ca. 4 m (161 m ü. NN vs. 157 m ü. NN). Das Solum (Abb. 56, Tab. 9) ist zusätzlich zu der Schwarzerdebildung insofern interessant, als es sich um einen relativ gering erodierten Boden handelt. Die (relativ) vollständige Schicht- und Horizontfolge ermöglicht eine hohe Vergleichbarkeit mit den nächstgelegenen Bodendenkmalflächen.

Die Schichten von Standort 59 bestehen bis in 20 dm Tiefe aus Lösslehm und Primärlöss. Am Standort Schmorren dominiert eine reliktsche Schwarzerdebildung (Abb. 56, Tab. 9). Die Hauptlage ist verkürzt

und nicht eindeutig zur LM abgrenzbar. Der hohe Tongehalt (20 M%) im A_{xh}-A_l deutet auf eine zumindest vorneuzeitlich tiefere Position dieses Bereiches. Es folgt eine differenzierte Mittellage (LM1 und LM2) mit allmählich abnehmenden Humusgehalten. Der Basislagen-Komplex endet bei ca. 20 dm u. GOF und ist mindestens dreigliedrig. Der obere Teil der Basislage ist durch Eiskeilstrukturen (→ Eiskeilpseudomorphosen) unregelmäßig aufgelöst. Besonders in den Eiskeilen wird die Lamellenfleckenzone deutlich. Unterhalb von 12 - 15 dm Tiefe folgt der „arcticbrownsoil“ (W_γ1'') als unterstes Basislagenglied. Die periglaziären Lagen sind am Standort 59 in Abfolge und Tiefenlage fast vollständig vorhanden. Die Hauptlage ist gering erodiert. Da sich der Standort auf einem nur sehr gering geneigten Plateaubereich befindet, ist eine intensivere Erosion hier auch nicht zu erwarten.

Horizont-Nr.	Horizont	untereTiefe [dm]	Lage	Anmerkung
1	A _{xp} /rA _{xp}	3 / 4	-	kolluvialbeeinflusst
2	A _{xh} -A _l	5	LH - LM	diffuser Übergang LH - LM
3	B _{ht}	7	LM bis LB	diffuser Übergang LH - LM - LB
4	B _{ht} -iC _v	11	LB	Oberer Teil der Lamellenfleckenzone
5	iC _v	16	LB	Lamellenfleckenzone
6	iC _v	20	LB	Arctic brownsoil
7	eC _{lv}	>24	keine Lage	PrimärlössW _γ 1''
A	Eiskeile mit Lamellenfleckenzone			

Tab. 9 Horizonte und Schichten des Standortes 59: Schmorren³²

Die Landschaft besitzt welligen Charakter mit Plateaus, Riedel und Mulden (Abb. 57-59). Die Abbildung 57 zeigt den Abschnitt der Standorte S-4, S-9 und S-10 im Bereich der dortigen Bodendenkmalfläche.

Die Felduntersuchung für Fläche Schmorren umfasst 12 Standorte an verschiedenen Positionen im Mesorelief (Abb. 58-59):

- Plateau-Lagen (3 Aufnahmepunkte),
- Flanke, Riedel (horizontal konvex, 1 Aufnahmepunkt),
- Ober-, Mittel-, Unterhänge in verschiedenen Neigungsstufen (4 Aufnahmepunkte),
- Mulden und Rinnen in verschiedenen Neigungsstufen (4 Aufnahmepunkte).

Die feldbodenkundlichen Ergebnisse und das bodengeologische Normalprofil werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert. Im Anschluss erfolgen Ausführungen zur Bodenerosion. Aus den kartierten Bodenprofilen (S-1 bis S-12) und den Ergebnissen des LfULG wurde ein bodengeologisches Normalprofil für den Untersuchungsraum Schmorren erstellt (Abb. 60). Gegenüber dem Untersuchungsraum Leuben, welcher ebenfalls zum Mittelsächsischen Lösshügelland gehört, ist im Gebiet Schmorren eine größere Konstanz der Horizont- und Schichtenfolge unter den Kolluvialaufträgen vorhanden. Die ursprünglich flächenhaft vorhistorisch vorkommende, nicht erodierte Bodenform des Untersuchungsraumes Schmorren ist eine „Tschernosem-Parabraunerde bis

³²LfULG (Hrsg.), 2020: Materialien zum Bodenschutz: Boden-Dauerbeobachtungsprogramm des LfULG in Sachsen Standortcharakteristika, Dresden

Parabraunerde-Tschernosem aus Lösslehm“. Die kartierten Bodenformen zeigen, dass die verschiedenen Relieftypen unabhängig von der Höhenlage eine vergleichbare Lagenausbildung und Pedogenese aufweisen (vgl. auch Gebiete Leuben und Nosswitz). Nur in der Hauptrinne ist zusätzlich (>11 dm) eine subdominante Haftnässe festgestellt worden (Profil S-7). Die Leitbodenform am Standort 59 besitzt eine typische und vollständige Horizontfolge und ist als „Repräsentanz - Profil“ (Eichprofil) geeignet. Auf die Fläche bezogen ist zu beachten, dass die Häufigkeit und die Intensität der Humusausbildung und Lessivierungsmerkmale (Al, Bht) sowohl horizontal als auch vertikal in der dm-bis m-Skala deutlichen natürlichen Schwankungen unterliegen. Daher kommen kleinsträumig Axh-Al und Al-Axh-Horizonte diffus nebeneinander vor. Typisch im Untersuchungsraum Schmorren wie auch sonst in der Regel im „Mittelsächsischen Lösshügelland“ sind auch die diffusen Übergänge der Lagen (Abb. 61). Diese überwiegend unscharfe Lagenabgrenzung ist bereits primär in der Löss-Lithofazies angelegt, zusätzlich sind durch die Bioturbation primär vorhandene Merkmale verwischt. Die Lamellenflecken-Zone (Wy2') im Standort 59 - Leitprofil ist periglaziär gegliedert. Die obere LFZ gehört bereits zur Basislage, welche ohne eindeutige Abgrenzung in die hangende Mittel- bzw. Hauptlage übergeht. Der untere Teil der LFZ ab ca. 11,5 dm ist durch ältere Kryoturbation geprägt, hier verläuft ein 2-phasischer Eiskeil (Abb. 62). Die kryogenen Strukturen der Lamellenfleckenzone wurden bereits von Lieberoth 1959 beschrieben.³³ Sie müssen gegebenenfalls bei der Abschätzung von Profilverkürzungen extrem erodierter Standorte beachtet werden.

Die ursprüngliche Schichten- und Horizontfolge im Untersuchungsraum Schmorren ist flächenhaft vollständig durch Erosion und/oder Kolluvialaufträge verändert (Tab. 10, Abb. 63, 65). Im Folgenden werden Erosion, Profilverkürzungen und Aufträge im Gebiet vorgestellt und diskutiert.

Der Erosionsgrad nach KA5 wird durch ein vollständiges Vergleichsprofil (Repräsentanz-Boden) ermittelt (Tab. 10). Das Leitprofil 59 mit geringer Profilverkürzung erfüllt diese Voraussetzungen.

Kurzzeichen	Bezeichnung	Profilverkürzung in %	Beispiel Tschernosem-Parabraunerde
Eg0	nicht feststellbar	0	Tschernosem-Parabraunerde
Eg1	sehr gering	< 10	Tschernosem-Parabraunerde Axh-Al noch erkennbar aber reduziert
Eg2	gering	10 - < 30	Erodierte Tschernosem-Parabraunerde, Reste des Axh-Al unter Ap, Bht... möglich
Eg3	mittel	30 - < 60	stark erodierte Parabraunerde Axh-Al vollständig im Ap Ap teilweise im Bht
Eg4	hoch	60 - < 90	Humusparabraunerde (sehr stark erodierte Tschernosem-Parabraunerde), Humusparabraunerde-Regosol Axh-Al vollständig erodiert, Ap teilweise im Bht oder Bht-ilCv
Eg5	sehr hoch	≥ 90	Pararendzina, Regosol, C-Horizont unter Ap

Tab. 10: Erosionsgrade nach KA5 mit dem Beispiel Tschernosem-Parabraunerde ergänzt.

In Tabelle 10 bzw. Abbildung 65 sind die Erosionsgrade nach KA5 (= Standort Kartierpunkt) sowie die Aufträge (M-Horizonte) der Kartierpunkte S-1 bis S-12 dargestellt. Braune Areale sind die Denkmalflächen. Die festgestellten Erosionsgrade zeigen die typischen Abhängigkeiten vom Relief. In der Plateaulage existieren geringe Erosionsgrade mit vereinzelt punktuellen Aufträgen von >3 dm

³³ I. Lieberoth, Die Lamellenfleckenzone. Bodenkunde Bd. 86, Heft 2, 1959.

Mächtigkeit. (S-1, S-2, S-8). Die kleinen Hangmulden und Subsenken zeigen eine geringe und mittlere Erosion bei zuverlässig auftretenden Aufträgen bis 10 dm Mächtigkeit (S-4, S-9).

In größeren Hangmulden und Unterhang-Bereichen unter konservierenden M-Horizonten sind auch unverkürzte Böden vorhanden (S-7, S-10, Abb. 66). An der Hangversteilung Profil S-12 wurde der höchste angetroffene Erosionsgrad 5 (sehr stark) angetroffen (Abb. 67). Die Hangmulden sind mit Aufträgen bis >10 dm gefüllt (Abb. 68). Im Unterschied zu Gebiet Leuben sind hier ± vollständige Parabraunerde-Tschernosem-Profile unter den M-Horizonten konserviert (Abb. 66). Damit stellen diese Böden wertvolle Landschafts- und Kulturarchive dar.

Fazit und Diskussion

Das Gebiet Schmorren besaß primär relativ einheitliche Bodenverhältnisse. Diese sind durch das prähistorisch-historische bis rezente Erosionsgeschehen spezifiziert. Daraus folgen die rezent unterschiedlichen Bodenformen. Die unterschiedlichen KA5-Bodensubtypen in den verschiedenen Reliefpositionen resultieren aus unterschiedlichen Erosionsgraden und Aufträgen. Zusätzlich sind die wahrscheinlich bereits prähistorisch erosiv verkürzten A_{xh}-Horizonte intensiver lessiviert als die unter den Aufträgen konservierten A_{xh}-Horizonte. Die dokumentierten Profilverkürzungen und Aufträge sind reliefabhängig plausibel. Die Leitbodenform von Standort 59 stellt für die Bodenlandschaft und für das Gebiet einen typischen Referenzboden mit einer repräsentativen Schicht- und Horizontfolge dar. Die Böden der Bodendenkmalflächen im Gebiet besitzen mit Berücksichtigung der Erosionsgrade eine vergleichbare Schicht- und Horizontfolge. Daher ist der Untersuchungsraum Schmorren für ein bodenarchäologisches Monitoring sehr gut geeignet.

2.5.4.6. Untersuchungsraum Leuben

Der Untersuchungsraum Leuben befindet sich in der Bodenlandschaft „Mittelsächsisches Lösshügelland“ im Süden des kulturgeografischen Raumes der „Lommatzscher Pflege“. Diese typische Lösshügellandschaft besitzt bedingt durch das Paläorelief mit unterschiedlichen Lössmächtigkeiten, eine hohe Reliefdynamik. Daher und aufgrund zahlreicher archäologischer Denkmalflächen („Altsiedelgebiet“) ist dieser Untersuchungsraum besonders geeignet, um unterschiedliche natürliche und kulturelle Erosionsstadien von Lössböden abzubilden. Die Bodenkartierung fokussiert auf charakteristische Reliefpositionen, welche die hohe Landschaftsdynamik widerspiegeln.

Die Felduntersuchung für Fläche Leuben umfasst 18 Standorte der verschiedenen Positionen im Mesorelief (Abb. 69-70):

- Plateau-Randlage (1 Aufnahmepunkt),
- Flanken, Riedel (horizontal konvex) (5 Aufnahmepunkte),
- Ober-, Mittel-, Unterhänge in verschiedenen Neigungsstufen (7 Aufnahmepunkte),
- Mulden und Rinnen in verschiedenen Neigungsstufen (5 Aufnahmepunkte).

Die feldbodenkundlichen Ergebnisse (Abb. 72) und das bodengeologische Normalprofil (Abb. 71) werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert. Im Anschluss erfolgen Ausführungen zur Bodenerosion und Anwendung der Bodenschätzung.

Die Böden der kartierten Standorte zeigen im Einzelnen eine sehr unterschiedlichen Schicht- und Horizontfolge. Der hohe Differenzierungsgrad kann nur in großmaßstäbigen Maßstab erfasst und dargestellt werden. In der mittelmaßstäbigen Skala wie der Bodenkarte 1:50000 (BK50 / LfULG) ist diese kleinräumige Heterogenität nicht darstellbar.

Das bodengeologische Normalprofil (Abb. 71) beinhaltet die Schichten- und Horizontfolge für den Untersuchungsraum Leuben in Zusammenfassung der kartierten Böden. Die unterbrochenen gepunkteten Profillinien der Einzelprofile verdeutlichen die Schichtlücken aufgrund der kulturell induzierten Bodenerosion. Weiterhin sind auch natürliche Schichtlücken infolge der periglazialen Lithofazies mit inhärenter Denudation gegeben. Das betrifft insbesondere die kartierten Lössderivat-Profile. Vor allem die Lamellenfleckenzone und der „Braun-Löss“ (Wy1'') können abschnittsweise bereits präholozän abgetragen sein.

Im Normalprofil erkennbar sind extreme Profilverkürzungen, die bis in die C-Horizonte hinabreichen (L-7, L-9), also die komplette ursprüngliche pedogene Horizontfolge (Solum) umfassen. Das bedeutet, dass die Profillinien hier erst in den Schichten des „Braunlöss“ (Wy1'') bzw. der Lamellenflecken-Zone (Wy2') ansetzen. Weiterhin im Normalprofil ersichtlich sind 6 Profile mit Aufträgen >3 dm. Diese sind die dokumentierten M-Horizonte der Profile L-3, L-8, L-11, L-15, L-16 und L-18 (Abb. 72). In den Hangrinnen mit teilweise >15 dm Aufträgen sind ebenfalls Profilkappungen bis in die C-Horizonte zu beobachten. Die Bodenerosion wird im Anschluss der bodengeologischen Darstellungen diskutiert.

Die ursprünglich flächenhaft vorkommende, nicht erodierte Bodenform von Untersuchungsraum Leuben ist eine „(Braunerde-)Parabraunerde bzw. schwach entwickelte (Braunerde-)Fahlerde aus Lösslehm“. Der wahrscheinlich primär gegebene Bv- bis Al,Ael -Horizontabschnitt der Hauptlage ist im Gebiet völlig erodiert und wahrscheinlich auch in konservierenden Sedimentfallen nicht mehr vorhanden. Darauf deuten die hohen Profilverkürzungen an den Hängen sowie in den Rinnen und Mulden hin.

Im Normalprofil, dargestellt mit den zugeordneten Profillinien, sind erkennbar sämtliche kartierten Standorte erodiert bei zugleich sehr verschiedenen Profilverkürzungen. Die maximalen Profilverkürzungen sind in den Profilen mit Lamellenfleckenzone unter Ap erreicht (s. u.). Mit Einbeziehung des diagnostisch notwendigen Lessivé-Horizontes Al bzw. Ael, welcher sehr wahrscheinlich komplett im Gebiet auch unter den M-Horizonten abgetragen ist, kann von einer maximalen Profilverkürzung ≥ 12 dm ausgegangen werden. Da die Lamellenfleckenzone als pedostratigrafischer Leithorizont unregelmäßig ausgebildet ist, können die besonders tiefreichenden Kappungen mit stark verkürztem Bt-ilCv bzw. ilCtv unter Ap (Profile L-2, 4, 7, 9, 14) weniger genau interpretiert werden. Die Lamellenfleckenzone differiert teilweise auch kleinräumig in einer Mächtigkeit von ca. 5- 20 dm mit spezifischen Ausprägungen (s. Lieberoth 1959 u. 1963 sowie auch die vorliegenden Feldergebnisse der Studie). In der Hangrinne Profil L-3 wurde unter dem M-Horizont ebenfalls ein ilCtv-Horizont festgestellt. Das verweist auf eine historische, eventuell auch bereits prähistorische, sehr langwierige und komplexe Erosionsgeschichte.

Die ermittelten Böden mit den unterschiedlichen Löss-Schichtungen bedeuten, dass (mind.) 2 bodengeologische Repräsentanz-Profile („Eich“-Profile) im Untersuchungsraum Leuben existieren:

- a) Erodierte Fahlerde aus Lösslehm über tiefem bis sehr tiefem Lössderivat mit Fremdgestein (L-13, Abb. 73-74)
- b) Erodierte Parabraunerde aus Lösslehm über sehr tiefem Primärlöss (L-6, Abb. 75).

a) Erodierte Fahlerde aus Lösslehm über tiefem bis sehr tiefem Lössderivat (L-13)

In der Plateau-Randlage und den anschließenden Oberhängen im Süden bis Westen des Gebietes (etwa >200 m NN) ist der Primärlöss bereits präholozän nicht mehr vorhanden. Das belegt in Profil L-13 die Schichtenfolge von Wy2-Löss mit Lamellenfleckenzone über verbrauchten Wy1''-Löss und dem liegenden Lössderivat mit Fremdgestein. Typischerweise für Böden außerhalb von Wy1''-Löss ist hier der Lessivé bereits als schwach entwickelte Fahlerde ausgebildet. Nur ca. 100 m nördlich davon in Profil L-1 bei gering konvexer Hanglage fehlen sowohl die Lamellenfleckenzone als auch der „Braun-Löss“ (Wy1''). Bereits ab 9 dm lagern hier (L-1) die Lössderivate mit Fremdgestein unter dem Wy2''-Löss (Haupt- und Mittellage). Das verweist auf die hohe räumliche und zeitliche Landschaftsdynamik im Periglazial. Die Profilverkürzung ist in L-13 nach KA5 als „gering“ eingestuft. Unter dem Ap schließt der Bt+Ael mit diffuser, teils taschenförmiger Untergrenze an. Bereits ab ca. 6 dm beginnt die Lamellenfleckenzone (Bt-ilCv, ilCtv, s. Lamellen in Abb. 71 Normalprofil). Zwischen 13 dm bis 26 dm lagert der „Braun-Löss“ (ilCv). Darunter schließt das Lössderivat an (ilCtv, ilCv) an (Abb. 71).

b) Erodierte Parabraunerde aus Lösslehm über sehr tiefem Primärlöss (L-6, Abb. 75)

Unterhalb von ca. 200 m NN tritt im Untersuchungsraum Leuben der Primärlöss (Wy1'') auf. Dieser Bereich stellt einen eigenen Litho- und Pedofaziesbereich gegenüber dem Bereich von Repräsentanzprofil L-13 (s.o.) dar. Der erodierte Lessivé der Haupt- und Mittellage ist hier als Parabraunerde (diagnostisch Al) vorhanden gewesen, wahrscheinlich mit holozäner Verbraunung der Hauptlage (Bv,Bv-Al). Damit ist dieser Parabraunerde-Boden die Übergangssequenz zu den Parabraunerde-Tschernosemen („Griserde“, vor 1990: Humusparabraunerde) bei Lommatzsch, ca. 5 km nördlich vom Untersuchungsraum Leuben gelegen. In Profil L-6 setzt der Bt unterhalb des Ap an, d.h. im Ap ist bereits ehemaliger Bt integriert. Sehr wahrscheinlich enthält der Ap zugleich kolluviale Anteile. Ab ca. 8 dm geht der Bt in die hier sehr undeutlich entwickelte Lamellenflecken-Zone (Bt-ilCv) über. Bereits bei ca. 11 dm erfolgt der Übergang in den „Braun-Löss“ (Wy1''), die Graufärbung deutet auf einen geringen Humusgehalt. Der wahrscheinlich hier überwiegend allochthone „Braun-Löss“ („arcticbrownsoil“ nach Lieberoth 1963 bzw. „brownhorizon“ nach Meszner 2015) enthält um 0,4 M.-% C_{org}³⁴. Der diffuse Übergang des „Braun-Löss“ zum Primärlöss (Wy1'') bei ca. 18 dm besitzt submikroskopischen Sekundärkalk. Die Profilverkürzung ist in L-6 nach KA5 als „hoch“ eingestuft (s.u.). Die Haupt- und Mittellage mit den erodierten diagnostischen (Bv-)Al...A-Bt-Horizonten fehlen in der Horizontfolge von Profil L-6. Die Schicht- und Horizontfolge unterhalb des Bt ist aber vollständig und typisch. Daher kann Profil L-6 als Repräsentanz-Profil eingestuft werden.

Kurzzeichen	Bezeichnung	Profilverkürzung in %	Beispiel Parabraunerde
Eg0	nicht feststellbar	0	Parabraunerde
Eg1	sehr gering	< 10	Parabraunerde Al noch erkennbar aber reduziert
Eg2	gering	10 - < 30	Erodierte Parabraunerde Reste des Al unter Ap
Eg3	mittel	30 - < 60	stark erodierte Parabraunerde Al vollständig im Ap Ap teilweise im Bt
Eg4	hoch	60 - < 90	sehr stark erodierte Parabraunerde, Parabraunerde-Pararendzina, Al vollständig erodiert, Ap teilweise im Bt
Eg5	sehr hoch	≥ 90	Pararendzina, Regosol, C-Horizont unter Ap

Tab. 11 Erosionsgrade nach KA5, Beispiel Parabraunerde ergänzt.

Der Erosionsgrad nach KA5 wird durch ein Vergleichsprofil (der Repräsentanz-Boden) mit geringerer Profilverkürzung ermittelt (Tab. 11, Abb. 77). Die festgestellten Erosionsgrade sind hoch signifikant vom Relief abhängig (Abb. 77). Im Bereich des gering geneigten Plateaurandes mit geringer Reliefenergie existiert ein geringer Erosionsgrad. Die konvexen Flanken mit höheren Neigungen zeigen sehr hohe Erosionsgrade.

In den Hangrinnen existieren sehr starke Profilverkürzungen mit hohen und sehr hohen Erosionsgraden bei gleichzeitigem Auftrag bis >10-15 dm (L-8, 11, 19, 24). Die Subsenken der Hänge besitzen Aufträge <10 dm mit teils kleinflächiger geringer Erosion (L-18). Überwiegend herrscht an den Hängen ein mittlerer bis hoher Erosionsgrad. Die Erosionsgrade und Aufträge sind Ergebnis eines sicherlich mindestens bis ins Mittelalter reichenden Erosionsgeschehens.

Auf DGM-Grundlage wurden die Bodenaufträge und Bodenabträge des Zeitraumes 2008-2018 berechnet (s. Kapitel 3). Da diese Ab-/Auftragsberechnung auf zeitlich versetzten Laserscan-Daten basiert, sind ältere, d. h. vor 2008 erfolgte Bodenverlagerungen, nicht berücksichtigt. Die dargestellten bodengeologischen Ergebnisse der Kartierung stimmen weitestgehend mit dem Trend des berechneten rezenten Erosionsgeschehens überein.

Bodenschätzung

Die Daten der Bodenschätzung geben Einblick in den Bodenzustand zum Zeitpunkt der Schätzung (Sachsen: 1930er, 1940er, 1950er Jahre und ab 1990). Im Verfahren der Bodenschätzung werden im Wesentlichen Bodenzusammensetzung und Bodenzustand dokumentiert. Daraus wird die potentielle Ertragsfähigkeit des Bodens in Punkten von 7-100 (Acker) bzw. 7-88 (Grünland) bewertet. Boden mit hoher potentieller Ertragsfähigkeit werden mit hohen Punktzahlen geschätzt (z. B. Schwarzerde aus Löss: L 1 Lo 100). Der Term „L 1 Lö 100 wird als Klassenzeichen (KLZ) bezeichnet. Er beinhaltet die Bodenart (z. B. L: Lehm), die Zustandsstufe (z. B. 1), die Entstehungsart (z. B. Lö: Löss), die Bodenzahl (100 → maximale Bodenzahl) und die Ackerzahl (xx). Die Ackerzahl weicht in der Regel durch standortspezifische Zu- oder Abschläge (z. B. Abschattung, Nordhang, etc.) von der Bodenzahl ab.

Aus der jeweils gebietstypischen Korrelation von Klassenzeichen und zu erwartender Bodenform (Bodenform = Bodentyp + bodenbildendes Substrat, z. B. Parabraunerde aus Lösslehm) lassen sich Rückschlüsse auf Bodenveränderungen ziehen (Abb. 79-80). Hätte beispielsweise die Bodenerstschätzung im Untersuchungsraum Leuben auf naturbelassenen, anthropogen unbeeinflussten Boden stattgefunden, so wären die Flächen mit hoher Wahrscheinlichkeit als L 4 L_ö mit Bodenzahlen von 65-73 bzw. als L 3 L_ö mit Bodenzahlen um 74-76 geschätzt worden. Innerhalb der 10 dm Aufschlusstiefe der Bodenschätzung wäre Lösslehm das dominierende Substrat. Lösslehm ist die Verwitterungsform des Primärlösses. Primärlöss ist zumeist mergelig (kalkhaltig), Lösslehm nicht. Die Bodenschätzung führt Löss bzw. Lösslehm als Lehm (L). Treten Klassenzeichen mit Bodenarten anders als Lehm (L) auf, ist dies ein Hinweis auf Bodenveränderungen durch Erosion/Deposition. In Frage kommen: S (Sand), SI (anlehmiger Sand), IS (lehmiger Sand), SL (stark lehmiger Sand), sL (sandiger Lehm), LT (schwerer Lehm) und T (Ton).

Aus der Catena betrifft das die Profile L-4, L-7 und L-12 (Abb. 78). Sie befinden sich in der Fläche mit dem Klassenzeichen „SL 5 D 44/43“. Mit „D“ werden diluviale (eiszeitliche) Sedimente wie z. B. Sande, Kiese und Gerölle aber auch Grundmoränen bezeichnet. Sie treten natürlicherweise auf der Fläche Leuben unter dem Löss in Tiefen > 10 dm u. GOF auf. Treten sie oberhalb 10 dm u. GOF in Erscheinung, ist der darüber lagernde Löss erodiert. Je höher die Zustandsstufe (Ackerschätzung: 7 (schlecht) bis 1 (sehr gut)) und je höher die Bodenzahl, desto tiefgründig humoser ist das Solum. Klassenzeichen mit L3 L_ö und Bodenzahlen über 76 sind für die Fläche Leuben ein Indiz für Depositionsböden (Kolluvisole). Die abgelagerten Sedimente, die aus der Erosion humosen Oberbodens stammen, bilden ein tiefgründig humoses Solum mit sehr guter potentieller Ertragsfähigkeit. In den Erosionszonen nimmt dagegen die potentielle Ertragsfähigkeit des Bodens ab. Das Profil L-8 befindet sich in der Fläche mit Klassenzeichen L 3 L_ö 80.

In der Praxis der Bodenschätzung werden Aufschlüsse mit gleichartigen Klassenzeichen in einer Klassenfläche zusammengefasst und abgegrenzt. Nicht sinnvoll abgrenzbare Ausreißer werden in der jeweiligen Klassenfläche mit allen weiteren Aufschlüssen aggregiert und dem Klassenzeichen der Klassenfläche untergeordnet. Das Aufschluss- bzw. Bohrraster in der Bodenschätzung beträgt 50 x 50 Meter. So ist zu erklären, dass Klassenzeichen einzelner Aufschlüsse, zumeist sind das Bohrungen bis 10 dm Tiefe, nicht mit dem Klassenzeichen der Klassenfläche, in dem sie sich befinden, übereinstimmen. Das betrifft beispielsweise die Aufnahmepunkte L-4 und L-12 (Abb. 78).

Verteilung und fachlicher Inhalt der Klassenflächen zeigen, dass zum Zeitpunkt der Bodenaltschätzung das generelle Flächenschema von Erosion/Deposition, so wie es auch gegenwärtig im Untersuchungsraum Leuben zu beobachten ist, bereits vorhanden war. Zonen intensiver Erosion weisen sandigere Bodenarten als Lehm (L) auf, Depositionsbereiche Zustandsstufen besser als 4 und Bodenzahlen > 73. Ein seit dem Schätzungszeitpunkt weiterer Bodenabtrag hat um den Standort L-7 stattgefunden. Hier fehlt die Lössdecke mittlerweile fast vollständig. Weitere Sedimentationen humosen Bodenmaterials hat es um die Standorte L-8 und L-11 gegeben.

Die Informationen aus der Bodenschätzung haben das Potential, Bodenveränderungen im Vergleich
- zu dem angenommenen natürlichen, anthropogen unbeeinflussten Bodenzustand und
- zwischen Altschätzung und Neuschätzung
zu identifizieren. Aufgrund des Schätzungs- und Aggregierungscharakters der Bodenschätzung sind fachliche Ableitungen jedoch kritisch zu prüfen.

Fazit und Diskussion

Das Gebiet Leuben zeigt die höchsten Erosionsgrade und Aufträge von allen untersuchten Gebieten. Der Bodenaufbau bis etwa 10 dm Tiefe war ursprünglich im Gebiet relativ einheitlich vorhanden. Die liegende Schichtenfolge, etwa <10 dm, ist im Gebiet primär wechselhafter ausgebildet. Die angetroffenen Profilverkürzungen und Aufträge korrelieren plausibel mit den Reliefformen. Die kartierten Böden sind in einem konsistenten bodengeologischen Normalprofil integriert.

Die Anwendung der Lössstratigrafie nach Lieberoth 1963 gibt die Möglichkeit, die Defizite der Lagengliederung für mächtige Löss auszugleichen. Die periglaziären Schichten können dadurch eindeutig verifiziert werden. Die Vollständigkeit der Bodenhorizonte kann objektiver beurteilt werden. Gerade im Fokus archäologischer Fragestellungen ist dies von Bedeutung.

In Hinblick auf den Einfluss der Erosions-Depositionsdynamik für den Erhalt und Zustand von Bodendenkmälern besitzt der Untersuchungsraum Leuben eine besonders hohe Eignung. Das kleinräumige, stark bewegte Riedel-Mulden-Relief mit den lössbürtigen Substraten führt zu intensiven Bodenumlagerungsprozessen, die bis heute anhalten.

2.6. Ergebnisse: Vorschläge für ein Langzeitmonitoring-Konzept von archäologischen Denkmalflächen auf intensiv ackerbaulich genutzten Schlägen

Die Auswahl der Untersuchungsgebiete Leuben, Schmorren, Nosswitz, Kitzen, Wermsdorf und Salzenforst erfolgte für unterschiedliche Lössbodenlandschaften im Freistaat Sachsen. Deren Bodenaufbau weist sowohl Gemeinsamkeiten als auch charakteristische Unterschiede auf. Die ausgewählten Untersuchungsräume repräsentieren damit die große Bandbreite und die Heterogenität der Lössböden in Sachsen.

Generell ist festzustellen, dass die Horizont- und Schichtenfolge sowie das Erosionsgeschehen mit Profilverkürzungen für jede der untersuchten Bodenlandschaften spezifisch sind. Auch innerhalb einer Bodenlandschaft existieren unterschiedliche bodengeologische Normal- und Referenzprofile.

Die Flächengröße der Bodendenkmale beträgt überwiegend zwischen 1-15 ha, teilweise auch >20 ha bei linearer Geometrie. In diesem Skalenbereich sind, resultierend aus den geologisch-geomorphologischen Voraussetzungen, bereits sehr heterogene Bodengesellschaften möglich. Somit können zum Teil auch sehr verschiedene Bodenformen sowohl in unterschiedlichen als auch in gleichartigen Reliefformen in einem Gebiet nebeneinander existieren. Weiterhin spezifiziert und determiniert das Kleinrelief mit den konvex-konkaven Formtypen sowie den Neigungsstufen das Bodenmosaik.

Die Ergebnisse der Felduntersuchungen in den Auswahlgebieten zeigen, dass diese Komplexität auf Basis von gebietspezifischen bodengeologischen Normalprofilen beschrieben werden kann. Diese ermöglichen die Interpretation der reliefabhängigen Schicht- und Horizontfolgen. Ausgehend von realen Referenzprofilen kann der Erosionsgrad respektive die Profilverkürzung festgestellt werden.

Die Leitprofile in den Auswahlgebieten besitzen repräsentative Schicht- und Horizontfolgen.³⁴ Diese Bodenprofile sind jeweils wesentlicher Bestandteil bzw. Schnittmenge des bodengeologischen Normalprofils. Daher handelt es sich auch um geeignete Referenzprofile für die jeweils in der Umgebung befindlichen Denkmalflächen. Die analytischen Parameter der Untersuchungsstandorte³⁵ sind grundsätzlich geeignet und übertragbar auf archäologische Monitoringflächen der jeweiligen Umgebung. Dazu müssen die substratspezifischen und pedogenetischen Verhältnisse der Bodendenkmalflächen bekannt sein.

Eine Ermittlung und Einrichtung von archäologischen Monitoringflächen kann nur in einem stufenweisen und selektiven Vorgehen realisiert werden. Das ergibt sich schon aus der Vielzahl der Bodendenkmalflächen sowie der Bodenheterogenität in den Lösslandschaften von Sachsen. Allein für Mittel- bis Westsachsen sind >3000 archäologische Bodendenkmalflächen in den Lösslandschaften ausgewiesen. Daher muss eine Flächenvorauswahl nach archäologischen Kriterien erfolgen. Das ist ein methodischer Unterschied zu der Mehrzahl der „konventionellen“ landwirtschaftlichen Boden-Dauerbeobachtungsflächen des LfULG, die nach der Repräsentanz von Leitböden, hierbei den Böden nach BÜK400³⁴, erfolgte. Nur einzelne Beobachtungsflächen wurden primär auf Grund spezifischer stofflicher Bodenschutzaspekte lokal festgelegt. Eine zu erfolgende archäologische Vorauswahl von Flächen kann im zweiten Schritt bodenkundlich priorisiert werden. Die methodischen Schritte für den Aufbau eines archäologischen Bodenmonitorings auf Agrarflächen werden nachfolgend vorgestellt.

2.6.1. Prüfung der Bodendenkmalflächen eines Gebietes oder einer Region zur archäologischen Spezifik und Relevanz

Es müssen die Bedeutung und Art der Schutzgüter konkretisiert werden. Ein potentieller allgemeiner Gefährdungsgrad der Schutzgüter muss bekannt sein, zum Beispiel durch Erosion oder landwirtschaftliche Bearbeitung. Die Ermittlung und Einschätzung der konkreten Gefährdung der Schutzgüter ist ein Ziel des Monitorings. Es erfolgt eine Vorauswahl von Bodendenkmalflächen für archäologisches Bodenmonitoring.

2.6.2. Vorplanung von Anzahl, Größe und Lage potentieller Monitoringfläche(n)

Mit einer Vorauswertung der geomorphologischen und bodenkundlichen Altdaten (DGM, FIS-Boden LfULG³⁶, Bodenschätzung³⁷ und weiteren Daten) wird die Vorauswahl der Bodendenkmalflächen eingegrenzt. Es erfolgt eine erste Lokalisierung nach Repräsentanz und Gefährdungseinschätzungen der potentiellen Monitoringflächen. Die Flächengröße richtet sich nach der Spezifik der Bodendenkmalflächen, es sind Flächengrößen von ≥ 1 ha notwendig um ausreichende Monitoring-Informationen zu erhalten.

³⁴ Barth, N., Forberg, H. Sinapius, R.: Boden-Dauerbeobachtungsprogramm des LfULG Sachsen. Standortcharakteristika. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.). Dresden 2020.

³⁵ Wünsche, M. et al: Übersichtskarte der Böden des Freistaates Sachsen 1:400 000 (BÜK400). Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.). Freiberg / Dresden

³⁶ Fachinformationssystem Boden. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. <https://www.boden.sachsen.de/fachinformationssystem-boden>

³⁷ Reichsbodenschätzung / Bodenschätzung. Finanzverwaltung / LfULG Freistaat Sachsen. <https://www.boden.sachsen.de/bodenschaeetzung>

2.6.3. Felduntersuchungen auf den Auswahlflächen

Das Gebiet oder die Gebiete mit Auswahlflächen werden einer bodenkundlichen Verifizierung im Gelände unterzogen. Dabei erfolgen die Erstellung des bodengeologischen Normalprofiles, die Ermittlung der Referenzprofile und der räumlichen Verteilung der Schichten und Horizonte, der Erosionsgrade und Aufträge, der Lagebeziehungen zwischen Schutzflächen und Bodenschichten sowie die Interpretationen und Einstufungen zum Gefährdungsgrad der archäologischen Schutzgüter.

2.6.4. Festlegung der Monitoringfläche(n)

Basierend auf den Felduntersuchungen erfolgt die abschließende Konkretisierung zur Anzahl, Lage und Größe der archäologischen Monitoringfläche(n). Eine Dokumentation des Ausgangszustandes der Monitoringfläche(n) und der vorliegenden archäologischen Informationen einschließlich der Gefährdungen wird erstellt.

2.6.5. Planung der zukünftigen Überwachung

Die weitere Beobachtung und Kontrolle der Monitoringfläche(n) muss der Art der Gefährdung und dem Gefährdungsgrad entsprechend geplant werden. Die zu wiederholenden Prüfungen der Monitoringflächen sollten prinzipiell in der Kombination von Laserscan-DGM-Vergleichen und Felduntersuchungen erfolgen. Im Ergebnis dieser Studie kann ein Beobachtungsabstand von 10 Jahren für Areale hoher Reliefenergie abgeleitet werden. Für diesen Zeitraum von ca. 10 Jahren wurden signifikante Bodenab- und -aufträge festgestellt (s. Kap. 3).

2.6.6. Ereignisbasiertes Handeln bei gefährdungsrelevanten Veränderungen

Infolge von zukünftig auftretender Wetterextreme auf Grund des Klimawandels muss eine außerplanmäßige Prüfung und Dokumentation der Monitoringflächen erfolgen. Je nach Ausmaß des Extremwetters können diese Ergebnisse für Bodendenkmalflächen in der gleichen Bodenlandschaft interpretiert werden. Bei akuter Gefährdung der Schutzgüter müssen Maßnahmen zur Sicherung abgeleitet werden.³⁸

2.6.7 Physikochemische Analysedaten

Im Rahmen des BDF-Beprobungsprogramms werden neben der Felddokumentation zahlreiche physikochemische Bodenparameter ermittelt. Dazu werden Bodenproben sowohl in der Fläche als auch tiefenbezogen entnommen. Für die Frage- und Zielstellungen des archäologischen Langzeitmonitorings ist eine Auswahl des BDF-Analytikumfangs grundsätzlich nutz- und integrierbar. Analysenkampagnen für die Einrichtung und die periodische Beprobung reichen für die BDF Nosswitz ins Jahr 2002, Schmorren ins Jahr 2000 sowie für Salzenforst und Kitzen bis 1995 zurück.

Die bodenphysikalischen Daten besitzen für das archäologische Monitoring eine höhere Relevanz gegenüber den bodenchemischen Daten. Folgende bodenphysikalische Analysen und Parameter

³⁸Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), Sächsisches Kreislaufwirtschafts- und Bodenschutzgesetz (SächsKrWBodSchG)

sollten zum Standardumfang künftiger Monitoring-Auswertungen für Gefährdungsabschätzungen gehören:

Korngröße	→	Bodenart
Trockenrohdichte	→	Effektive Lagerungsdichte
pf-Werte	→	Feld- und Luftkapazität (Porenraum)
kf-Werte	→	Sickerwasserbewegung

Diese Parameter sind notwendig zur verifizierten Berechnung archäologisch relevanter Bodeneigenschaften von Wasserhaushalt, Erodibilität, Verdichtung und Verdichtbarkeit, Druckverhalten („Druckzwiesel“ bei Belastung) und Quellfähigkeit. Grundsätzlich können diese Eigenschaften auch mittels Standardtabellen, z. B. der KA5, aus in situ - Daten abgeleitet werden. Diese Ableitungen bilden allerdings nur Trends ab mit wesentlich größeren Fehlertoleranzen.

Die bodenchemischen Parameter haben zunächst eine untergeordnete Bedeutung für archäologische Gefährdungsabschätzungen. Für spezifischen Fragestellungen müssen diese aber hingezogen werden. Das betrifft beispielsweise das Verwitterungsverhalten organischer Artefakte und damit den Erhaltungszustand im zeitlichen Kontext. Folgende Analysen sollten als Standard für Auswertungen verwendet werden:

Corg	→	Humusgehalt
pH-Wert	→	Acidität, Basizität
CaCO ₃	→	Kalkgehalt

Für Fragestellungen zur Schicht- und Horizont-Verifizierung können die Gehalte von Fe_o/Fe_d, Phosphor sowie weitere Elemente eine Zeigerfunktion besitzen.

Im Gegensatz zu den bodengeologischen Normalprofilen und Referenz-Böden sind die Analysendaten des BDF-Programmes auf andere Gebiete bzw. entfernte Denkmalflächen übertragbar. Voraussetzung dafür sind jeweils verifizierte verwandte Löss-Substrate (s. Stratigrafie nach Lieberoth 1963) mit gleicher Pedogenese bzw. ähnlicher Horizontausbildung. Daher können weitere Löss-BDF in Sachsen ebenfalls wertvolle Analysedaten und Zeitreihen zur Auswertung für archäologisches Bodenmonitoring beitragen. Weitere BDF-Standorte mit Löss-Bodenformen (Löss >1 m) in Sachsen sind bei Schweta (Nr.18), Naundorf (Nr.29), Krögis (Nr.24), Pfaffroda (Nr.41), Großschirma (Nr.35) und Girbirgsdorf (Nr.40) vorhanden.

Aus diesen Gründen wird die Kooperation zur Nutzung von Daten des LfULG-Monitorings für das archäologische Monitoring empfohlen.

Die Auswahl und der Einfluss von relevanten Bodenparametern für die Ziele des Langzeitmonitorings kann im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht abschließend betrachtet werden und bedarf weiterführender Recherchen und Untersuchungen.

2.6.8. Abschätzungen zum Aufwand für eine Neueinrichtung von Monitoringflächen

Die Bodendenkmalflächen umfassen ein großes Spektrum von Flächengrößen und Schutzgütern in heterogenen Bodenlandschaften. Die nachfolgenden Kostenabschätzungen können daher nur eine grobe finanzielle Beurteilung darstellen. Die Festlegung einer archäologischen Monitoringfläche auf landwirtschaftlicher Nutzfläche erfordert einen hoch aufgelösten Informationsstand der Ausgangssituation der Bodenverhältnisse. Ohne Kenntnis des Ausgangszustandes sind Abschätzung

und Vergleich zur (potentiell) nachfolgenden Boden- und Schutzgutveränderung nicht möglich. Dieser Ausgangszustand muss dokumentiert werden auf Grundlage von

- Historischen Informationen, Datenrecherchen,
- Felduntersuchungen, in situ – Dokumentationen,
- Laboruntersuchungen in Abhängigkeit von Bodenparametern

Die archäologischen Denkmalflächen in Sachsen sind im Allgemeinen größer als ein Hektar. Die jeweiligen Monitoringflächen sollten aus vertretbaren Budgetgründen eine Flächengröße von 1 bis 3 ha nicht überschreiten. Für die großen Denkmalflächen können 2 bis 3 relevante Areale als Monitoringfläche ausgewählt werden.

Neben der Flächengröße hängt der Aufwand für die Bodendokumentation von der horizontalen und vertikalen Heterogenität der spezifischen Bodenverhältnisse ab. Nachfolgend wird beispielhaft der Zeit- und Probenumfang für kleine Monitorflächen mit geringer Heterogenität dem Aufwand gegenübergestellt, der für größere Monitoringflächen mit höherer Heterogenität zu veranschlagen ist.

Historische Informationen, Datenrecherche

Eine Dokumentation der vorliegenden Informationen und Daten ist für jede einzurichtende Monitoringfläche durchzuführen. Damit können die Feldkampagne und das Probenprogramm geplant werden. Die Zeitabschätzung erfolgt auf Grundlage der Erfahrungen des Projektes.

Denkmalfläche	Zeit (h)	Kosten netto	
		€ / h	€ / \sum h
3-5 ha, gering heterogen	20	80 €	1.600 €
5- 10 ha, heterogen	40	80 €	3.200 €

Felduntersuchungen

Die Felduntersuchungen sind für die Erstellung des bodengeologischen Normalprofils, der Ermittlung der Referenzprofile und die räumliche Verteilung der Schichten und Horizonte notwendig. Damit können grundsätzlich die Profilverkürzungen und Gefährdungslagen der relevanten archäologischen Bodenabschnitte konkret eingeschätzt werden:

Denkmalfläche	Zeit (h)	Kosten netto	
		€ / h	€ / \sum h
3-5 ha, gering heterogen	30	80 €	2.400 €
5- 10 ha, heterogen	60	80 €	4.800 €

Dokumentation

Die Gesamtdokumentation zum Ausgangszustand einer Monitoringfläche enthält die Recherchen und Voruntersuchungen, die feldbodenkundlichen Ergebnisse, die Gefährdungsabschätzungen und Planungen zur weiteren Überwachung der archäologischen Monitoringfläche.

Denkmalfläche	Zeit (h)	Kosten netto	
		€/h	€/∑h
3-5 ha, gering heterogen	40	80 €	3.200 €
5- 10 ha, heterogen	80	80 €	6.400 €

Die Gesamtkosten einer Ersteinrichtung betragen je nach Größe ca. 7.000 € für kleinere Flächen mit geringer Heterogenität und über 10.000 € für sehr große und komplexe und Monitoringflächen.

2.6.9. Aufwand zur Monitoring-Einrichtung in den Auswahlgebieten

Für die Auswahlgebiete Wernsdorf, Salzenforst, Kitzen, Nosswitz, Schmorren und Leuben sind umfangreiche Vor- und Felduntersuchungen im Sinne von Kap. 2.5.5.3 erfolgt. Die Übertragbarkeit von BDF-Ergebnissen für die Umgebung wurde festgestellt (s. Kap.2.5.4.). Auf Grundlage dieser Auswertungen könnten die Bodendenkmalflächen dieser Gebiete als archäologische Monitoringflächen vorgeplant werden.

Die finale Festlegung der Monitoringflächen, d.h. Lokalisierung der Flächengrenzen, muss auf Grundlage einer zusätzlichen Felduntersuchung weiterer Standorte vor allem innerhalb der potentiellen Flächen erfolgen. Diese Prospektion sollte die unterschiedlichen Reliefformen innerhalb der Denkmalflächen erfassen, welche noch nicht im Rahmen der bisherigen Untersuchungen erfasst wurden. Innerhalb dieser zukünftigen Monitoringflächen sollten, bezogen auf 1 ha Fläche, mind. 1-2 Bodenprofilpunkte mittels DGPS eingemessen werden. Eine Lagegenauigkeit von 1-2 cm Toleranz ist auf Ackerflächen mit einem vertretbaren Budget zu erreichen. Diese Methodik wurde auch für das Erosion-Langzeitmonitoring-Projekt der Stadt Dresden angewendet.³⁹ Dadurch können punktgenaue bodenkundliche Vergleichsuntersuchungen als Bestandteil des Monitorings in größeren zeitlichen Abständen durchgeführt werden. Weiterhin können die DGPS-Einmessungen fortführende Laserscan-Messungen zum Bodenab- und -auftrag in den Flächen als Kontrollpunkte begleiten.

Weiterhin sollten die für das Monitoring vorgesehenen Bodendenkmalflächen einer archäologischen Prüfung zur Relevanz im Sinne von Kap.2.5.5.1. unterliegen. Der archäologische Kontext sollte für die Festlegung der Flächen nach Möglichkeit konkreter einfließen. Wünschenswert, aber wahrscheinlich nur sehr bedingt möglich wäre eine genauere Kenntnis zur vertikalen Zuordnung potentieller archäologischer Schichten im bodengeologischen Normalprofil. Diese Kenntnis ermöglicht eine genauere Lokalisierung von Monitoringarealen. Eine gemeinsame Feldbegehung von Bodenkundlern und Archäologen auf den zukünftigen Monitoringflächen sollte angestrebt werden.

Für die Auswahlgebiete im Einzelnen werden folgende Bodendenkmalflächen mit jeweils spezifischen Prospektionsaufwand vorgeschlagen:

Wernsdorf

Die Fläche D-1993-03 besitzt ca. 2 ha. Hier sind Siedlungsspuren des Neolithikums, der Bronzezeit und des Frühmittelalters dokumentiert. Bisher erfolgten an 3 Punkte innerhalb der Fläche Kartierungen. Zur Vervollständigung sollten weitere 3(±1) Punkte die konkaven und konvexen Reliefformen bodenkundlich erfassen.

³⁹ R. Sinapius: Grundlagen zum Erosionsmonitoring im Stadtgebiet Dresden. Unveröff. Abschlussbericht. UA Stadt Dresden. 2012.

Salzenforst

Die Fläche D-6648a-03 besitzt ca. 5 ha. Für diese Fläche sind Siedlungsspuren des Spätneolithikums, der Bronzezeit und des Frühmittelalters dokumentiert. Bisher sind 5 Kartierungspunkte innerhalb der Fläche dokumentiert. Zur Vervollständigung sollten weitere 2-3 Profile jeweils im Norden und Süden der Fläche aufgenommen werden.

Kitzen

Die Denkmalflächen jeweils südlich und nördlich von Sittel umfassen 9 - >10 ha. Die Fläche unmittelbar im Osten von Sittel besitzt ca. 3 ha Größe. Für die Flächen werden Siedlungsspuren vom Neolithikum bis zum Frühmittelalter angenommen. Es wurde 1 Bodenprofil innerhalb der Fläche südlich von Sittel dokumentiert. Zur Vervollständigung sollten weitere 3(±1) Punkte die konkaven und konvexen Reliefformen bodenkundlich erfassen. Es muss entschieden werden, ob eine zukünftige Monitoringfläche einer kompletten Bodendenkmalfläche entsprechen soll, oder ob ein geringerer Flächenumfang ausreicht.

Nosswitz

Die Fläche D-72640-03 besitzt ca. 7 ha Größe. Die Monitorfläche kann entsprechend der archäologischen Relevanz auch kleiner als 7 ha festgelegt werden. Für die Denkmalfläche sind Siedlungsspuren des Neolithikums, der Bronzezeit und des Früh- bis Spätmittelalter belegt. Bisher wurden 7 Kartierungspunkte innerhalb der Fläche aufgenommen. Zur Vervollständigung sollten weitere 5(±1) Punkte die konkaven und konvexen Reliefformen der Hangpositionen bodenkundlich erfassen.

Schmorren

Die Fläche D-28840-03 besitzt ca. 2 ha. Für diese Fläche sind Siedlungs- und Gräberspuren des Spätneolithikums dokumentiert. Bisher wurden an drei Punkte Bodenprofile dokumentiert. Zur Vervollständigung sollten weitere 3(±1) Punkte die verschiedenen Hangpositionen bodenkundlich erfassen.

Leuben

In diesem Gebiet ist noch keine Bodendenkmalfläche ausgewiesen, eine archäologische Relevanz aber durch Oberflächenfunde belegt. Eine Monitoringfläche in diesem Gebiet sollte auch die geringer erodierten Reliefformen einbeziehen, um die Langzeit-Verlagerungsdynamik der Böden sicherer zu erkennen.

Die Prospektion der Bodendenkmalflächen muss unter Beachtung der möglicherweise anzutreffenden Schutzgüter sensibel durchgeführt werden. Die Einrichtung von Monitoringflächen im Sinne von Kap.2.5.5. erfordert eine standardisierte Dokumentation in Text, Bild, Datenbank und Raster- / Vektordaten. Mit diesen Dokumentationen werden die jeweilige Spezifik der Monitoringflächen von Boden, Archäologie und Gefährdung beschrieben. Die aktuellen Standards der Bodenkunde / Geologie sind in den Dokumentationen zwingend für ein Jahrzehnt währendes nachvollziehbares Langzeitmonitoring.

Der weitere Kostenaufwand für die Monitoring-Einrichtung, d.h. verbleibende Geländearbeiten, Dokumentationen inklusive spezifischen Gefährdungsabschätzungen, wird für eine Fläche von ca. 2 ha Größe wie folgt kalkuliert:

Monitoringfläche, ca. 2 ha	Zeit (h)	Kosten netto	
		€/h	€/∑h
Kartierung, Einmessung	20	80 €	1.600 €
Datenbank, GIS	25	80 €	2.000 €
Bericht, Text / Bild	25	80 €	2.000 €

Diese Kostenabschätzungen können nur einen Durchschnitt darstellen. Im Einzelnen sind die zeitlichen Aufwände entsprechend der heterogenen oder homogenen Bodenverhältnisse verschiedener Gebiete zum Teil sehr unterschiedlich.

Eine wiederholte Prüfung und Kontrolle der Monitoringflächen kann mit deutlich geringerem Aufwand der Feldarbeiten erfolgen. Es sollten die mit DGPS eingemessenen Referenz-Kartierpunkte erneut bodenkundlich untersucht werden. Dadurch kann die Schicht- und Horizontfolge sehr lagegetreu verglichen und bewertet werden. Gemäß den Ergebnissen der vorliegenden Studie (s.Kap.3) empfehlen sich Langzeitabstände der wiederholten Untersuchungen von ca. 10 Jahren.

2.7. Abschließende Diskussion und Fazit

Das Ziel der vorliegenden Machbarkeitsstudie ist es, die Möglichkeiten eines archäologischen Bodenmonitorings in Sachsen zu untersuchen und aufzuzeigen. Auf Grund der archäologischen Relevanz, dem Flächenanteil, der Vielfalt und dem Gefährdungspotential beschränken sich die Untersuchungen auf die agrarischen Lössböden. In den Löss-Bodenlandschaften Sachsens sind bereits flächenhaft mittlere bis höchste Erosionsgrade vorhanden und zukünftig weitere Bodenumlagerungen auch im Kontext zunehmender klimatischer Extreme zu erwarten.

Für die sächsischen Agrarlandschaften existiert seit 1995 ein standardisiertes Bodenmonitoring durch das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Bodendauerbeobachtungsflächen, BDF-Programm, Abb. 81). Daher wurden archäologische Denkmalflächen in unmittelbarer Umgebung von BDF-Standorten recherchiert (Abb. 82). Ziel war zunächst, die bodenkundliche Kongruenz von 5 ausgewählten BDF (ca. 1000m² Flächengröße) mit der Umgebung einschließlich der Bodendenkmalflächen (i.A. >2 ha Flächengröße) zu prüfen. Die Kartierung und Auswertung der untersuchten BDF-Gebiete erbrachte eine plausible Übertragbarkeit von BDF-Ergebnissen für ein archäologisches Bodenmonitoring. Insbesondere die bodenphysikalischen Daten des BDF-Programms bilden für Gefährdungsabschätzungen im Kontext des Klimawandels auch für archäologische Belange eine wertvolle Grundlage.

Auf Grund der langfristigen Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit für ein zukünftig standardisiertes archäologisches Bodenmonitoring wird empfohlen, innerhalb der festzulegenden Monitoringflächen eine lagegenaue Einmessung (1-2 cm DGPS) von Indikator-Bodenprofilen durchzuführen. Diese Bodenprofile können in 10-Jahresabständen lagegetreu geprüft werden und ergänzen die flächenhaften Laserscan-Berechnungen zum Bodenab- und -auftrag. Bei auftretenden Wetterextremen mit On- / Off-site-Schäden müssen zeitnah Untersuchungen erfolgen.

Ein Langzeit-Monitoring-Programm kann insbesondere die kleinskaligen „schleichenden“ Bodenverlagerungen nachweisen. Das sind die geringmächtigen Umlagerungen des A-Horizontes durch lokale zeitlich begrenzte Starkregen oder auch die gravitativen bearbeitungstechnischen Umlagerungen. Diese „schleichende“ Bodenverlagerung wurde im Rahmen dieser Studie ebenfalls

nachgewiesen. Ein archäologisches Bodenmonitoring kann somit Gefährdungen indizieren und eröffnet durch die gewonnene Kenntnis einen Handlungsspielraum zum Schutz der Kulturgüter.

3. Digitale Höhenmodelle und Luftbilder

3.1 Ziele

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie zum Aufbau des Langzeitmonitoringprogramms soll eruiert werden, in welchem Maße nicht-invasive Möglichkeiten zur Datenerhebung bestehen und als Grundlage für anschließende Analysen dienen können. Dafür wurden Bodendenkmale im mittelsächsischen Lößhügelland ausgewählt⁴⁰, deren kontinuierliche Veränderung durch Erosion, Austrocknung, Schadverdichtung und mechanische Bodenverlagerung seit geraumer Zeit bekannt ist, und die sich in besonderem Maße für eine solche Studie anbieten. Als Ausgangspunkt dienten insbesondere durch Luftbildaufnahmen und Orthophotos über mehrere Jahre kontinuierlich dokumentierte Veränderungen von Bodendenkmalen, von denen einige repräsentative oder besonders gefährdete Beispiele ausgewählt wurden: Hof/Stauchitz (66290-D-02) sowie größere Einzugsgebiete mit Dellen-Rinnen-Systemen bei Leuben und Pitschütz.

3.2. Ausgangslage und Forschungsstand

Die Idee, Oberflächenveränderungen durch die Analyse Digitaler Geländemodelle (DGM) zu berechnen und zu visualisieren, ist nicht neu. In diesem Zusammenhang sei auf Untersuchungen u.a. in Italien verwiesen.⁴¹ Am Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfULG) wurde 2011 im Rahmen eines Projektes das durch den des Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) bereitgestellte DGM2 des Freistaates Sachsen für Fragestellungen der Erosionsbewertung (Wassererosion) analysiert, um eine bessere Datengrundlage für die Wassererosion zu erhalten.⁴² Zu jenem Zeitpunkt lag für 60% der Landesfläche Sachsens ein solches Modell vor. Schon allein aufgrund der unterschiedlichen Fragestellungen haben die für das Langzeitmonitoring des LfA benötigten Modelle für Oberflächenvergleiche an die bereitgestellten Daten bzw. deren Aufbereitung andere Ansprüche, als dies bei der Erosionsmodellierung auf Grundlage einer einzelnen Laserscanaufnahme der Fall ist. Für das Projekt der LfULG wurden auch generalisierte Varianten mit höherer Rasterweite verwendet und mittels der „Bi-Spline-Interpolation“ ein DGM5-Modell zur vergleichenden Untersuchung erstellt. Dies stellt für die geplanten Analysen im Projektrahmen bereits eine zu geringe Auflösung dar. Zudem wurden die Modelle mittels eines Lee-Filters vor der Analyse aufbereitet, durch die beispielsweise das Laser-DGM-immanente Rauschen abgemildert bzw. eliminiert werden sollen, allerdings verschwinden dadurch auch andere kleinräumige Reliefunterschiede wie die Bearbeitungsspuren landwirtschaftlicher Nutzung, was für einen

⁴⁰ außer Untersuchungsgebiet Bloaschütz

⁴¹ Andres 2010: N. Andres, Unsicherheiten von digitalen Geländemodellen und deren Auswirkungen auf die Berechnung von Gletscherseeausbrüchen mit RAMMS. Masterarbeit Zürich 2010 (https://www.geo.uzh.ch/dam/jcr:44ac3436-2311-483d-b4cc-43ace792349d/msc_nora_andres_2010.pdf); Neugirg u.a. 2016: F. Neugirg/M. Stark/A. Kaiser/M. Wlacilova/M. della Seta/P. Vergari/J. Schmidt/M. Becht/F. Haas, Erosionsprozesse in Calanchi im oberen Orcia-Tal, südliche Toskana, Italien basierend auf multitemporalen hochauflösenden terrestrischen LiDAR- und UAV-Untersuchungen. *Geomorphologie* 269, 2016, 8-22. Stark u.a. 2020: M. Stark/F. Neugirg/A. Kaiser/M. della Seta/J. Schmidt/M. Becht/F. Haas, Calanchi badlands reconstructions and long-term change detection from historical and UAS image processing. *Journal of Geomorphology* 2020, 2-24.

⁴² Köthe/Wurbs 2011: R. Köthe/D. Wurbs, Analyse des digitalen Geländemodells DGM2 für die Erosionsbewertung. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) 8 (Dresden 2011). Analyse Geländemodell für die Erosionsbewertung, Schriftenreihe des LfULG, Heft 8, 2011.

Reliefvergleich eher kontraproduktiv ist. Dennoch zeigt das Projekt des LfULG die Möglichkeiten, wie auf der Grundlage der Laserscan-Daten des GeoSN wissenschaftliche Analyse und Modellberechnungen durchgeführt werden können.

Für die Machbarkeitsstudie eines Langzeitmonitorings stehen im Gegensatz zu 2011 bereits die Daten einer weiteren Messreihe von Laserscans der Landesfläche Sachsens frei zugänglich zur Verfügung. In diesem Zusammenhang soll untersucht werden, ob diese Messungen für die Berechnungen von Reliefunterschieden bzw. morphologische Veränderungen im Laufe einer Dekade genutzt werden können, und ob auf Grundlage der Ergebnisse eine Gefährdungsanalyse vor allem der durch Erosion betroffenen archäologischen Kulturdenkmäler erfolgen kann.

3.3. Arbeitsschritte und Methodik

3.3.1. Datengrundlagen

Für die Machbarkeitsstudie kann zum einen auf Messdaten zurückgegriffen werden, die für Denkmale von Hof/Stauchitz (HOF-59 und HOF-65) und Döbeltitz (DOB-03) vom Landesamt für Archäologie erhoben wurden, um anhand der dabei erzielten Ergebnisse eine Standardisierung von DGM-Vergleichen zu erarbeiten. Im Rahmen dieser Voruntersuchungen wurde mittels Multikopter ein DGM auf Basis von Structure-from-Motion-Aufnahmen (SfM) berechnet, das mit den Geländedaten der Laserscan-Messungen der Landesvermessung aus den Jahren 2009 und 2018 verglichen werden kann. Als Beispielfläche für die Analyse der Datengrundlagen bietet sich das Bodendenkmal von Hof/Stauchitz an, da hierzu bereits eine Reihe unterschiedlicher Datenaufnahmen vorliegt.

Zum anderen stützen sich die DGM-Vergleiche auf Messserien, die vom Staatsbetrieb GeoSN öffentlich zugänglich zur Verfügung gestellt werden. Exemplarisch wurden diese Untersuchungen in zwei Einzugsgebieten des mittelsächsischen Lösshügellandes („Lommatzscher Pflege“) bei Pitschütz und Leuben durchgeführt, wo insbesondere Erosionsrinnen und Reliefveränderungen der typischen Hügellandschaft im Zusammenhang von Denkmalflächen und landwirtschaftlicher Nutzung untersucht werden sollen.

Die ersten Laserscan-Messungen wurden im Auftrag von GeoSN zwischen 2005 und 2008 (im Winter und Frühjahr) in mehreren Etappen aufgenommen. Bereits hier unterscheidet sich die Datenaufnahme je nach Auftragnehmer in Aufnahmegerät, Lasermessrate, Scannerwinkel, Überlappungsstreifen etc. (Abb. 83). Die für die Lommatzscher Pflege und Hof/Stauchitz relevante Etappe 3 (Waldheim) wurde an zwei Tagen im Januar und Februar 2008 befliegen. Im Ergebnis liegt eine unregelmäßige Punktwolke (sogenannte Primärdaten) vor.⁴³ Diese sind im Koordinatensystem Gauss-Krüger, Zone 4 (EPSG: 31468) georeferenziert und werden nach First-Echo-Punkten, Last-Echo-Punkten und Only-Echo-Punkten unterschieden (Abb. 84). Die Primärdaten werden in Bodenpunkte und Nichtbodenpunkte klassifiziert. Lücken, welche durch die Klassifizierung der Primärdaten oder durch Reflexionsausfälle bei der Laserscanner-Messaufnahme (z.B. auf Wasserflächen) entstanden sind, werden durch interpolierte Punkte (sogenannte Ergänzungspunkte), gefüllt. Dadurch können die für die Oberflächenberechnung benötigten Bodenpunkte (Last Pulse) herausgefiltert werden. Die Daten der

⁴³ Metadaten und technische Informationen zu den Laserscandaten: <https://www.geomis.sachsen.de>.

Laserscans aus den Jahren 2008/2009 liegen auf den Servern des LfA bereits in gefilterter Form vor, auf die zurückgegriffen werden konnte.

2018

Eine zweite Befliegung der Lommatzcher Pflege erfolgte an der Jahreswende 2018/2019. Durch die Weiterentwicklung von Material und technischen Möglichkeiten konnte eine deutlich höhere Punktdichte als 2018 erzielt werden (Abb. 83). Die Vorgaben von GeoSN an die jeweils ausführende Firma der Laserscans beinhaltet u. a. eine garantierte Punktdichte von mindestens 4 Punkten pro m². Die Rohdaten können direkt von der Website von GeoSN heruntergeladen werden.⁴⁴ Diese liegen als klassifizierte Laserscandaten (LSC) in Kacheln von 2 km x 2 km vor und werden im Höhenreferenzsystem DHHN2016 sowie im Koordinatensystem ETRS89 UTM Zone 33 (EPSG: 25833) bereitgestellt. Seit 2015 besitzen die Daten eine Höhengenaugigkeit von +/- 0,15 m. Sie sind im Datenformat LAZ (komprimiertes Datenformat) verfügbar. Da für die Berechnung eines DGM-Modells nur die Punkte der Klasse 2 (Bodenpunkte) relevant sind, mussten diese zunächst aus den LAZ-Dateien herausgefiltert werden. Dafür steht eine Reihe von Software-Tools zur Verfügung. Mittels des Hilfsprogramms LASTools, das für die Prozessierung von Laserscan-Daten mehrere Anwendungen bereithält, wurden die Bodenpunkte aus der Laserscan-Punktwolke herausgefiltert (las2txt.exe). Dabei kann bereits hier eine grobe Eingrenzung des Areals auf die zu berechnende Fläche erfolgen und die Anzahl der Punkte der im nächsten Schritt notwendigen Rasterung auf ein notwendiges Minimum reduziert werden (Abb. 84). Über die Schaltfläche ‚RUN‘ wird die Befehlszeile angezeigt. Hier erfolgt die Filterung der Bodenpunkte durch das Anfügen des Zusatzes ‚-keep_class 2‘ am Ende der Befehlssyntax.

Die Unterschiede in der Punktdichte innerhalb der Erfassungszyklen 2005 -2012 und 2015 -2020 sind voraussichtlich gering. Größere Unterschiede in der Punktdichte können losweise in Abhängigkeit vom verwendeten Sensor auftreten und sind von der Flugplanung des Auftragnehmers abhängig. Als Ergebnis liegen die ungerasterten Punktwolken mit unterschiedlich dichter Verteilung als ‚txt-Datei‘ oder einer vergleichbaren, im ASCII-Format formatierten Datei für eine Weiterverarbeitung vor.

2020

Durch das LfA wurden 2018 sowie 2020 eigene Befliegungen mit einem Multikopter durchgeführt, um mittels des Structure-from-Motion-Verfahren ein tagesaktuelles digitales Höhenmodell zu berechnen. Dies geschah für die Denkmale von Hof/Stauchitz (Abb. 86) und Döbeltitz. Es war aufgrund des Arbeitsaufwandes nicht vorgesehen, im Rahmen der Machbarkeitsstudie weitere Denkmale zu befliegen. Der Vollständigkeit halber sollen aber die gewonnenen Daten hier aufgeführt werden. Die für die Flüge relevanten Parameter wie Flughöhe (40m über Grund), Fluggeschwindigkeit (langsam, ca.5 m/s = 18km/h), frontale (80%) und laterale Bildüberlappung (72%) sowie schließlich die Ausrichtung der Kamera (90%, also senkrecht nach unten) wurden vorab festgelegt. Anschließend erfolgte die Berechnung des DGM mit Agisoft Metashape (Version 1.60), dazu wurden 491 Einzelbilder verarbeitet. Im Ergebnis wurde ein DGM der Fläche mit einer Auflösung von 3,92cm/pix als GeoTIFF(HOF-sowie ein Orthofoto-Mosaik mit einer Auflösung von 4cm/pix exportiert.⁴⁵

⁴⁴ Der Zugriff erfolgt über das Webportal <https://www.geodaten.sachsen.de>.

⁴⁵ Bericht zur Maßnahme HOF-59 von Chr. Schubert (LfA).

Analyse Bodenpunkte

Fragen, die Datenaufnahme, Verarbeitung und Postprocessing aufwarfen, wurden anhand der ersten Testergebnisse mit den zuständigen Kollegen im Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) erörtert.⁴⁶ Dabei wurde festgestellt, dass die ursprünglich für die Berechnung des Polygonnetzes vorgesehene Rasterweite von 5-10 cm pro Pixel auf Grundlage der Punktdichte der gemessenen Punktwolke zu gering ist. Der Abstand zwischen den LIDAR-Messpunkten würde einen zu großen Anteil der Bereiche ohne Messwert berechnen, anstatt auf Daten zurückgreifen zu können. Die Vorgabe von GeoSN bei der Ausschreibung von Laserscan-Messaufnahmen der neueren Messungen beträgt mindestens 4 Punkte pro m² (Abb. 84). Daher sollte die Rasterweite einen Abstand von 0.5 m nicht unterschreiten. Insbesondere bei den Aufnahmen der Jahre 2008/2009 wurden im Vergleich zu den Jahren 2018/2019 stellenweise nur relativ geringe Punktdichten erreicht. Lediglich in den Überlappungsbereichen von zwei Flugstreifen wurden höhere Dichten erzielt. Größere Unterschiede können auch losweise in Abhängigkeit vom verwendeten Sensor auftreten.

Um die Zusammensetzung der gemessenen Bodenpunkte zu analysieren und eine angemessene Rasterweite zu ermitteln, wurden zwei Testflächen innerhalb der Fläche des Denkmals von Hof/Stauchitz gewählt, von denen eine in einem Überlappungsbereich und eine in einem einfach gemessenen Bereich liegt. Dazu wurden die Bodenpunkte nicht mittels Surfer gerastert, sondern als Punktwolke direkt in QGIS importiert (Menüpunkt ‚Layer‘ → ‚Layer hinzufügen...‘ → ‚Getrennte Textdatei als Layer hinzufügen‘). Bereits in der Übersicht ist erkennbar, dass die Messungen von 2018 eine weitaus größere Punktdichte erreichen als die von 2008 (Abb. 86). In der vergrößerten Ansicht der beiden Testflächen wird dies noch deutlicher (Abb. 87).

Die als shape-Datei vorliegenden Testflächen dienen als Maske für die Beschneidung der Punktwolken auf den zu analysierenden Bereich (Menüpunkt ‚Vektor‘ → ‚Forschungswerkzeuge‘ → ‚Nach Position selektieren...‘). Hierüber wird die Schnittmenge mit der Testfläche angegeben und alle Punkte innerhalb dieser Fläche selektiert. Anschließend wird die Auswahl umgekehrt und die markierten Punkte gelöscht. Es verbleiben nur die Punkte innerhalb der Testfläche. In QGIS steht eine Reihe von Analysewerkzeugen zur Verfügung, die zur Anwendung kommen (Menüpunkt ‚Vektor‘ → ‚Analyse-Werkzeuge‘).

Neben der einfachen Punktzählung innerhalb eines 1 m x 1 m Polygons lässt sich auch eine Distanzanalyse berechnen, bei der der maximale, minimale und durchschnittliche Abstand zwischen zwei nächstliegenden Punkten ermittelt wird. Im Ergebnis bestätigt sich das Bild, das durch die Vorgaben von GeoSN entstand. Die durchschnittliche Punktzahl von 2008 unterscheidet sich im einfach gemessenen Bereich mit 1.5 Pkt. erheblich von der aus dem Jahr 2018 (8.1 Pkt., Abb. 88) Gleiches gilt für den mittleren Abstand zwischen zwei Punkten (Abb. 89). Die Werte werden leicht verfälscht, da insbesondere bei Punkten in den Randbereichen z. T. durch den fehlenden Bezug zum außerhalb der Maske befindlichen nächsten Nachbarn der Wert des de facto übernächsten berechnet wird. Auch bei der Anzahl der Punkte pro m² hat die Lage des Gitters einen, wenn auch minimalen, Einfluss. Die Werte aus den Überlappungsbereichen sind aufgrund der höheren Punktdichte besser im Hinblick auf die Genauigkeit und Auflösung der zu erstellenden Höhenmodelle (Abb. 90 und 91).

⁴⁶ Herzlichen Dank an dieser Stelle dem Leiter des Referats 21 (Geotopographie/Folgemaßstab) Herrn Andreas Klenner und dem Referenten Herrn Markus Schüler.

Auch wenn der durchschnittliche Abstand zweier Messpunkte im einfach gemessenen Bereich nur 0.69 m aufweist (Abb. 89), und es somit zu Interpolationen bei der Rasterung kommt, wurde eine Rasterweite von 50 cm als weitere Arbeitsgrundlage festgelegt. Aufgrund der nur vergleichsweise geringen Änderungen innerhalb des Reliefs wurde ein gewisses Maß an Interpolation und statistische Berechnung akzeptiert. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Messungen der Jahre 2018/2019 trotz ausreichender Punktdichte ebenfalls mit dieser Rasterweite berechnet.

3.3.2. DGM-Vergleiche

3.3.2.1. Methodik

Anhand der vorliegenden Bodenpunkte oder SfM-Fotos werden die DGM-Modelle errechnet, die den status quo für das jeweilige Jahr der Messung abbilden. Die Modelle können anschließend mittels Differenzberechnung analysiert werden, so dass im Ergebnis ein Rasterdatensatz entsteht, der im 1. Kanal nicht die Geländehöhe, sondern die Differenz der beiden Modelle enthält. Negative Werte bedeuten dabei einen Geländeabtrag, positive einen Geländeauftrag.

Aufgrund der aussagekräftigen Ergebnisse der von Christof Schubert (LfA) in den Jahren 2018 und 2020 durchgeführten Maßnahmen HOF-59 und HOF-65 wurden mehrere Denkmalflächen sowie Geländeabschnitte mit Erosionsrinnen und deutlichen Geländeunterschieden ausgewählt, um sie nach der gleichen Methodik zu untersuchen. Ziel war dabei, die durch Luftbilder und Feldbegehungen vermuteten Oberflächenveränderungen zu verifizieren und bestenfalls durch konkret messbare Bodenauftrags- bzw. -abtragswerte zu belegen.

Da nicht für alle ausgewählten Gebiete eine aktuelle Messung mit einem Multikopter möglich war und der Aufwand möglichst gering gehalten werden sollte, wurden für die Berechnungen der Höhenmodelle die oben beschriebenen Laserscan-Daten von GeoSN verwendet. Die ersten Befliegungen aus den Jahren 2008/2009 dienten zusammen mit den neueren Daten der Jahre 2018/2019 als Datengrundlage, aus denen die zu vergleichenden Geländemodelle berechnet werden konnten und somit ein Abbild der Geländeänderungen innerhalb von zehn Jahren abgebildet werden konnte.

Erstellen der DGM-Modelle

Die von GeoSN bereitgestellten Daten aus den Jahren 2008/2009 sind im Vergleich zu den jüngeren Messungen sowie den UAV Befliegungen mit Multikopter weniger hoch aufgelöst.⁴⁷ Die Rohdaten der unterschiedlichen Messungen wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf eine gemeinsame Größe gerastert (zunächst 10 cm pro Pixel). Dabei entstanden durch Interpolierung der Rohdaten aus frühen Messungen eine höhere Anzahl berechneter, anstatt gemessener Daten im Vergleich zu den jüngeren höher aufgelösten Messungen.

Beide Rohdatensätze (von 2008 und 2018) sollten zur besseren Vergleichbarkeit auf das gleiche Raster gerechnet werden. Für die Erstellung des Polygonnetzes wurde die einfache Kriging-Methode verwendet. Bei dieser geostatistischen Interpolationsmethode werden Autokorrelationen hergestellt. Es

⁴⁷ Siehe Kapitel „Analyse Bodenpunkte“

werden also die statistischen Beziehungen zwischen den bekannten Punkten der Datengrundlage in die Modellierung mit einbezogen. Dies erlaubt sowohl die Erstellung einer Oberfläche aufgrund der gegebenen Werte, als auch eine Abschätzung über die Genauigkeit der Vorhersagekraft der Modellierung. Gegenüber anderen Methoden ist die geostatistische Interpolation deutlich komplexer und rechenaufwendiger. Die Kriging-Interpolation wird häufig eingesetzt, wenn die Verteilung der bekannten Datenpunkte unregelmäßig bzw. die Punktdichte gering ist. Sie liefert dabei theoretisch die genauesten Angaben an den Stellen, für die keine Messpunkte vorliegen. Darüber hinaus ermöglicht Kriging durch die Ausgabe des Schätzfehlers ein Vorhersagemodell, das mit anderen Interpolationsmethoden nicht möglich ist.⁴⁸

Für die Berechnung des Rasters kommt das Programm ‚Surfer‘ in der Version 13.6.618 zum Einsatz. Hierbei werden die unter dem Kapitel „Datengrundlagen“ beschriebenen Listen der Bodenpunkte entsprechend der jeweiligen Jahre einzeln über die Menüpunkte ‚Grid‘ und ‚Data...‘ in das Programm importiert. In der Voransicht kann die Einteilung der einzelnen Datensätze, respektive Koordinaten, in Spalten mit Rechts-, Hoch-, und Höhenwert kontrolliert werden (Abb. 92). Nach dem Import der Daten erfolgt deren Zuordnung (Abb. 93/1). Die Feineinstellungen zum Kriging-Verfahren bleiben unverändert. Im Bereich ‚Grid Line Geometry‘ kann nochmals überprüft werden, für welchen Koordinatenbereich ein Raster berechnet werden soll. Sollte nicht bereits bei der Vorbereitung der Daten im Vorfeld ein grobes Fenster definiert worden sein⁴⁹, kann hier der zu berechnende Bereich nochmals eingegrenzt werden. Je genauer der Zuschnitt ist, desto weniger Zeit wird für die Berechnung benötigt. Unter dem Punkt ‚Spacing‘ wird die Rasterauflösung angegeben. Für die ersten Versuche wurde hier eine Größe von 10 cm pro Pixel angegeben. Dieser Wert wurde nach einigen Versuchen auf 50 cm pro Pixel angehoben (Wert: 0.5, Abb. 93/2).⁵⁰

Durch das Kriging-Verfahren wurde ein Raster erzeugt, das in jeder GIS-Anwendung weiterverarbeitet werden kann. Für die weiteren Arbeitsschritte kam das Open-Source-Programm QuantumGIS (QGIS) in der aktuellen Langzeitversion 3.16.8 zur Anwendung. Hierzu lässt sich das als *.grd-Datei vorliegende Raster direkt in QGIS laden. Die berechneten Raster der beiden Laserscan-Messungen von 2008/2009 und 2018/2019 wurden zunächst als georeferenzierte tif-Datei (Rasterdatei) abgespeichert. Da die Punkte der Laserscans in unterschiedlichen Koordinaten-Referenzsystemen vorlagen (Kap. „Datengrundlagen“), erfolgte nun die Umrechnung der Rasterdatei aus den Punkten von 2008/2009 in die Projektion ETRS89/UTM Zone 33N.⁵¹ Dafür wurde das kostenlose Tool KooTransSN verwendet, das mit dem gitterbasierten Transformationsansatz NTv2 die Umrechnung von Rasterdateien, Shape-Dateien oder Punktlisten aus einem der beiden verwendeten Koordinatensysteme in das jeweilige andere mit einer hohen Genauigkeit ermöglicht. Dieser Ansatz basiert auf einem regelmäßigen Passpunktgitter. Für jeden Gitterpunkt wird in einem einmaligen Vorprozess der Längen- und Breitenunterschied zwischen dem Start- und dem Zielbezugssystem berechnet und in einer Datei, der Gitterdatei, bereitgestellt. Die Transformation erfolgt durch einfache, bilineare Interpolation zwischen den gegebenen Koordinatenshifts der umliegenden Gitterpunkte. Die Genauigkeit der Transformation ist abhängig von der Maschengröße des Gitters und der Qualität der

⁴⁸ Jean-Paul Chilès, Pierre Delfiner: Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty, 2012. DOI:10.1002/9781118136188

⁴⁹ s. Kap. „Datengrundlagen“ und Verwendung von ‚las2txt‘.

⁵⁰ s. Kap. „Analyse Bodenpunkte“.

⁵¹ Die LIDAR-Daten von 2008/2009 wurden im System DHDN / Gauß-Krüger Zone 4 (EPSG: 31468) bzw. DHDN / Gauß-Krüger Zone 5 (EPSG: 31469) aufgenommen. Im Jahr 2018/2019 liegen die Punkte als Koordinaten in der Projektion ETRS89/ UTM Zone 33N (EPSG: 25833) vor.

Parameter, welche zur Berechnung der Koordinatenshifts der Gitterpunkte führten.⁵² Die Grundeinstellungen des Programms bleiben weitestgehend erhalten. Es sollte lediglich in den Rasteroptionen die Resample-Option auf ‚cubic‘ eingestellt werden (Abb. 94).

DGM-Differenzberechnung

Sobald beide Rasterdateien des gleichen Ausschnitts im Koordinatenreferenzsystem ETRS89/UTM Zone 33N vorliegen und in das QGIS-Projekt geladen sind, erfolgt die Differenzberechnung der beiden DGM-Modelle. Zunächst sollte unter den Layereigenschaften unter dem Menüpunkt ‚Symbolisierung‘ die Abtastung in den Zoomstufen ebenfalls auf ‚kubisch‘ eingestellt werden. Dies verhindert eine Kachelung der Rasterdaten bei der Veränderung der Zoomstufe. Jeder Punkt in der Rasterdatei besitzt neben den Lagekoordinaten auch einen Höhenwert. Um beispielsweise mögliche Veränderungen der Geländeoberfläche zwischen 2008 und 2018 festzustellen, wird nun mittels des Rasterrechners in QGIS das DGM aus 2008 von dem aus 2018 subtrahiert (Beispiel-Syntax: "ALS2018_DGM@1" - "ALS2008_DGM@1") und das Ergebnis wiederum als GeoTiff abgespeichert (Differenz_2008-2018.tif). Dabei bezeichnen positive „Z-Werte“ einen Geländeauftrag, negative einen Geländeabtrag (Abb. 92). Die Werte können dabei beliebig klassifiziert und eingefärbt oder in der Überlagerung mit dem aktuellen Höhenmodell den Zusammenhang mit dem Relief visualisiert werden.

Korrekturen/Kalibrierung

Für die vom Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) zur Verfügung gestellten LIDAR-Daten wird eine Genauigkeit in der Lage von +/- 2 cm und in der Höhe von +/- 15 cm angegeben. Diese Abweichungen können auf unregelmäßige sowie regelmäßige (systematische) Fehler zurückgehen. Während ein möglicher Lagefehler vernachlässigt werden kann, bewegt sich die Ungenauigkeit in der Höhe in einem für die angestellten Untersuchungen relevanten Bereich. Eine genauere Betrachtung der Datensätze zeigt, dass zwischen den Datensätzen einzelner Befliegungen systematische Verschiebungen in der Höhe, etwa durch Fehler in der GPS-Lokalisierung während der Messung, vorliegen können. Diese müssen vor einem Vergleich der DGM für jede Untersuchungsfläche gesondert ermittelt und durch eine Verschiebung in der Höhe ausgeglichen werden.

Um den Korrekturwert zu ermitteln, müssen die Höhenwerte beider DGM, die aus den gefilterten Bodenpunkten errechnet wurden, verglichen werden. Dafür werden ein, besser jedoch mehrere Bereiche herangezogen, die von beiden Modellen abgedeckt sind und eine möglichst ebene Fläche abbilden. Ideal sind für diesen Zweck Asphaltstraßen, Parkplätze oder gepflasterte Höfe. Um ausschließen zu können, dass in diesen Zonen Bauarbeiten, etwa eine Schwarzdeckenerneuerung stattgefunden haben, muss zunächst über aktuelle und historische Orthofotos ein visueller Abgleich durchgeführt werden. Anschließend wird über eine frei gewählte und möglichst lange Strecke (Abb. 95A) auf diesen Flächen das Profil der jeweiligen DGM abgebildet und verglichen. Dies geschieht mit dem frei verfügbaren Plugin „Profile Tool“ in QGIS. In die Programmoberfläche werden die zu vergleichenden und zuvor im QGIS-Projekt geladenen Modelle (Rasterdateien) hinzugefügt und entlang einer temporären oder als shape vorliegenden Profillinie das Profil berechnet. Im Idealfall verlaufen diese Profillinien weitgehend kongruent oder mit nur sehr geringen Abweichungen von höchstens 1-2-cm. Bei Abweichungen ist zu prüfen, welche jeweilige Ursache dem zugrunde liegt.

⁵² <https://www.landesvermessung.sachsen.de/methoden-der-transformation-5587.html>

Bei einem Austausch der Schwarzdecke oder sonstigen mit Bodeneingriffen verbundenen Baumaßnahmen unterscheiden sich die Profillinien oft nur lokal; die Abweichungen setzen sich nicht auf anderen Straßen o. ä. fort. Deshalb ist es wichtig, möglichst viele Referenzflächen im DGM zu betrachten. Wenn beide Profillinien sich in einem relativ konstanten Abstand zueinander bewegen und dabei einen ähnlichen Verlauf aufweisen (Abb. 95b), kann von einer Verschiebung ausgegangen werden, die aus o. g. Gründen während der Messung aufgetreten ist und korrigiert werden kann. Diese Verschiebung sollte auf allen Referenzflächen annähernd gleich bleiben. Mittels des Plugins „Profile Tool“ können die auf der Profillinie liegenden Höhenwerte der verglichenen Modelle als Tabelle ausgegeben und anschließend in einer Tabellenkalkulationsanwendung, wie Microsoft Excel, die Differenzen gebildet werden. Der Mittelwert der Differenzen bildet den Faktor, um den das ältere Modell in Richtung des jüngeren verschoben wird. Mit dem so kalibrierten DGM wird anschließend die Differenzberechnung der beiden Geländemodelle durchgeführt (Abb. 96).

Als Referenzflächen für das Beispiel Hof/Stauchitz gilt der „Papiermühlenweg“, dessen Verlauf das Korrekturprofil folgt (Abb. 95-96). Die südlich des Denkmals gelegene Straße wurde zwischen den beiden Messflügen grundhaft erneuert. Das Fehlen einer zweiten Referenzfläche zur Überprüfung des errechneten Versatzes der Profillinien wird durch eine zweite Messung ausgeglichen, die im Jahr 2020 durch eine eigene UAV-Befliegung erfolgte. Im Ergebnis ist zu erkennen, dass sich die Profilkurve der ALS-Messung von 2018 und der UAV-Messung von 2020 in den Bereichen, wo die UAV-Messung nicht durch Vegetation gestört ist, im Wesentlichen decken. Das DGM aus dem Jahr 2008 konnte daher dem DGM von 2018 angeglichen werden (-0.093 m).

Im Gebiet Leuben fehlen bisher Drittmessungen. Hier konnten jedoch zwei Abschnitte unterschiedlicher Straßen verglichen werden. Der Abgleich der Profile erbrachte auf der nördlich der Untersuchungsfläche gelegenen Straße eine durchschnittliche Differenz von 0,065 m und auf der südlich angrenzenden Straße einen Durchschnittswert von 0,034 m. In diesem Fall wurde das DGM von 2019 um den Mittelwert aus beiden Differenzen verschoben (-0,049 m).

3.3.2.2. Zwischenfazit und -diskussion

Die so gewonnenen Ergebnisse wurden für die jeweiligen Testbereiche einer ersten visuellen Analyse unterzogen, bei der sowohl Gemeinsamkeiten als auch Abweichungen und denkmalspezifische Muster auffielen. Grundsätzlich ist aber in allen Fällen festzuhalten, dass die angewandte Methodik plausible Ergebnisse erbringt und daher die methodisch richtige Wahl darstellt. Die z. T. bereits empirisch beobachteten morphologischen Veränderungen an obertägigen Wallanlagen (z. B. Hof/Stauchitz) oder verschiedenen Dellen-Rücken-Systemen in der Lommatzcher Pflege (Pitschütz, Leuben) werden durch die Ergebnisse der Differenzberechnung deutlich bestätigt.

Bereiche mit tendenziellem Auftrag können klar von Abtragszonen unterschieden werden. Insbesondere die Bearbeitungsrichtungen durch Landmaschinen sowie deren Wechsel, besonders jedoch Fahrspuren innerhalb der Schläge, ferner Erosionserscheinungen in Rinnensystemen und Höhenveränderungen in besonders exponierten Hang-, Rücken oder Kuppenlagen lassen sich deutlich herausarbeiten. Ackerbaulich genutzte Bereiche unterscheiden sich erwartungsgemäß signifikant von Grünland oder Weideflächen. Ebenso machte die Analyse unbekannte Aufträge im Bereich ganzer Schläge sowie Anomalien in der DGM-Berechnung sichtbar. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Differenzberechnung für drei ausgewählte Untersuchungsgebiete näher dargestellt werden.

Hof/Stauchitz

Das Verfahren des DGM-Vergleichs auf die frühmittelalterliche Befestigung von Hof/Stauchitz anzuwenden (D-66290-02), ist der überörtlichen Bedeutung und besonderen Gefährdung des Kulturdenkmals geschuldet. Die auf einem glazialen Kiesrücken am Südrand der Jahnaue gelegene Wallanlage wurde seit 1900 durch eine intensive ackerbauliche Nutzung um bis zu 1 m eingeebnet. Durch den DGM-Vergleich sollte überprüft werden, ob bereits für die letzten zehn Jahre Höhenunterschiede bzw. morphologische Veränderungen nachzuweisen sind.

Die Prüfung des berechneten Differenz-Rasterbilds bestätigt diesen Eindruck. Ein Geländeabtrag ist besonders deutlich in den „exponierten“ Bereichen, d. h. dort, wo das Geländere relief eine lokale Erhebung aufweist, namentlich im Verlauf des inzwischen flachen Walls sowie nördlich davon im Bereich der zentralen Kuppe im Burginnern, festzustellen (Abb. 96). Umgekehrt wird Bodenmaterial in die wallparallelen Senken und Dellen zwischen der zentralen Kuppe und dem Wall bzw. an den äußeren Wallfuß verfrachtet.

Im östlichen Bereich des Ringwalls fällt ein erhöhter Abtragsstreifen auf, der sich nach Südosten außerhalb der Befestigung fortsetzt und offensichtlich nicht direkt mit dem Relief zusammenhängt, sondern die während der Grabungskampagne 2003 nordöstlich des Grabungsschnittes als Abraumlagerung genutzten Flächen spiegelt, wo sich nach der Rückverfüllung des Aushubs nicht wieder das ursprüngliche Relief zurückgebildet hat. Dagegen ist jener Bereich als Auftragszone (blau) markiert, wo 2003 ein besonders tiefer Schnitt durch den äußeren, ca. 5 m tiefen Graben angelegt worden war, von Setzungen nach der Wiederverfüllung auszugehen ist und nach 2003 eine sukzessive Ablagerung von Material in der Delle stattgefunden haben muss.

Deutlich zeichnet sich die Bearbeitungsrichtung ab. Während der Großschlag von Nordosten nach Südwesten, d.h. größtenteils senkrecht zum Wall bestellt wird, ist auf den kleineren Schlägen im Osten und Südosten eine Bearbeitung von Nordwesten nach Südosten erkennbar. Der Großteil der Fläche weist nur eine sehr geringe oder keine messbare Veränderung auf. Kartiert man nur Bereiche mit Auftrag, treten besonders die Übergänge zu höher liegenden Wegen/Straßen oder Schlagbegrenzungen als Sperre hervor, wo sich offensichtlich Bodenmaterial akkumuliert (Abb. 97). Kleinere Auftragsbereiche sind im nordwestlichen und südöstlichen Bereich der untersuchten Fläche zu beobachten, wo die Verlagerung tendenziell nachlässt. Geradezu als „Sedimentfalle“ scheint eine Depression nördlich der B169 zu wirken, die mit einer, teilweise verfüllten ehemaligen Kiesgrube identisch ist. Auch aus diesen Gründen kann den Berechnungen ein hohes Maß an Plausibilität attestiert werden.

Pitschütz

Das Gebiet von Pitschütz zeichnet sich durch eine hohe Dichte archäologischer Denkmale, vor allem bandkeramischer Siedlungen und zahlreiche Erosionsrinnen aus, die im Wechsel mit Geländerrücken oder Verebnungsflächen das Relief prägen. Anhand dieses Beispiels sollte kontrolliert werden, inwiefern sich der Auf- bzw. Abtrag innerhalb und um die Rinnen sowie im Bereich einer typisch wellenförmigen Oberfläche des mittelsächsischen Lößhügellandes in den letzten zehn Jahren entwickelt hat.

Die Ergebnisse der Differenzberechnung zeigen erwartungsgemäß ein anderes Bild als das von Hof/Stauchitz. Auffällig ist hier der insgesamt höhere Auftrag (Abb. 98). Im Norden des untersuchten Gebietes quert eine Straße von West nach Ost. Auch hier kann ein erhöhter Auftrag beobachtet werden, zumal die Straße am Fuß eines Hangs liegt, der von Norden nach Süden abfällt. Zudem zeichnen sich vor allem die Erosionsrinnen durch Aufträge aus. Am Beispiel von Pitschütz ist weiterhin gut zu erkennen, dass sich die einzelnen Schläge ihrer räumlichen Nähe zum Trotz deutlich in den Abtragswerten unterscheiden, was nicht allein auf das Geländere Relief zurückzuführen sein kann. Das gilt besonders für den Schlag nördlich der Straße sowie im Südwesten. Der Schlag im zentralen Bereich der Untersuchungsfläche ist dagegen durch einen größeren Auftrag charakterisiert. Diese schlagspezifischen Differenzen spiegeln Unterschiede in der Bearbeitung, Bodenbedeckung und Fruchtart zum jeweiligen Befliegungszeitpunkt, deren genauen Ursachen in den Schlagkarteien der Landbewirtschaftler nachgegangen werden müsste. Umgekehrt stützen beträchtliche Geländeänderungen im Nordosten, die auf nachgewiesene Lagerflächen sowie Bautätigkeiten im Bereich der Milchviehanlage von Pitschütz (Silobau) zurückzuführen sind, den gewählten Ansatz des DGM-Vergleichs.

Leuben

Das Untersuchungsgebiet Leuben wurde aufgrund von starken Erosionsvorgängen nach Starkregenereignissen ausgewählt, die bei Geländebegehungen im Bereich einer archäologischen Fundstelle 2013 zu beobachten waren (Abb. 1). Zudem war das erosionsgefährdete Einzugsgebiet bereits Gegenstand geomorphologischer Untersuchungen in den 1970er Jahren (Abb. 99).⁵³

Im Bereich einer großen, von West nach Ost verlaufenden Erosionsrinne, die nach Osten hangabwärts in den Ketzerbach entwässert, sollte exemplarisch die Geländeänderung zwischen den beiden Laserscan-Messungen von 2008 und 2019 analysiert werden (Abb. 100). Deutlich zu erkennen ist ein Auftrag innerhalb der Rinne im noch verzweigten oberen Bereich. Nach Osten nehmen mit zunehmender Neigung die Erosionsvorgänge zu, die sich folgerichtig in einem größeren Abtrag niederschlagen. Am östlichen Ausgang der Rinne, kurz vor der Einmündung in den Ketzerbach werden die abgetragenen Sedimente wieder aufgeschwemmt und bilden einen Sedimentfächer. Besonders markant geben sich die stark erodierten Bereiche auf den höher gelegenen Kuppen nördlich und südlich der Rinne zu erkennen.

Für eine bessere Darstellung wurden nur Bereiche kartiert, die einen Abtrag von 0,1 m oder darüber aufweisen. Dafür musste die Differenzberechnung angepasst werden, indem der Befehls-Syntax ein zusätzlicher Parameter hinzugefügt wird (Beispielsyntax: "ALS2018_DGM@1" - "ALS2008_DGM@1 ≤ -0.1"). Das berechnete Rasterbild kann nun über die Symbolisierung mit Graustufen oder eine sich abhebende Farbe bzw. Transparenz über das Orthofoto gelegt werden und zeigt, wie groß die Übereinstimmung der berechneten Abtragsbereiche mit dem bereits an der Oberfläche zutage

⁵³ M. Kramer, Untersuchungen über die rezente Bodenerosion im mittelsächsischen Lösshügelland. Wiss. Zeitschr. Des Pädagogischen Instituts Dresden, Math-Naturwiss. Reihe, 1-2, 1966, 43-48; M. Kramer, Bodenerosion und Flurordnung im mittelsächsischen Lössgebiet. In: H. Richter (Hrsg.), Nutzung und Veränderung der Natur. Tagungsband anlässlich des III. Geographen-Kongresses der Deutschen Demokratischen Republik 1981 in Leipzig. Wiss. Abhandlungen der Geographischen Gesellschaft der Deutschen Demokratischen Republik 15 (Leipzig 1981) 211-220; ders. Landschaftliche Funktionskennzeichnung und Bodenerosion. Ergebnisse physisch-geographischer Prozeßforschung im mittelsächsischen Lössgebiet. Dresdner Geographische Beiträge 1, 1997, 39-56.

tretenden Lössen bzw. Sanden und Kiesen (helle Zonen) ist, die als besonders stark erodiert gelten müssen (Abb. 100; s. auch die bodenkundlichen Untersuchungen).

Um eine Verschneidung anstatt in Grauabstufung beispielsweise mit einer Schraffur besser Visualisieren zu können, bedarf es einer Vektorisierung der Differenz-Rasterdatei. Dafür wurden entsprechende Workflows erarbeitet. Zusätzlich zur zweidimensionalen Darstellung lassen sich die Differenz-Modelle inklusive der überlagerten Orthofotos auch dreidimensional bzw. in einer isometrischen Ansicht darstellen (Abb. 102-103). Eine solche Modellierung gibt bereits ohne großen Aufwand über den Zusammenhang von Hangneigung, Relief und Erosion Auskunft.

3.3.2.3. Weiterführende Analysen

3.3.2.3.1 Plausibilitätskontrollen

Diese Beispiele demonstrieren eindrucksvoll, dass nach einer Kalibrierung bereits deutliche Tendenzen am Differenzbild abgelesen werden können und ein Auf- bzw. Abtrag gerade dort gemessen werden kann (exponierte Lagen, Erosionsrinnen oder ehemalige Grabungsschnitte, Bodeneingriffe), wo Reliefveränderungen tatsächlich zu erwarten sind.

Um die Ergebnisse noch besser abzusichern, mögliche Prozessierungsfehler auszuschließen und nicht zuletzt bewirtschaftungsbedingte Faktoren herauszuarbeiten, wurden unmittelbar benachbarte Schlägen verglichen, die einer nachweislich unterschiedlichen Bodenbearbeitung ausgesetzt sind. Dafür wurde eine Versuchsfläche des LfULG in Methau einer DGM Analyse unterzogen (Abb. 104-105), bei der drei jeweils 27 m breite Blöcke, die nochmals in sich dreigeteilt sind, untersucht werden konnten. Je ein 9 m breiter Streifen wird konventionell mit dem Pflug bearbeitet (P1 - P3), je ein 18 m breiter Streifen wird (seit 2009) einheitlich konservierend mit dem Schwergrubber bearbeitet (K1 - K3). Von 1992 bis 2009 war dieser letztere Streifen nochmals in drei Varianten unterteilt (LFULG 2012), wobei alle drei Varianten nichtwendend bearbeitet wurden und daher der konservierenden Bodenbearbeitung zuzurechnen sind. Die Bearbeitung erfolgt grundsätzlich hangabwärts. Seit 2009 rotiert die Fruchtfolge WW, WG, Mais (mit Zwischenfruchtanbau in der Variante Konservierend nach WG bzw. vor Mais) über die drei Blöcke (1992 bis 2009: ZR statt Mais). Die Nebenernteprodukte bzw. Erntereste verbleiben in allen Varianten auf der Fläche.⁵⁴ Im westlichen der drei Blöcke hebt sich der gepflügte Streifen (die gepflügten Streifen entsprechen jeweils dem östlichen Drittel eines Blockes) mit einem deutlich höheren Abtrag vom konservierend bearbeiteten Streifen ab. Bei den anderen beiden Blöcken sind Unterschiede nicht so deutlich erkennbar. Weiterhin fällt auf, dass insbesondere im Bereich der Kuppe des westlichen und mittleren Blocks auch auf den konservierend bearbeiteten Streifen Abträge und Absetzungserscheinungen erkennbar sind. Dies deckt sich mit Beobachtungen vor Ort. Die Kuppen sind in der Regel einer größeren Erosion ausgesetzt als die Hanglagen. Deutlich heben sich wiederum die vier Sondierungsgruben (Bodenprofile) westlich des ersten Blocks ab. Am Hangfuß der gepflügten Streifen fallen akkumulierte Sedimente auf, die von den oberen Hangbereichen stammen müssen. Bemerkenswert ist auch der großflächige Auftrag im Schlag westlich der Untersuchungsfläche. Ursache könnten hier eine bereits aufkeimende Vegetation, wendende Bodenbearbeitung oder ein Auftrag von Mist/Gülle o. ä. zum Befliegungszeitpunkt sein.

⁵⁴ Kohlenstoffdynamik im pfluglosen Ackerbau, Schriftenreihe LfULG, Heft 6/2018, S. 65-67.

Ähnliche Beobachtungen lassen sich auch auf den Versuchsflächen des LfULG in Lüttewitz anstellen (Abb. 106), wo sich insbesondere ein konventionell bewirtschafteter Streifen im Westen heraushebt und einmal mehr deutlich wird, welchen Einfluss die Bewirtschaftung auf den DGM-Vergleich hat.

3.3.2.3.2 Drittmessungen

Teile der Fläche des Freistaates Sachsen wurden bereits ein drittes Mal befliegen und die Daten vom GeoSN zur Verfügung gestellt. Dies betrifft zurzeit das Vogtland und Teile des Erzgebirges. Die übrigen Teile Sachsens werden sukzessive weiter befliegen, so dass in naher Zukunft für alle Landesteile ein weiterer Satz an Laserscandaten zu Verfügung stehen wird. Während bei lediglich zwei Messungen nur der jeweilige status quo der Reliefbeschaffenheit bzw. des Auf- und Abtrags abgebildet werden kann, lässt sich durch eine dritte Messung möglicherweise bereits eine Tendenz in bestimmten Bereichen postulieren.

Für eine Beispielanalyse wurde ein Gebiet bei Waldenburg ausgewählt, in dem in unmittelbarer Nachbarschaft sowohl konventionell bearbeitete Landwirtschaftsflächen als auch Schläge nebeneinander liegen, die seit über 20 Jahren im Direktsaatverfahren bestellt werden. Die nahezu gleichbleibenden Messergebnisse auf den Schlägen mit Direktsaat (obere Hälfte des Untersuchungsbereiches, Abb. 107-109) weisen in den beiden Beobachtungszeiträumen 2006-2015 und 2015-2020 auf geringe Veränderungen und eine hohe Reliefstabilität hin. Lediglich in den Hanglagen verursachten erosive Prozesse einen geringen Abtrag. Gleichzeitig verrät der Vergleich Auffälligkeiten, die unmittelbar auf die landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführen sein dürften. Vergleichsweise hohe Abträge in den östlichen Schlägen von 2006-2015 stehen großflächige Aufträge des südlichen Schlags in den Jahren 2015-2020 gegenüber. Hier wird es unumgänglich sein, den jeweiligen Bewirtschaftungszustand zur Zeit der Messungen zu eruieren (wendende Bodenbearbeitung, Mist- oder Gülleaufbringung, Vegetation) und aus den Schlagkarteien zu ermitteln.

3.3.2.3.3 Verschneidung mit ABAG-Karten

KSR-Karte

Zur Verifikation und nicht zuletzt auch Validitätsprüfung der gewonnenen Mess- und Analysedaten erschien es sinnvoll, Daten aus anderen Quellen zum Vergleich heranzuziehen. Besonders die Karte der Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hangneigung und Regenerosivität (KSR-Karte) scheint sich dafür zu eignen. Die KSR-Karte zur potenziellen Bodenerosionsgefährdung durch Wasser basiert auf der „Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung“ (ABAG), die im gesamten Bundesgebiet angewendet wird.⁵⁵ Die Karte beschreibt die standörtliche flächenhafte potenzielle Erosionsgefährdung unabhängig von den aktuellen Landnutzungen und der erosiven Hanglänge. Bodenabträge in Erosionsrinnen und -gräben werden bei dieser Bewertung nicht berücksichtigt.⁵⁶ Die Berechnung erfolgt durch die Verknüpfung von Bodenart (unter Heranziehung des K-Faktors⁵⁷ als Kenngröße für

⁵⁵ DIN 19708

⁵⁶ Dr. Arnd Bräunig; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Abteilung 4; Referat Boden und Altlasten, Erläuterung Erosionsgefährdungskarten Freistaat Sachsen Bodenerosion durch Wasser.

⁵⁷ Faktor der Erosionsempfindlichkeit des Bodensubstrates, abgeleitet aus Feinbodenart und Grobbodengehalt des Oberbodens (BK50). Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG 2020)

die Erosionsanfälligkeit einer Bodenart), Hangneigung (S-Faktor)⁵⁸ und der langjährig durchschnittlichen Regenerosivität (R-Faktor)⁵⁹. Die KSR-Karte zur Erosionsgefährdung liegt flächendeckend für Sachsen in einem 5-m-Raster vor.

Der Blick auf die Untersuchungsflächen in der Lommatzscher Pflege und den Gebieten des mittelsächsischen Lößhügellands lehrt, dass der Gefährdungsgrad bis zu Stufe 7 reicht (Abb. 110).

KSLR-Karte

Die KLSR-Karte berücksichtigt zusätzlich zu den K-, S- und R- Faktoren die erosiven Hanglängen (L-Faktor)⁶⁰ bezogen auf den jeweiligen Feldblock. Für die Berechnung des L-Faktors wird angenommen, dass einerseits die Feldblockgrenzen die erosionswirksame Hanglänge unterbrechen, d.h. als Barriere für den Oberflächenabfluss wirken und andererseits innerhalb des Feldblockes keine weiteren Barrieren vorhanden sind, die die erosionswirksame Hanglänge verkürzen. Der Berechnungswert aus den Faktoren KLSR steht für den Bodenabtrag eines dauerhaft unbedeckten Bodens (Schwarzbrache). Auf Grundlage dieser Auswertungskarte kann durch die Berücksichtigung des C-Faktors der Bodenabtrag für die tatsächlichen Bedingungen kalkuliert werden.⁶¹ Die ABAG-Ergebnisse repräsentieren den langjährigen mittleren flächenhaften Bodenabtrag in Tonnen pro ha und Jahr (Abb. 111).

Untersuchungsgebiet Leuben

Die KSR-Karte für das Untersuchungsgebiet bei Leuben (Abb. 112) unterstreicht die Erosionsgefährdung insbesondere in den Hangbereichen der Erosionsrinne (1) sowie im Osten die zum Ketzerbach abfallenden Bereiche (2). Gleiches gilt für einen Hangbereich nördlich der Straße (3), der zu einem weiteren Rinnensystem gehört, welches nicht mehr Teil des Untersuchungsgebietes ist und sich nördlich anschließt. Auch die übrigen Hangbereiche sind nahezu vollständig der Stufe 6 zugeordnet und damit als extrem hoch gefährdet eingestuft. Lediglich die Erosionsrinne selbst und die Akkumulationsbereiche westlich des Ketzerbaches sowie weniger steilen Reliefpartien sind niedriger eingestuft.

In der Überlagerung der Relief-Differenzdaten mit der KSR-Karte (Abb. 112) zeigt sich, inwiefern die durch Erosion gefährdeten Bereiche tatsächlich einem messbaren Abtrag unterliegen. Während die KSR-Karte eine Rasterweite von 5 m aufweist, liegen die aus dem Differenzmodell gewonnenen Daten in einem 50-cm-Raster vor. Dennoch lassen sich die Tendenzen auch im Differenzmodell feststellen. Zusätzlich kann die reale Erosion genauer lokalisiert und quantifiziert werden.

Nach dem Differenzmodell sind Abtragswerte ebenfalls für die Hangbereiche zu verzeichnen (Abb. 111), insbesondere die Südhänge (1) stimmen mit der Erosionsgefährdungskartierung der ABAG überein. Dennoch scheint der höchste Abtrag nicht an den Hängen, sondern direkt auf den Kuppen sowohl südlich als auch nördlich der Straße aufzutreten (2).⁶² Da auf der ABAG-Karte die Bodenabträge

⁵⁸ Hangneigungsfaktor, abgeleitet aus dem digitalen Geländemodell im 5m-Raster (DGM5). Digitales Geländemodell im 5 m-Raster (DGM5), generalisiert aus DGM2; Quelle: Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN 2012)

⁵⁹ Faktor der Regenerosivität, wurde auf Basis der radarbasierten Niederschlagsdaten RADKLIM für die Zeit von 2001 bis 2017 im 1-km-Raster berechnet (Deutscher Wetterdienst 2019)

⁶⁰ Faktor der erosiven Hanglänge abgeleitet aus dem digitalen Geländemodell im 5m-Raster (DGM5) mit der Feldblockbegrenzung als Barriere (Feldblockdaten Dez. 2012).

⁶¹ siehe Anm. 56

⁶² Zu diesem Sachverhalt lohnt sich auch ein blick auf das Orthofoto (s. u.).

in Erosionsrinnen nicht berücksichtigt werden, sind die dort auftretenden Abweichungen, vor allem im Unterlauf, als zusätzliche Spezifikation hilfreich (3).

Die Überlagerung der Abtragsbereiche mit der KSLR-Karte über dem aktuellen Höhenmodell liefert keine signifikant neuen Erkenntnisse (Abb. 113). Die Karte verdeutlicht etwas mehr die dem Verlauf der Höhen und Dellen angepassten erosionsgefährdeten Abschnitte. So ist die mit der Stufe 3 und 4 kartierte Kuppe, auf dem ein hoher Abtrag stattfindet, deutlich langgestreckter ausgeprägt.

In der DGM-gestützten Differenzkartierung werden Bearbeitungsrichtungen und technikbedingte Verlagerungsprozesse sichtbar, die ABAG-basiert Erosionsprognosekarten ebenso wenig abbilden wie E3D-Modellierungen. Im Fall von Leuben erfolgt die Bearbeitung von Nord nach Süd und damit nahezu senkrecht zum Verlauf des Rinnen-Rücken-Systems im Gelände. Die höchsten Abträge treten in den landwirtschaftlich genutzten Fahrspuren parallel zur Straße auf (Abb. 112-113).

Nicht zu unterschätzen ist die Verschiebung der hoch erosionsgefährdeten Hangbereiche zum tatsächlichen hohen Abtrag auf den Kuppen und Rücken (2). Dies ist damit zu erklären, dass in der Berechnung der Erosionsgefährdung die Hangneigung als wichtiger Faktor einfließt, die aber gerade im Bereich der exponierten – und damit besonders gefährdeten – Kuppen eher gering ist, die Gefährdung für Kuppen anhand des Modells also systematisch unterschätzt wird. Da die ABAG-Kartierung die flächenhafte potenzielle Erosionsgefährdung unabhängig von den aktuellen Landnutzungen beschreibt, ist demnach der Anteil technikbedingter Verlagerung auf den Kuppen deutlich höher zu veranschlagen. Da die Gefährdungskarten zudem keine Abträge in den Erosionsrinnen darstellen, ist der Abtrag im unteren Bereich der Erosionsrinne (3) vor allem auf die hohe Fließgeschwindigkeit des abfließenden Wassers zurückzuführen. Dagegen scheint hier die Verlagerung entlang der Bearbeitungsspuren weniger ins Gewicht zu fallen.

Untersuchungsgebiet Pitschütz

Im Untersuchungsraum von Pitschütz hängt die Erosionsgefährdung wie Leuben stark vom Relief und den Abflussbahnen ab (Abb. 114). Die höchste Stufe wird auf den Hängen des Dellensystems erreicht (1). Allerdings verlaufen die Erosionsrinnen im nördlichen Teil eher in Nord-Süd-, im südlichen Teil dagegen in Ost-West-Richtung. Unabhängig davon scheint die Erosionsgefährdung auf den Kuppen eher moderat zu sein. Nördlich der Straße im oberen Bereich des Untersuchungsgebiets erstreckt sich ein ausgedehnter Südhang, der nur im südlichen Hangauslauf erfasst ist und an die als Erosionssperre wirkende Straße grenzt (2). Klar zu erkennen sind auch die weniger gefährdeten Bereiche in den Rinnen selbst, wo Abträge nicht berücksichtigt werden.

Die Kartierung des tatsächlichen Abtrags von 2008 – 2018 deckt sich nur teilweise mit den besonders erosionsgefährdeten Bereichen. Die größten Übereinstimmungen sind in einigen Hangpositionen festzustellen, hier jedoch in etwas stärkerem Maße als beim Beispiel Leuben.

Größere Übereinstimmungen ergeben sich, wenn die erosive Hanglänge (L-Faktor) mitberücksichtigt wird (Abb. 115). Die beiden Straßen, die durch das Untersuchungsgebiet führen, werden als Feldblockgrenzen in die Berechnung einbezogen (1). Die größten Bodenverluste scheinen, wenigstens teilweise auf den hoch erosionsgefährdeten Hanglagen (2) stattgefunden zu haben. Doch gibt es

demgegenüber auch Hänge wie im Zentrum oder im Südosten der Untersuchungsfläche, die weitgehend von Abtrag verschont zu sein scheinen.

Gut verifizierbar sind die Abträge auf dem Unterhang nördlich der Straße (3), für die der querende Weg in der leichten Senke eine Erosionssperre bildet. Bewirtschaftungsunterschiede zwischen den jeweiligen Schlägen (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung etc.) müssen in jedem Fall in Betracht gezogen werden und schlagen sich insbesondere in einer Kartierung der Aufträge nieder (Abb. 115). Der unter (1) bezeichnete Schlag, der nach Norden und Osten durch einen Feldweg begrenzt wird, weist so gut wie keinen Auftrag, sondern fast ausschließlich Abtrag auf (s. KSLR mit Abtrag Abb. 115). Im zentral gelegenen Schlag (Abb. 114,2) ist trotz einer klaren Bearbeitungsrichtung von Nord nach Süd und damit quer zum Dellensystem ein Auftrag zu erkennen, der auch die erosionsgefährdeten Hänge betrifft. Besonders hoher Auftrag ist dagegen in zwei Erosionsrinnen im südlichen Bereich (3) zu verzeichnen (Abb. 115). Dies dürfte mit dem westlich gelegenen Feldweg zusammenhängen, der am oberen Ende der Delle eine Fließwassersperre bildet und dadurch weniger erosiv wirkendes Wasser nach Osten abfließen kann. Bei fehlender Sperre bleibt dieser Effekt aus (4).

Warum in großen Teilen des Untersuchungsraums insgesamt eher ein Auftrag zu beobachten ist, entzieht sich bislang einer eindeutigen Antwort und müsste künftig näher untersucht werden. Pauschalen und generalisierenden Schlüssen, die aus dem Vergleich von zwei Einzelmessungen gezogen werden, sind damit Grenzen gezogen, solange weder Zwischenstadien dokumentiert sind noch Aussagen zum Stand der Bodenbearbeitung und –bedeckung am Flugtag getroffen werden können.

3.3.2.4. Ergebnisse: Potentiale und Grenzen des Monitoring durch den DGM-Vergleich

Die Analyse digitaler Geländemodelle hinsichtlich der Oberflächenveränderungen hat gezeigt, dass klare Tendenzen über längere Zeiträume abgebildet werden können, nachdem die Daten einer Qualitätsprüfung, Kalibrierung und Plausibilitätskontrolle unterzogen wurden. Insbesondere bei obertägigen, scharf umgrenzten Bodendenkmalen (Wallanlagen, Grabhügel etc.) ist der DGM-Vergleich ein praktikables und kostengünstiges Instrument, um Oberflächenveränderungen in Größenordnungen von weniger als 10 cm und damit schleichende schädliche Prozesse an einem Denkmal retrospektiv für einen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren nachweisen zu können. Die Verlässlichkeit und Genauigkeit der Differenzmodelle erhöht sich mit jedem UAV-Flug (SfM), der in der Zwischenzeit durchgeführt werden kann (s. Hof/Stauchitz).

Im besonders erosionsgefährdeten mittelsächsischen Lösshügelland erstrecken sich archäologische Kulturdenkmale, z. B. bandkeramische Siedlungen, ebenso wie landwirtschaftliche Großschläge dagegen häufig über viele Hektar und ein Mosaik morphologischer Einheiten. Deshalb ist auch von einer hohen Differenzierung der Erhaltung innerhalb dieser Flächen auszugehen. Ebenso differenziert müssen die Ergebnisse des DGM-Vergleichs bewertet werden (s. Leuben/Pitschütz).

Voraussetzung dafür sind in allen Fällen standardisierte Qualitätsanforderungen an die von den Laserscans erhobenen Daten, wie sie vom Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) zur Verfügung gestellt werden. Es ist zu erwarten, dass mit fortschreitender Technologie und Entwicklung des Messverfahrens auch die Genauigkeit des Datenmaterials zunehmen wird. Mehrere Plausibilitätskontrollen haben insbesondere nach der Kalibrierung

unterschiedlicher Datensätze zu einer tragfähigen Methodik geführt, die im Ergebnis klare Tendenzen bei der Verlagerung von Bodenmaterial u.a. im Bereich von Bodendenkmalen durch Wassererosion, Schadverdichtung und technikbedingte Verlagerung aufzeigen. Insbesondere mehren sich die Hinweise, dass gerade eine technikbedingte Bodenverlagerung nicht unterschätzt werden darf. Erosionsprognosekarten und E3D-Modellierungen scheinen diese Faktoren nicht oder nur ungenügend abzubilden. Deshalb muss den signifikanten schlag- oder teilschlagspezifische Differenzen, die auf den Versuchsflächen des LfULG (Methau, Lüttewitz) nachweislich auf eine unterschiedliche Bodenbearbeitung (pfluglos/konservierend – wendend) zurückzuführen sind, künftig intensiver nachgegangen werden. Die minimalen Veränderungen auf Schlägen, die in Direktsaat bestellt werden (Waldenburg), sprechen andererseits eine deutliche Sprache, nicht zuletzt zugunsten dieser in hohem Maße boden- und damit denkmalschonenden Technik.

Dennoch wäre es noch verführt, den DGM-Vergleich ohne eine Plausibilitäts- und Einzelfallprüfung für ein generalisierendes Monitoring einzusetzen. Die Differenzanalysen zeigen zwar Tendenzen auf, denen in den Untersuchungsräumen Hof/Stauchitz und Leuben bereits eine hohe Konsistenz zugebilligt werden kann, müssen aber dort weiter ausgebaut und verfeinert werden (z. B. Pitschütz), wo offensichtlich teilschlag- und nutzungsspezifische Faktoren ins Spiel kommen.

Für die meisten Untersuchungsräume stehen derzeit zwei Messungen zur Verfügung, die das Gelände am jeweiligen Tag und zur jeweiligen Uhrzeit der Befliegung abbilden. Es ist davon auszugehen, dass der tagesaktuelle Bearbeitungszustand eines Schlages das Differenzbild signifikant beeinflusst: Dazu gehören etwa eine wendende Bodenbearbeitung (Pflugfurchen), der Auftrag von Mist oder Gülle sowie insbesondere die Art und der Entwicklungsstand der jeweiligen Feldfrucht (Raps, Wintergetreide etc.). Fruchtarten und Bodenbearbeitungsmaßnahmen erschließen sich aus den betrieblichen Schlagkarteien und müssten für den Befliegungszeitraum ermittelt werden, um Bewirtschaftungseinflüsse erfassen und damit auch das Differenzbild interpretieren zu können.

Um diesen noch offenen Fragen nachzugehen, ist es zielführend, regelmäßige und zusätzlich anlassbezogene Messungen z. B. durch UAV-Befliegungen (SfM) durchzuführen und an besonderen Zeitmarken wie Feldbestellung und Bestandsentwicklung oder Einzelereignissen (Starkregen) auszurichten. Insbesondere die Bodenbearbeitung und -bedeckung setzen einer generalisierenden Interpretation von DGM-Vergleichen fallweise enge Grenzen, die nur durch rechenintensivere Postprozesse überwunden werden könnten, um zusätzlich zum Ergebnis der Differenzberechnung Zwischenstadien bzw. Einflüsse von spezifischen Ereignissen aufzudecken. Dafür ist eine Zusammenarbeit mit den Bewirtschaftern unabdingbar, die Einblicke in ihre Schlagkarteien gewähren müssten, damit Fruchtfolgen, Bodenbearbeitungsschritte und ggf. Düngung in eine Auswertung einbezogen werden können. Da aus dem Einzugsbereich des kooperierenden Landwirtschaftsbetriebes, dessen Schläge durchweg nördlich des Arbeitsgebietes liegen, vorläufig keine Untersuchungsfläche ausgewählt wurde, muss eine Zusammenarbeit auf einen zweiten Vertiefungsabschnitt verlagert werden.

Vorläufig lässt sich eine Auswertung dieser betriebsspezifischen Daten auch durch flächendeckende hochaufgelöste Kartierungen zur landwirtschaftlichen Flächennutzung nicht zu ersetzen.⁶³ Die vom

⁶³ <https://www.thuenen.de/de/bw/aktuelles-und-service/fernerkundung-wo-wird-was-angebaut/>;

<https://ows.geo.huberlin.de/webviewer/landwirtschaft/index.html>.

Thünen-Institut, der Berliner Humboldt-Universität und dem Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) erstellten interaktiven Karten, denen Fernerkundungsdaten der Sentinel-Satelliten (Sentinel-1 und -2) des Copernicus-Programms der EU zugrunde liegen, bieten zwar schlaggenaue Informationen zur Fruchtarten und Landnutzung (Abb. 117, 119), reichen aber bislang lediglich bis 2017 zurück und lassen keine direkten Schlüsse auf die Bodenbearbeitung oder den Entwicklungsstand der Kulturart zum Befliegungszeitpunkt zu.

Es ist allerdings davon auszugehen, dass künftig satellitenbasierte Fernerkundungsdaten nicht nur für eine wochenaktuelle Überwachung von Baustoffabbaustätten (z. B. Kiesgruben) genutzt werden können, sondern auch verstärkt zur Unterstützung der Luftbildarchäologie, wenngleich die Auflösung noch nicht ausreicht, Bewuchsmerkmale in einer Detailschärfe zu identifizieren, die Orthophotos bieten, wenn sie zu einem günstigen Zeitpunkt aufgenommen wurden.

Vorläufig eignen sich Satellitendaten für die Analyse größerer Gebiete, nicht jedoch für (teil-)schlagspezifische Auswertungen in der Archäologie. Dennoch werden sowohl automatische Erkennungsverfahren von Agrar- und Anbaustrukturen⁶⁴ als auch Karten zum Monitoring klimawirksamer Maßnahmen in der Acker- und Grünlandbewirtschaftung⁶⁵ auf Anwendungsmöglichkeiten in der archäologischen Denkmalpflege zu untersuchen sein.

3.4. Monitoring durch Fernerkundung (Orthofotos und Luftbilder)

Die Analyse Digitaler Geländemodelle hinsichtlich der Oberflächenveränderungen hat gezeigt, dass klare Tendenzen über längere Zeiträume abgebildet werden können, nachdem die Daten entsprechenden Plausibilitätskontrollen unterzogen wurden. In einer weiteren Aufgabenstellung sollte die Eignung von Luft- und Orthofotos für ein Monitoring von Denkmalflächen geprüft werden.

3.4.1. Archäologische Luftbilder und Orthophotos im Vergleich

Die beiden Quellen unterscheiden sich zunächst hinsichtlich ihrer Aufnahmetechnik sowie der Jahreszeit. Seit 2005 werden im Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) farbige Orthofotos auf Grundlage von Luftbildern aus Bildflügen mit digitalen Kameras erzeugt. Neben den aktuellen Aufnahmen, die für die Lommatzcher Pflege aus den Jahren 2018-2020 stammen, können in der Regel fünf weitere historische Orthofotos der Jahrgänge 2005, 2005-2008, 2009-2011, 2012-2014 und 2015-2017 genutzt werden. Hinzu kommen zwei panchromatische Aufnahmen der Jahre 1995-2000 und 2000-2004. Vor 2005 wurden für die Herstellung der Orthophotos die analog vorliegenden Originalluftbilder unter Vorgabe der Bildelementgröße (Pixel) gescannt (Analog-Digital-Wandlung).⁶⁶ Die Orthofotos liegen bereits in einem entzerrten und georeferenzierten Format vor. Dabei erfolgt die Projektion der Luftbilder über ein Digitales Geländemodell (DGM) der Erdoberfläche. Durch die Transformation der zentralperspektivischen Aufnahme in eine Orthoprojektion (Parallelprojektion) werden die Pixel im geodätischen Bezugssystem lagerichtig abgebildet. Die Aufnahmen besitzen eine Bodenauflösung von 0,20 m, wobei die Standardabweichung eines Pixels von seiner tatsächlichen Lage $\leq 0,4$ m beträgt. Unter Angabe des Aufnahmejahres, in jüngerer Zeit

⁶⁴ <https://www.thuenen.de/index.php?id=7477&L=0>.

⁶⁵ <https://www.thuenen.de/index.php?id=11754&L=0>.

⁶⁶ <https://www.landesvermessung.sachsen.de/fachliche-details-5345.html>

auch des genauen Flugdatums, erfolgt die Erstellung der Orthofotos stets bei Hochvegetation. Seit 2010 werden sie als 4-Kanal (Rot-Grün-Blau-Infrarot) hergestellt. Aus diesen 4-Kanal-Orthophotos können die Arten Panchromatisch (Schwarz-Weiß), Farbe (Rot-Grün-Blau) und Color-Infrarot abgeleitet werden.

Neben den von GeoSN bereitgestellten Orthofotos besitzt das LfA einen reichen Fundus an Luftbildern.⁶⁷ Bereits 1991 wurde mit systematischen Befliegungen des Freistaates begonnen. Seit 2001 führt das Landesamt für Archäologie die Bildflüge in eigener Regie durch. Ziele sind die Kontrolle und fotografische Erfassung oberirdisch sichtbarer archäologischer Denkmale, die Dokumentation aktueller großflächiger Ausgrabungen und die Prospektion bislang unbekannter Fundstellen. Das Luftbildarchiv des Landesamtes für Archäologie verfügt zurzeit über mehr als 120 000 Luftbilder, die für die älteren Jahrgänge als Farbdia oder Schwarzweißnegativ, seit mehr als 10 Jahren aber als Digitalbilder vorliegen. Die Aufnahme der Fotos erfolgt unter dem sehr flexiblen, vom Pflanzenwachstum und den Wetterbedingungen abhängigen und kurzfristig planbaren Einsatz eines Leichtflugzeugs.⁶⁸

Die Flugprospektion (Erkundung noch unbekannter Denkmale) basiert auf der Tatsache, dass die Eingriffe des Menschen in die Erde die Bodenstruktur verändern. Dort, wo sich heute verfüllte Gräben und Gruben befinden, speichert der humosere Boden geringfügig mehr Wasser oder Nährstoffe und bietet den Pflanzen bessere Wachstumsbedingungen; dort, wo Wege den Boden verdichten oder Fundamente für einen steinigen Untergrund sorgen, ist das Pflanzenwachstum gehemmt. Diese kleinräumigen Unterschiede im Wachstumszyklus der Pflanzen, die letztlich heterogene Bodenverhältnisse spiegeln, lassen sich aus der Luft als Farbunterschiede oder Höhendifferenzen erkennen. Besonders deutlich treten die Merkmale bei einjährigen Pflanzen auf, insbesondere in Getreide und Raps, seltener Mais und Rüben, wobei sich das individuelle Wachstumsverhalten jeder Pflanze wie der Bildpunkt eines Digitalbildes verhält. Je heterogener sich ein Standort darstellt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, Strukturen zu entdecken, die sich als Bewuchsmerkmale ausprägen und archäologisch interpretierbar sind. Das Erscheinungsbild ist nicht nur von den Bodenverhältnissen, sondern von vielfältigen variablen Umständen abhängig, die sich im Jahreslauf verändern können. Dazu zählen beispielsweise der Umfang der Frostbelastung des Wintergetreides sowie Trockenheit oder Feuchte in den wichtigen Wachstumsmonaten April und Mai. Jeder Landwirt muss sich mit diesen Heterogenitäten und Variablen auseinandersetzen und kann darauf, sofern er Precision bzw. Smart Farming-Technik einsetzt, darauf flexibel und standortgenau reagieren.

Die aus etwa einer Höhe von 300-400 m angefertigten archäologischen Schrägaufnahmen dienen in erster Linie der Entdeckung, Lokalisierung und Dokumentation archäologischer Denkmale. Für eine Verschneidung mit weiteren Daten wie dem Digitalen Differenzmodell ist eine Georeferenzierung und Entzerrung der Fotos nötig, deren Genauigkeit nicht immer zu befriedigenden und für die weitere Verarbeitung ausreichenden Ergebnissen führt. Oft fehlen auf den Luftbildern entsprechende Referenzpunkte, um eine solche Entzerrung durchzuführen.

Die im Kontrast des Bewuchses angezeigten Unterschiede im Boden lassen sich primär qualitativ unterscheiden. Sie bieten Anhaltspunkte für Standortunterschiede, die jahreszeitlich variieren.

⁶⁷ Immer noch grundlegend: I. Weyhmann, Methodische Grundlagen der Luftbildarchäologie in Sachsen. Arbeits- und Forschungsberichte zur Sächsischen Bodendenkmalpflege 48/49, 2006/2007, 283-310.

⁶⁸ <https://www.archaeologie.sachsen.de/luftbildarchaeologie-4470.html>

Fallweise lassen sich aus Hell-Dunkel-Kontrasten (s. Leuben) Zonen von Erosion auf Rücken und Hängen sowie Akkumulation auf Hangfüßen und in den Rinnen oder Dellen ableiten. Die Bestandsunterschiede im Getreide oder Raps, mitunter sogar Mais lassen sich auf den großen Schlägen zu bestimmten Zeitpunkten sogar mit bloßem Auge erkennen (Abb. 118). Orthophotos zeigen im äußerst trockenen Aufnahmejahr 2018 selbst im mittelsächsischen Löss erhebliche Unterschiede in der Bestandsentwicklung. Die ungleich abreifenden Bestände weisen auf heterogene Bodenverhältnisse hin (Abb. 119). Insbesondere in den kolluvial gefüllten, wasser- und nährstoffgesättigten Dellen und Rinnen verlängern sich die Reifeperioden gegenüber erodierten, nährstoffärmeren und trockeneren Zonen; es besteht zumindest der Verdacht, dass in letzteren Bereichen auch archäologische Strukturen schlechter erhalten sind.

3.4.2. Bewuchsmerkmale und Ausgrabungsbefunde

Um diese Frage noch einmal zu vertiefen und Luftbilder mit tatsächlich nachgewiesenen archäologischen Strukturen in Beziehung zu setzen, wurden Luftbildfundstellen ausgewählt, auf denen im Nachgang Grabungen stattgefunden haben. Dabei sollte geprüft werden, ob sich ein Zusammenhang zwischen angezeigten Bewuchsmerkmalen und dem tatsächlichen Erhaltungszustand archäologischer Befunde, der bei einer Grabung dokumentiert wurde, herstellen lässt. Die Grundlage bilden georeferenzierte Luftbilder mit ausgrenzbaren Grabungsflächen.

Als Beispiel sei eine Untersuchungsfläche bei Folbern, Gde. Großenhain angeführt, die im Zuge des Baus einer Gasleitungstrasse prospektiert und anschließend ausgegraben wurde. Dabei handelt es sich um 120 Siedlungsgruben und 26 Pfostengruben der Jung- bis Jüngstbronzezeit (FLB-08). Für diesen Abschnitt liegen mehrere georeferenzierbare Luftbilder aus dem Jahr 1994 vor, die mit den dokumentierten Befunden aus dem Jahr 2008 überlagert und verglichen werden konnten. Einige Strukturen verraten sich tatsächlich durch dunkle Bewuchsmerkmale. (Abb. 119, nördlich der Straße und am südl. Ende der Grabung). Die Mehrheit der archäologischen Befunde sind auf den Luftbildern jedoch nicht zu erkennen (Abb. 120-122). Offensichtlich hängt es von ganz individuellen Standortbedingungen ab, wann Bewuchsmerkmale sichtbar werden. Schlüsse auf den Zustand des Bodendenkmals, die über eine reine Zeigerfunktion hinausgehen, lassen sich aus den Anomalien vorläufig nicht ziehen.

Ferner kann in den Untersuchungsgebieten auf Serien von Orthofotos zurückgegriffen werden, deren Aussagekraft für eine Gefährdungseinschätzung unter der Prämisse geprüft wurde, dass sich Veränderungen an einem archäologischen Denkmal in Sequenzen von Luft- und Orthobildern zeigen. Auf Flächenzusammenlegungen, Schlaggrößen oder Überbauung trifft dies in jedem Fall zu. In diesem Zusammenhang stellt sich allerdings die Frage, ob sich über morphologische Grundstrukturen wie Rinnen, Depressionen, erodierte Hänge oder Kuppen hinaus schleichende Prozesse einer rein visuellen Analyse erschließen. In der Tat lassen sich stark oder vollständig erodierte Zonen (s. Leuben) identifizieren, in denen Bestandsentwicklung und damit auch Erträge erheblich hinter günstigeren Standorten zurückgeblieben (s.o.). Jede landwirtschaftliche Ertragskarte spiegelt diese Unterschiede. An diesen Stellen ist mit einer akuten Gefährdung und mithin einer schlechteren Erhaltung von zu rechnen. Allerdings sind Wachstumsunterschiede an sogenannten Zeigerpflanzen nicht in jedem Jahr zu erkennen und bisweilen auch nicht immer ausgeprägt (Abb. 120-122); Boden, Fruchtart und -folgen, Bodenbearbeitung und schwankende Feuchtigkeit sind u.a. individuelle Standortfaktoren, die von Jahr

zu Jahr variieren und sich daher derzeit nicht in rechnerische, objektivier- und übertragbare Modelle übersetzen lassen. Eine visuelle Analyse unterliegt immer subjektiven Kriterien.

3.4.3. Ergebnisse

Vorläufig wäre es nicht zulässig, ohne weitere, vor allem pedologische Untersuchungen (s. 1. Kapitel) aus farblichen Abstufungen im Bewuchs bzw. einer differenzierten Entwicklung des Pflanzenbestandes, die auf archäologischen Luftbildern und Orthophotos der Landesvermessung sichtbar werden, direkte und generalisierende Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Bodens oder den Zustand eines Bodendenkmals zu ziehen sowie die Gefährdung genauer abzuschätzen, die vor allem auf lokale Bodenbildungen und kleinräumige Einflüsse des Mikroreliefs zurückzuführen ist.

Die Kombination von Differenzmodellen mit aktuellen wie historischen Luftbildern eignet sich jedoch für die Identifizierung von Gebieten, die von einer erhöhten Erosionsdynamik und damit einer besonderen Gefährdung archäologischer Denkmale gekennzeichnet sind. Eine belastbare quantitative Einschätzung des Gefährdungsgrades lässt sich mit Methoden der Fernerkundung (archäologische Luftbilder, Orthophotos, Satellitenbilder) bislang jedoch nicht realisieren.

3.5. Monitoring durch einen Vergleich von Ausgrabungsbefunden?

Seit Anfang der 1990er Jahre werden im Freistaat Sachsen systematisch und flächenhaft Rettungsgrabungen durchgeführt. Vor allem lineare Bauvorhaben wie Straßen- und Leitungstrassen führen vielfach durch mehrere naturräumliche Einheiten und bei Erweiterungs- und Ausbaumaßnahmen zu wiederholten Ausgrabungen. In allen Landesteilen wurden Leitungen neben Vorhandenen (z. B. EUGAL und OPAL-Trassen) verlegt und die benachbarten Trassen in Abständen von ca. 10 bis 15 Jahren archäologisch untersucht.

Hätte sich in dieser Zeit der Zustand archäologischer Substanz nennenswert verschlechtert, müssten diese Veränderungen im Vergleich von Geo- oder Befundprofilen mit erhaltenem Ah-Horizont zu beobachten sein. Die ausgewählten Untersuchungsflächen erbrachten keine signifikanten Unterschiede oder Profilverkürzungen, die nicht mit lokalen Bodenheterogenitäten oder kleinräumigen Einflüssen des Mikroreliefs erklärt werden könnten. Dieser Ansatz wurde daher vorerst nicht systematisch weiter verfolgt.

3.6. Diskussion und Fazit

In der angewandten Methodik haben sich die Vergleiche von Digitalen Geländemodellen als nicht-invasives Mittel am besten zur Datenerhebung geeignet gezeigt. Voraussetzung dafür sind jedoch standardisierte Qualitätsansprüche an die von den Laserscans erhobenen Daten, wie sie vom Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) zur Verfügung gestellt werden. Hierbei dürfte mit fortschreitender Technologie und Entwicklung des Messverfahrens auch das Datenmaterial an Genauigkeit zunehmen. Mehrere Plausibilitätskontrollen haben insbesondere nach der Kalibrierung unterschiedlicher Datensätze zu einer tragfähigen Methodik geführt, die als Ergebnis klare Tendenzen des Gefährdungspotenzials von Bodendenkmalen durch Erosion, Schadverdichtung und mechanische Bodenverlagerung aufzeigen. Besonders erwähnenswert seien hier die Ergebnisunterschiede bei Schlägen von nachweislich unterschiedlicher Bearbeitungstechnik.

Für zukünftiges Monitoring sollte die Differenzanalyse jedoch in einigen Punkten ausgebaut werden, um einerseits weitere Faktoren einzubeziehen und andererseits die erkennbaren Tendenzen zu schärfen. Bei den meisten untersuchten Gebieten liegen bisher zwei Messungen vor, die das Gelände am jeweiligen Tag und zur jeweiligen Uhrzeit der Befliegung abbilden. Daher kann es dazu kommen, dass ein tagesaktueller Bearbeitungszustand des Schlags signifikanten Niederschlag im Differenzbild erhält (z. B. Mist- oder Gülleauftrag, Bodenbearbeitung, Bewuchs). Es wäre daher anzustreben, ereignisgesteuert zusätzliche Messungen durch eigene UAV-Befliegungen durchzuführen, bspw. nach Starkregen, Ackerumbruch oder nach der Ernte. Je nach Vegetationsperiode sind hier möglicherweise auch Grenzen gesetzt oder zumindest rechenintensivere Postprozesse zu beachten. Ein solcher Ansatz würde zusätzlich zum Endergebnis der Differenzberechnung auch teilweise die Zwischenschritte bzw. den Einfluss bestimmter Ereignisse dokumentieren.

Festzuhalten ist dagegen, dass Luftbilder und Orthophotos derzeit keine direkten, insbesondere quantifizierenden Schlüsse auf den Erhaltungszustand archäologischer Strukturen und im Vergleich unterschiedlicher Jahrgänge damit auf Veränderungen im Boden zu lassen. In der Kombination mit digitalen Geländemodellen eignen sich Luftbilder aber durchaus dafür, jene Zonen darzustellen, in denen Bodenabtrag bzw. –auftrag stattfinden. Wo der Boden durch Wassererosion oder durch wiederkehrende Bearbeitungsvorgänge verlagert wird, ist auch mit einer Zustandsverschlechterung archäologischer Strukturen zu rechnen.

4. Öffentlichkeitsarbeit und Ausblick

Das Projekt wurde von den Beteiligten im Rahmen eines Vortrags zu den Tagen der Landesarchäologie im November 2021 vorgestellt. Ein Vorbericht mit einer Darstellung erster Zwischenergebnisse befindet sich im Druck und wird im nächsten Band der Reihe „Ausgrabungen in Sachsen“ (8) im Herbst 2022 erscheinen: B. Dähne, F. Hieke, F. Kunth, C. Schubert, R. Sinapius u. T. Westphalen, *Langzeitmonitoring archäologischer Denkmale. Zwischenergebnisse einer Machbarkeitsstudie*. In: R. Smolnik (Hrsg.), *Ausgrabungen in Sachsen 8. Arbeits- u. Forschber. Sächs. Bodendenkmalpfl. Beih.* 36 (Dresden 2022) 298-313.

Die Ergebnisse der Felduntersuchungen und Geländemodellvergleiche für Leuben sollen dem betreffenden Landwirtschaftsbetrieb zur Verfügung gestellt werden, damit der Bewirtschafter aus den Informationen über Standortunterschiede und Gefährdungszonen Konsequenzen für seine künftige Feldbestellung, insbesondere die Bodenbearbeitung ableiten kann. Die Ergebnisse der Felduntersuchungen im Bereich der BDF-Standorte werden in das Bodenmonitoring des LfULG einfließen. Ebenso großes Interesse besteht an den DGM-Vergleichsberechnungen zu den Versuchsflächen des LfULG (z. B. Lüttewitz, Methau) sowie den im Direktsaatverfahren bewirtschafteten Schlägen bei Waldenburg.

Mit dem Vergleich digitaler Geländemodelle zur Abschätzung von Zustandsveränderungen an Bodendenkmalen betritt die archäologische Denkmalpflege Neuland. Die Methode hat sich bei einer Einzelfallbetrachtung vor allem obertägig erhaltener Denkmale (Wallanlage) als effektives und kostengünstiges Verfahren für ein Monitoring von Denkmalflächen erwiesen. So erfolgversprechende Ergebnisse im Projektzeitraum erzielt werden konnten, so unvorhersehbar war die Vielfalt potentieller Einflussgrößen, die von der Bewirtschaftung auf größeren Flächen ausgehen. Um diesen Faktoren vertiefend, u.a. durch UAV-Befliegungen nachzugehen, wurde mit der Juniorprofessorin für

Geosensorsysteme der TU Dresden, Frau Prof. Dr. Anette Eltner Kontakt aufgenommen, die auf Versuchsflächen des LfULG in Nossen bereits Untersuchungen zu Oberflächenveränderungen durchführt. Es besteht die Absicht, bei der Übertragung dieser kleinteiligen Feldversuche auf größere Flächen zu kooperieren und durch Synergien ein Monitoring-System aufzubauen, das sowohl von der Landwirtschaft als auch der archäologischen Denkmalpflege genutzt werden kann.

Abbildungsteil



Abb. 1 Bis zu 1 m tiefe Erosionsrinne in einem Maisschlag bzw. im Bereich einer vorgeschichtlichen oder mittelalterlichen Siedlung südlich von Leuben (Untersuchungsraum Leuben, Foto: M. Strobel)



Abb. 2 Winderosion

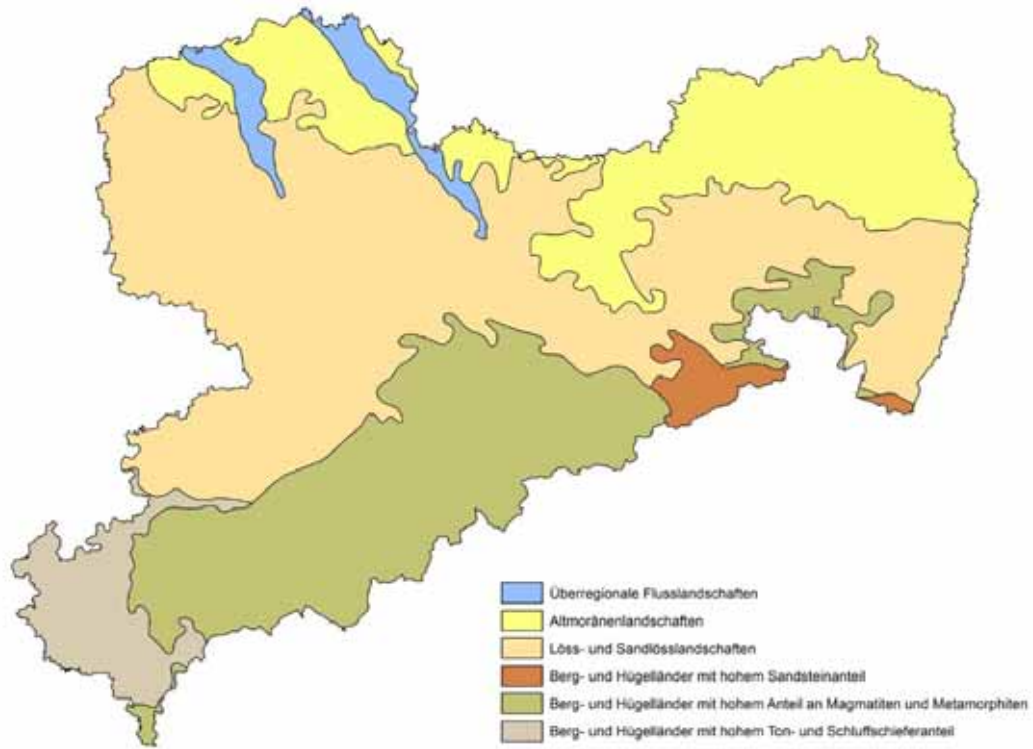


Abb. 3 Bodenlandschaften in Sachsen (LfULG)



Abb. 4 Schwarzerdekolluvium unter neuzzeitlichem Kolluvium in Dresden-Torna (Foto: R. Sinapius)

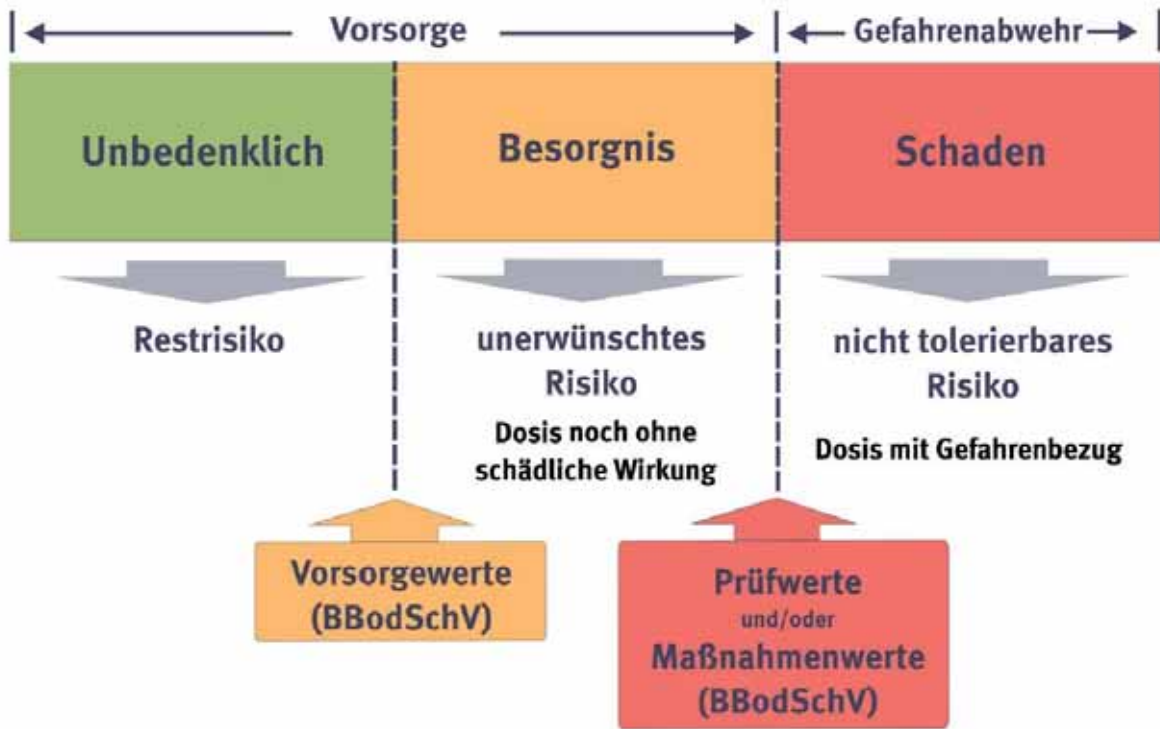


Abb. 5 Bodenmonitoring ist ein zwingender Bestandteil des Bodenschutzes auf Grund der Daseinsvorsorge

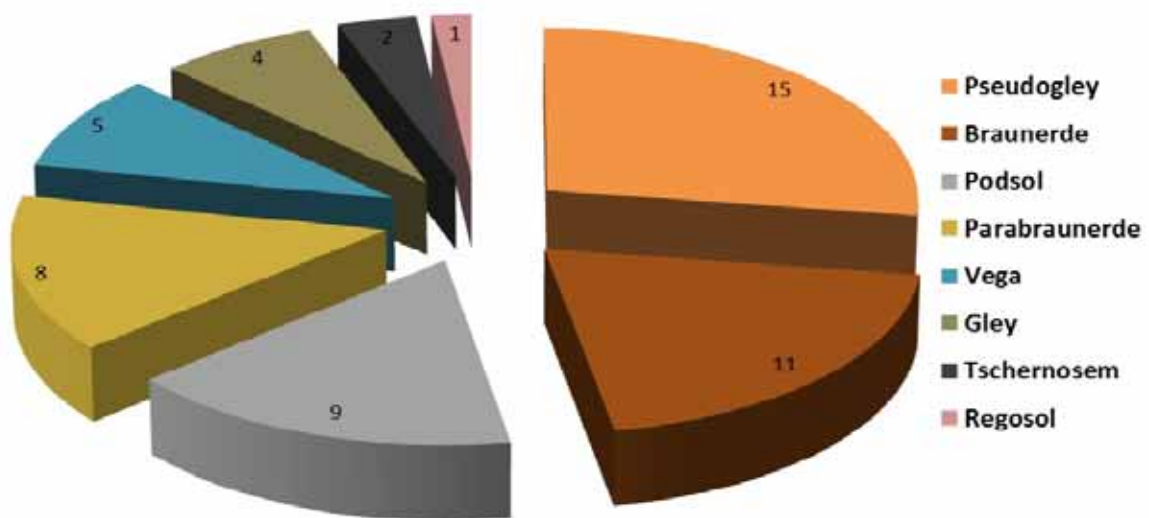


Abb. 6 Bodentypen und ihre Verteilung unter den BDF in Sachsen (Quelle vgl. Anm. 7)



Abb. 7 Datenergebnisse auf BDF in Sachsen

BDF Typ I und BDF Typ II

Bodenphysikalische Eigenschaften

- Korngrößenzusammensetzung
- Wasserdurchlässigkeit
- Rohdichte
- Gesamtporenvolumen (Grob-, Mittel-, Feinporen)

Bodenchemische Eigenschaften

- pH-Wert
- potenzielle und effektive Austauschkapazität
- Gesamtgehalte an Hauptelementen
- Gesamtgehalte an Schwermetallen und Arsen
- Gesamtgehalte an Nichtmetallen
- mobile Anteile an Schwermetallen und Arsen (Extraktion)
- pflanzenverfügbare Nährstoffe

BDF Typ II

- Pflanzeninhaltsstoffe
- Bodentemperatur
- Wassergehalt
- pH-Wert im Sickerwasser
- elektrische Leitfähigkeit im Sickerwasser
- Hauptelemente im Sickerwasser
- Schwermetalle im Sickerwasser
- Nichtmetalle im Sickerwasser

Abb. 8 Das Standarduntersuchungsprogramm

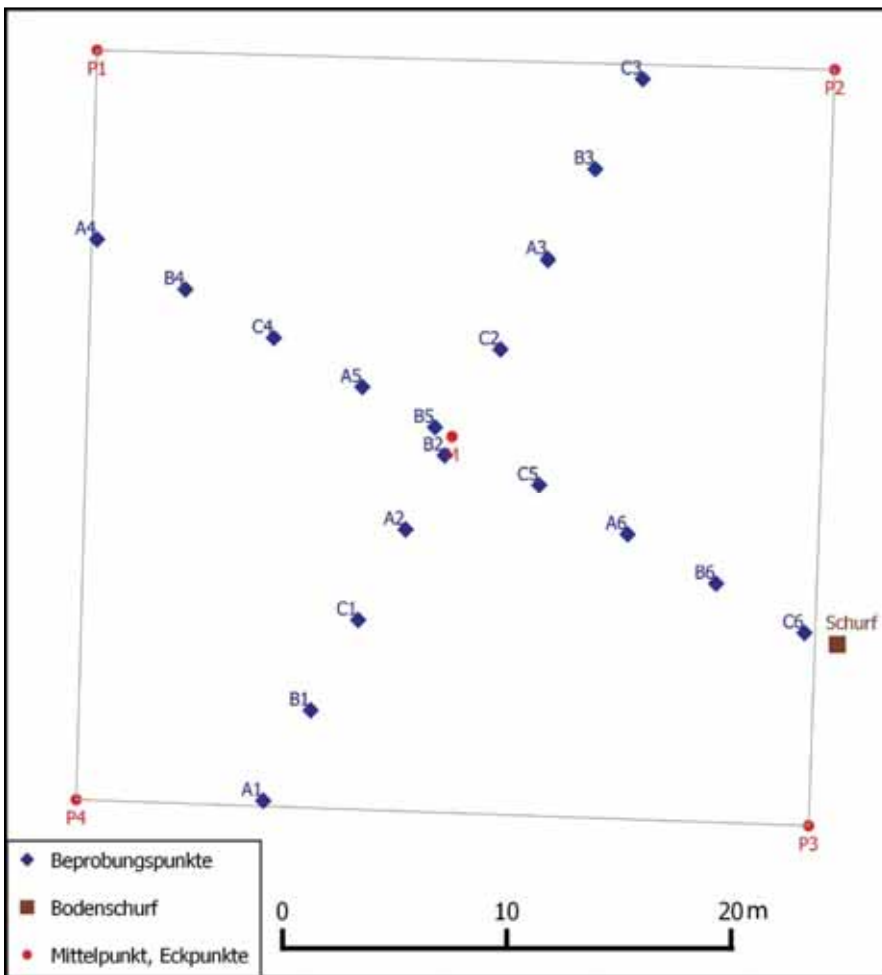


Abb. 9 Schema der BDF-Flächenbeprobung



Abb. 10 Feldarbeiten der BDF-Flächenbeprobung (Typ I)

Boden-Dauerbeobachtungsprogramm des LfULG Sachsen

Standortcharakteristika



Abb. 11 Die Publikation BDF-Standortcharakteristika des LfULG
(<https://www.boden.sachsen.de/download/STO.pdf>)

Abb. 12 Die Publikation zur Entwicklung der Schwermetallgehalte auf BDF des LfULG
(<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/34468>)

Stoffkreisläufe an Boden- Dauerbeobachtungsflächen

Schriftenreihe, Heft 11/2019



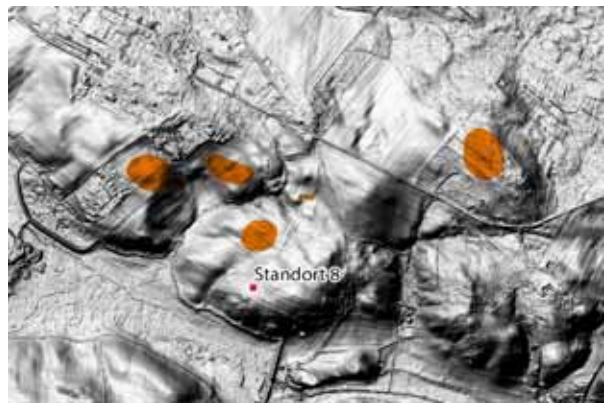
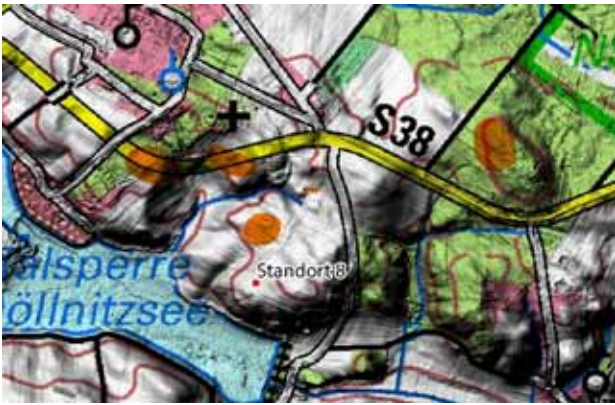


Abb. 13 Lage von Standort 8 (Wermsdorf) und angrenzende Denkmalflächen (links), im DGM (rechts)



Abb. 14 Lage von Standort 19 (Salzenforst) und angrenzende Denkmalflächen (links), im DGM (rechts)

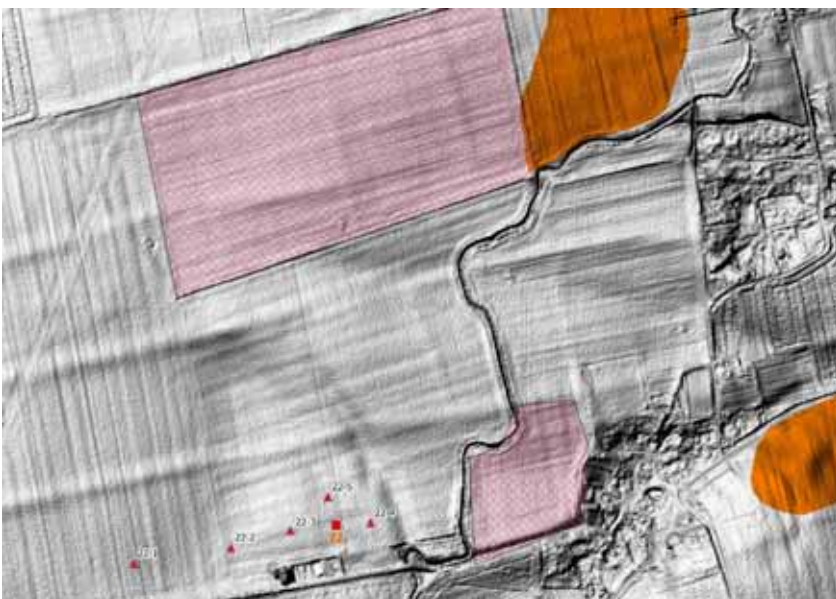


Abb. 15 Lage von Standort 22 (Kitzen) und angrenzende Denkmalflächen im DGM. Rosa schraffiert sind potentielle Reste von Wölbäckern, rote Dreiecke: geplante Aufnahmepunkte der Catena, rotes Quadrat: Standort 22, rot: Bodendenkmale

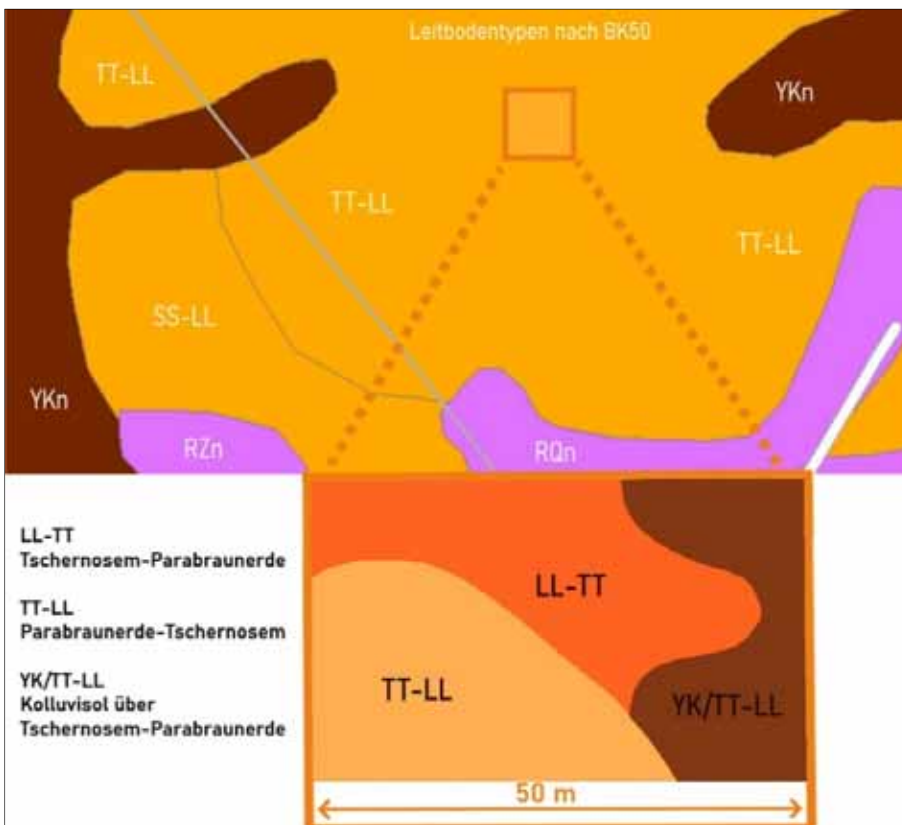


Abb. 16 Lage von Standort 28 (Nosswitz) und angrenzende Denkmalfächen (links), im DGM (rechts)



Abb. 17 Lage von Standort 59 (Schmorren) und angrenzende Denkmalfächen (links), im DGM (rechts)

Abb. 18 Bodenmosaik verschiedener Skalen, Beispiel Mittelsächsisches Lösshügelland bei Ostrau



Bodengroßlandschaft der Lössböden

Leipziger Lössstiefland
Nordsächsisches Lössstief- und Plattenland
Großenhainer Lössstiefland
Großenhainer Rödertal
Hallesches Lössstiefland
Weißenfelser Lössstiefland
Bornaer Lössstiefland

Bodengroßlandschaft der Lösslandschaften
des Berglandes und der Hügelländer

Nordwestsächsisches Lösshügel- und
Vulkanitkuppenland
Mittelsächsisches Lösshügelland
Mulde-Lösshügelland
Vorerzgebirgisches Becken
Dresdner Elbtalweitung
Westlausitzer Lösshügelland
Bautzener Lösshügelland
Oberlausitzer Lösshügelland
Zeit-Altener Lösshügelland
Ronneburger Lösshügelland

Abb. 19 Übersicht der Löss-Bodengroßlandschaften und zugehörige Bodenlandschaften von Sachsen

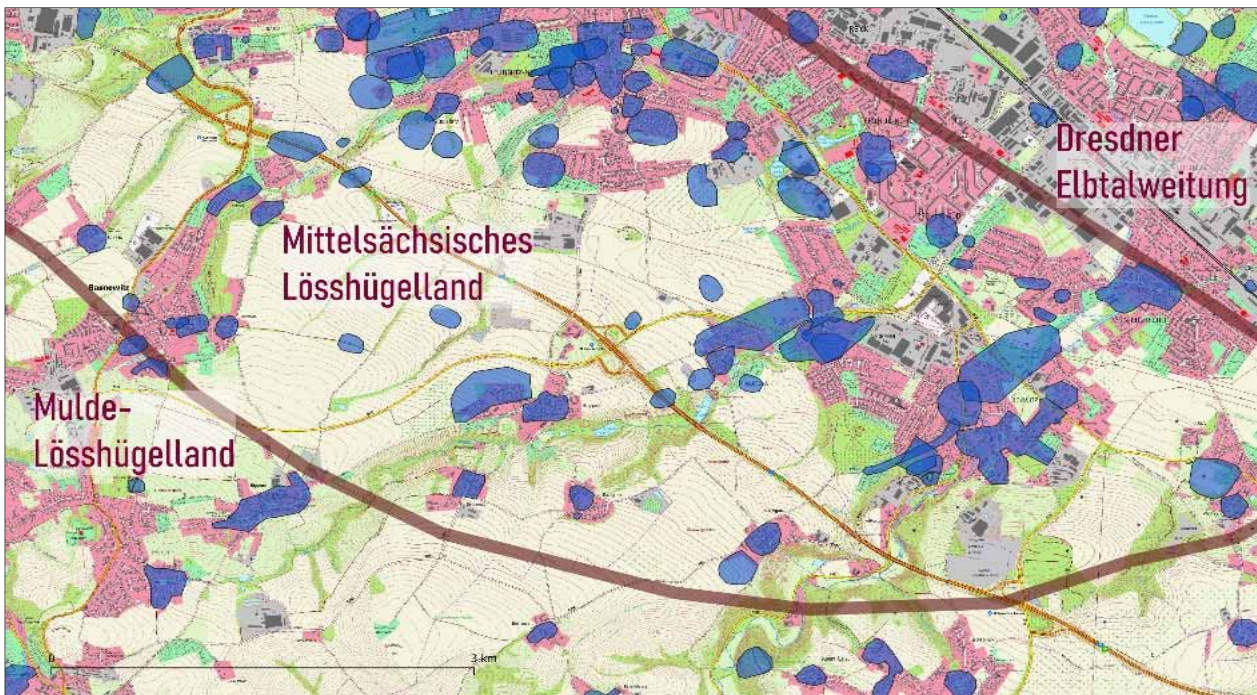


Abb. 20 Denkmalflächen (blau) und Bodenlandschaften im Südraum von Dresden.



Abb. 21 Löss und Bodentypen in Sachsen.

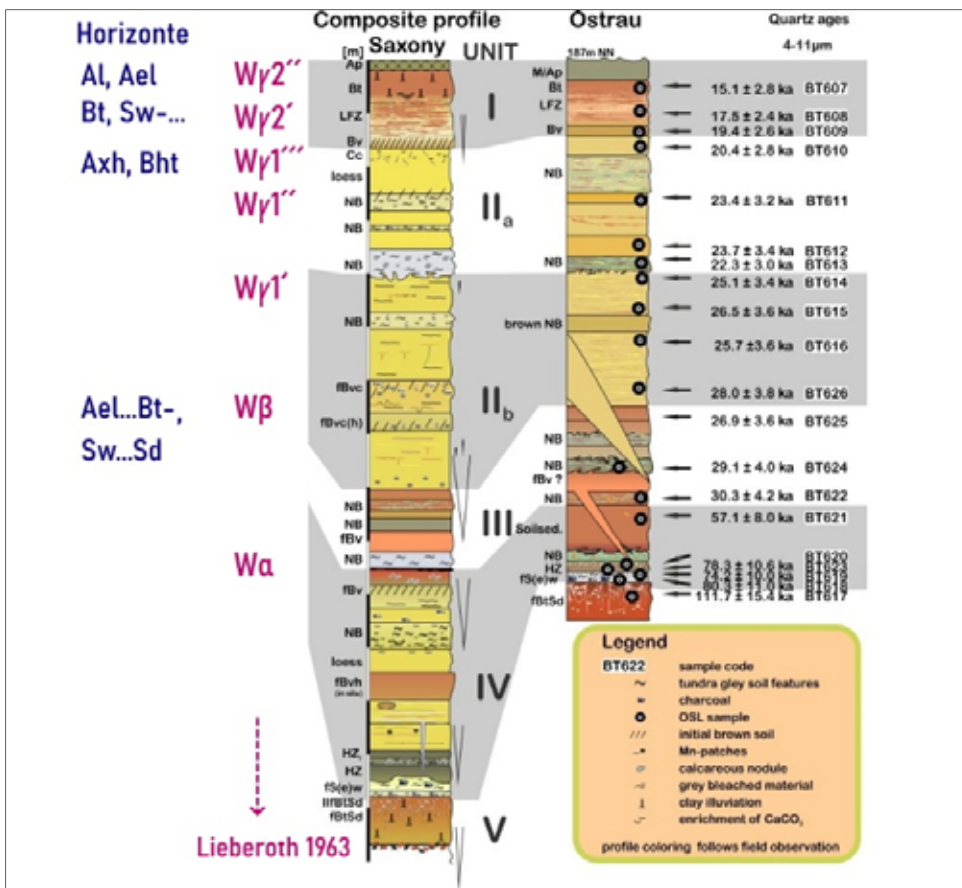


Abb. 22 Vereinfachtes Schema des lössstratigrafischen Zusammenhanges der Pedogenese (Ackerböden). Grafik von Meszner 2015 (rechts im Bild, eigene Ergänzung links im Bild).

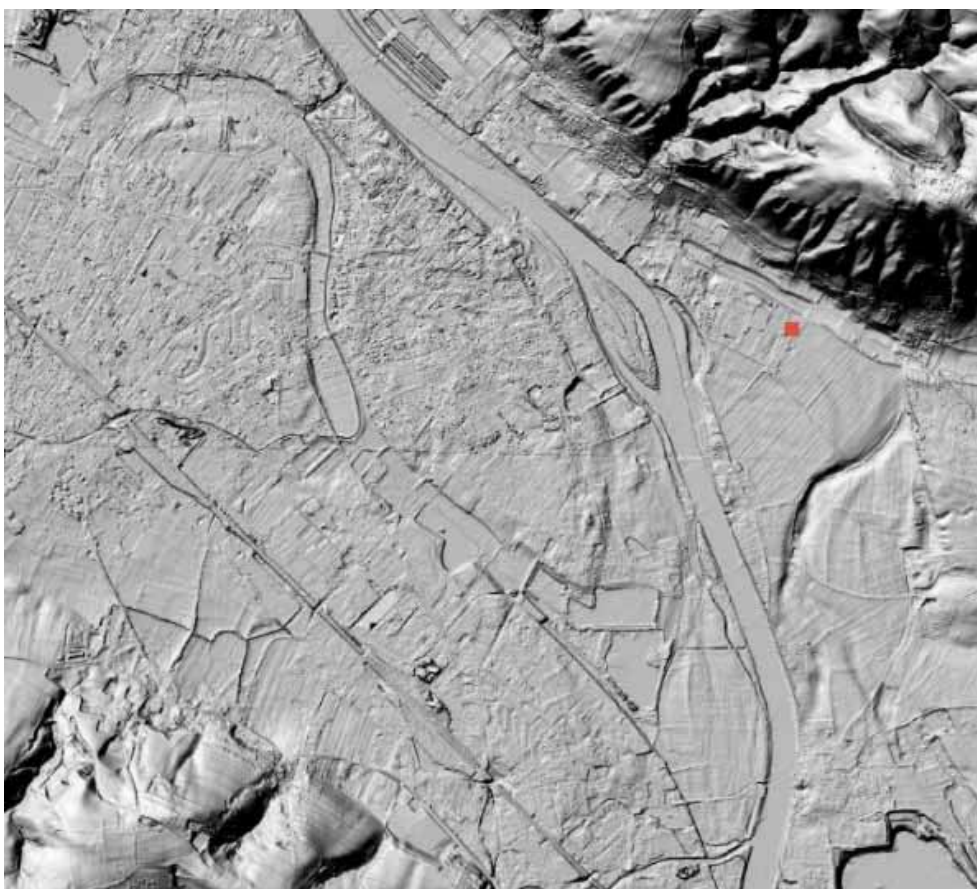


Abb. 23 Aufschluss Standort Pillnitz (links)

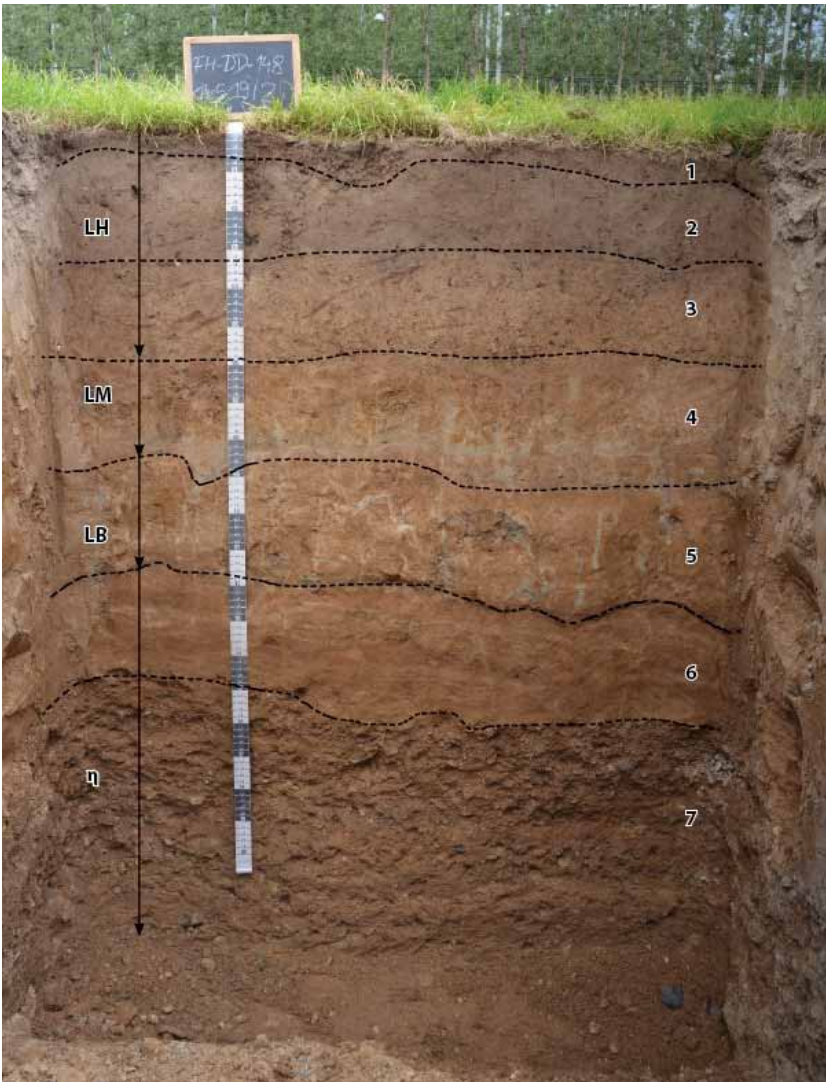
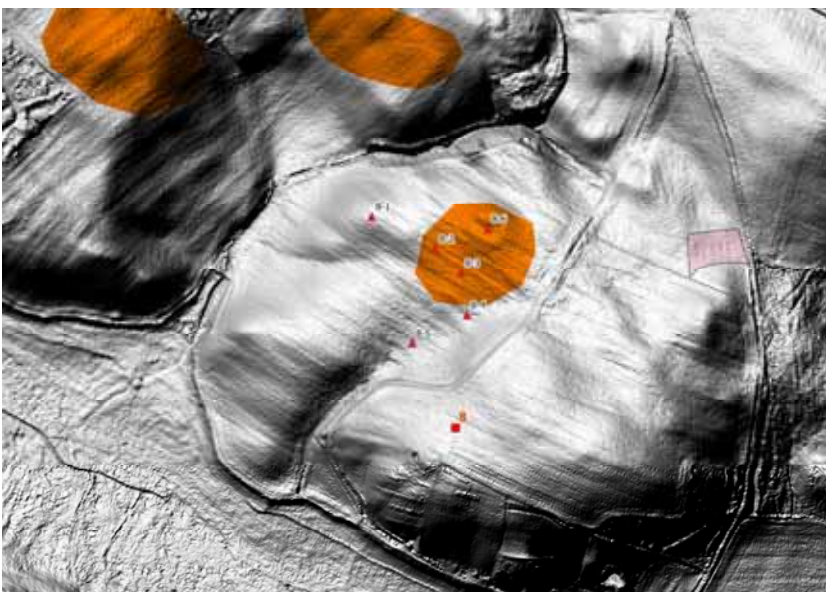


Abb. 24 Aufschluss Standort Pillnitz - Profilfoto Gley-Pseudogley-Braunerde aus Terrassensedimenten: 1: Ah-Horizont, 2: rAp-Horizont, 3: Sw-Bv-Horizont, 4: Go-Sw-Horizont, 5: Go-Sd-Horizont, 6: Go-Sd-Horizont, 7: Go-Horizont; LH: Hauptlage, LM: Mittellage, LB: Basislage, η: periglaziär-ø uviatile Schichtung (Foto: F. Hieke, rechts)

Abb. 25 Untersuchungsraum 8: Wermsdorf rot schraffiert: Reste von Wölbäckern, rote Dreiecke: Aufnahmepunkte der Catena, rotes Quadrat: Standort 8; orange: Bodendenkmale



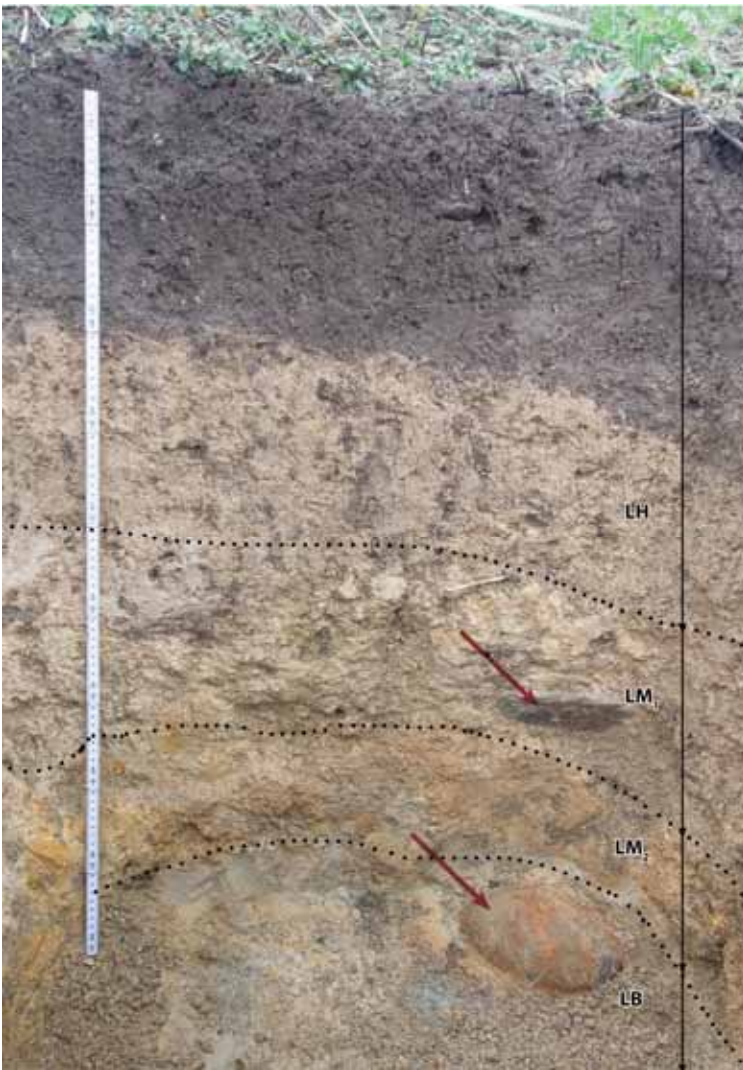


Abb. 26 Das maßgebende Bodenprofil für den Untersuchungsraum 8

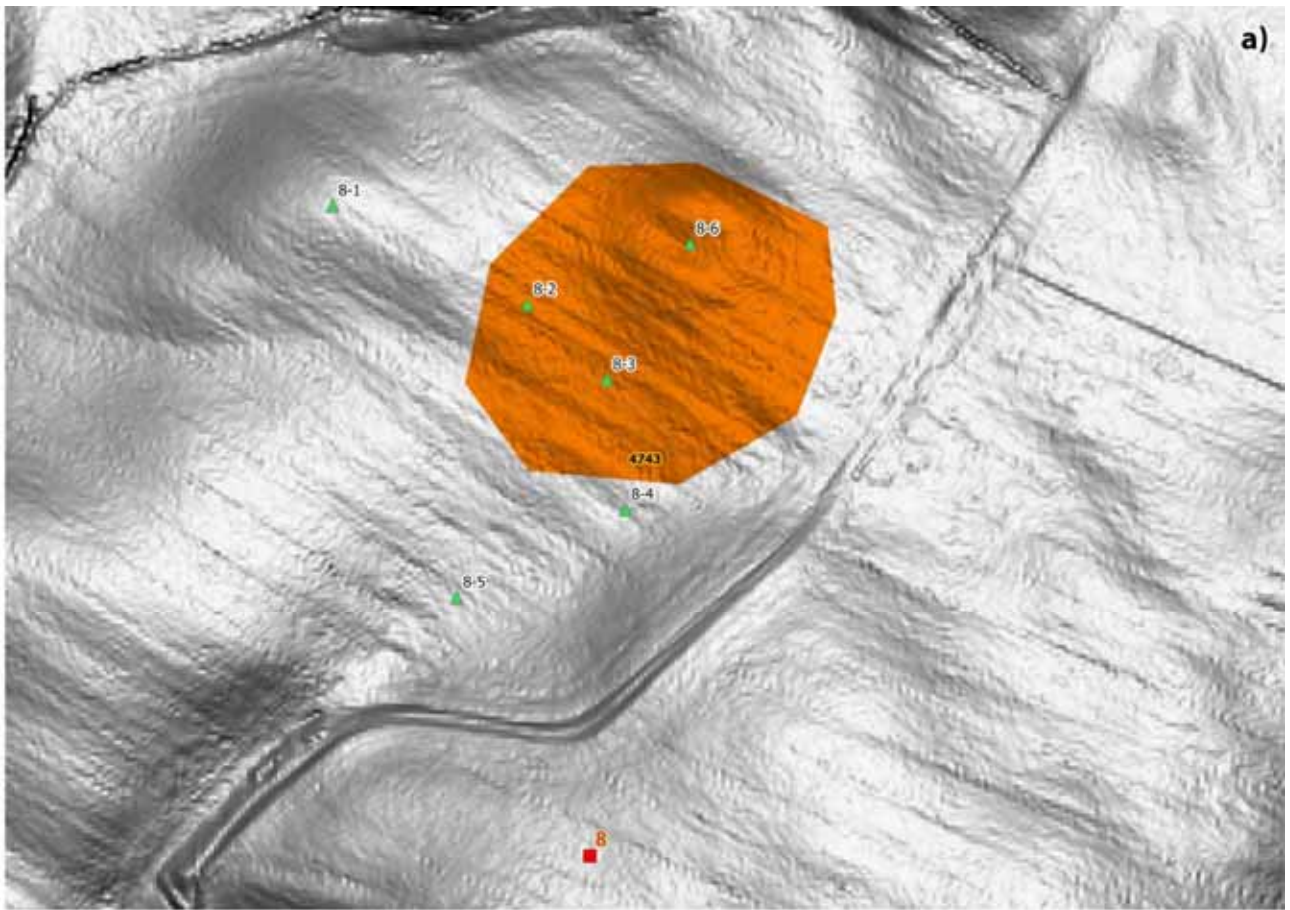


Abb. 27 Das Untersuchungsgebiet Wermsdorf mit den Kartierpunkte 8-1 bis 8-6 im DGM (oben) und im Orthophoto (unten)




Nr.	Profilfoto	Erosion / Deposition	Zusammensetzung des bodenbildenden Substrates	Horizontierung: Bezeichnung (untere Tiefe [dm])
8-1		Standort erodiert	Lösslehm, Ryolith-zersatz	Ap (3 dm) / ilCv (> 6,5 dm)
8-2		kaum Erosion / Deposition: vermutlich vollständige Profil- und Schichtabfolge	Lösslehm, Ryolith-zersatz	Ap (3,5 dm) / Al-Bv (5 dm) / Ael-Swd+Bt (6 dm) / ilCtv (8,5 dm) / ilCv (> 12 dm)
8-3		kaum Erosion / Deposition: vermutlich vollständige Profil- und Schichtabfolge	Lösslehm, Ryolith-zersatz	Ap (3,2 dm) / Al-Bv (4 dm) / Ael+Bt-Sdw (7,5 dm) / ilCtv (11 dm) / ilCv (> 15,5 dm)

Abb. 28 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Wermisdorf




Nr.	Profilfoto	Erosion / Deposition	Zusammensetzung des bodenbildenden Substrates	Horizontierung: Bezeichnung (untere Tiefe [dm])
8-4		intensiv erodiert	Lösslehm, Ryolith- zersatz	Ap (3,6 dm) / ilCtv (9 dm) / ilCv (> 11 dm)
8-5		kolluvial überlagert	Lösslehm, Ryolith- zersatz	Ap (2 dm) / rAp (5 dm) / fSdw (9,5 dm) / Sd (> 12,5 dm)
8-6		äußerst stark erodiert	Lösslehm, Ryolith- zersatz	Ap (2 dm) / ilCv (> 2,5 dm)

Abb. 28 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Wernsdorf

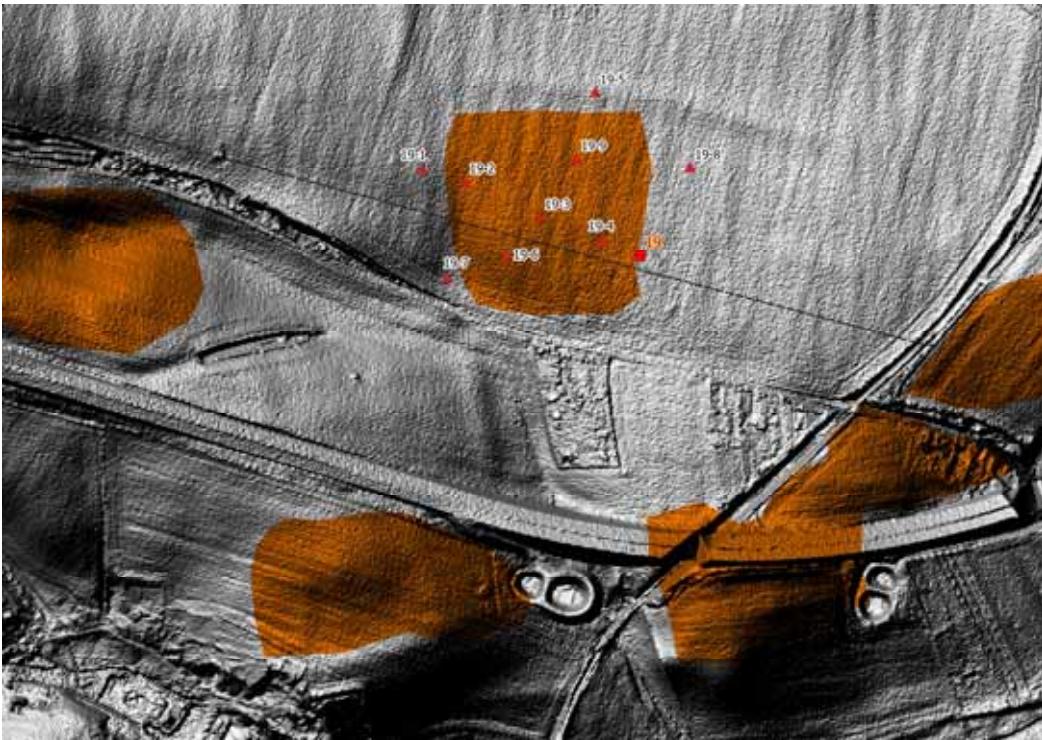


Abb. 29 Untersuchungsraum 19: Salzenforst rote Dreiecke: Aufnahmepunkte der Catena, rotes Quadrat: Standort 19; rote Flächen: Bodendenkmale



Abb. 30 Das maßgebende Bodenprofil für den Untersuchungsraum 19 Salzenforst

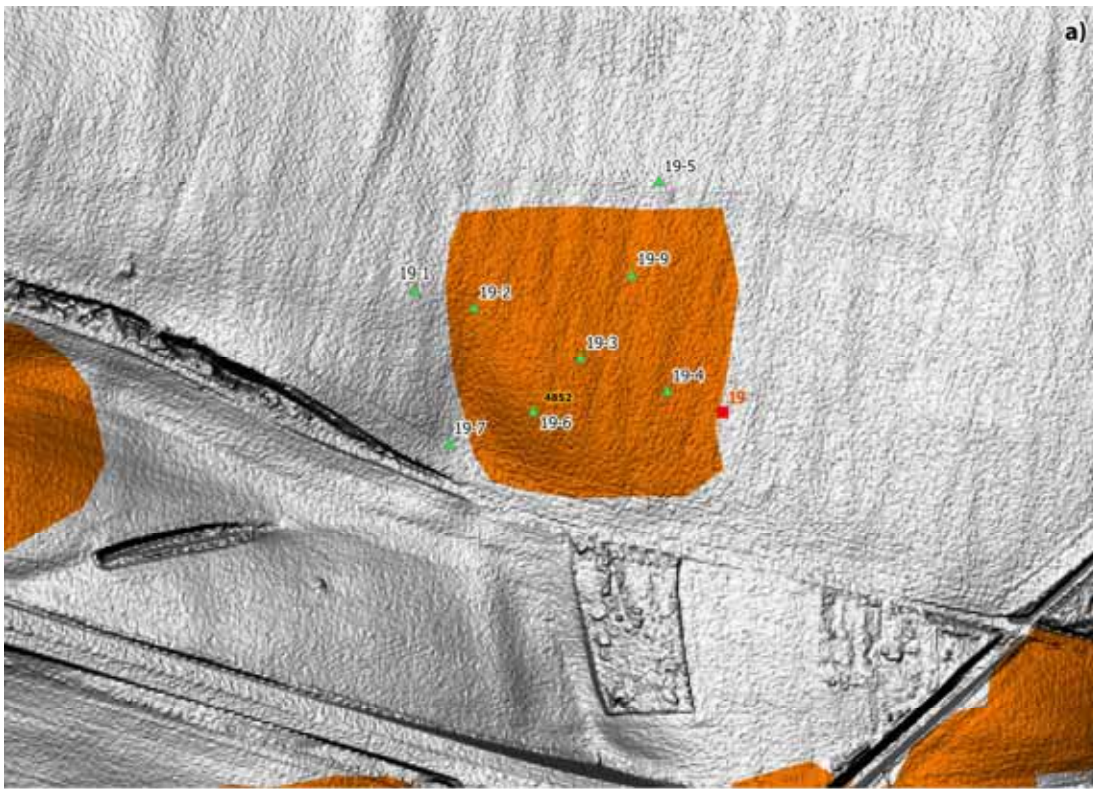


Abb. 31 Das Untersuchungsgebiet 19 Salzenforst mit den Kartierpunkte 19-1 bis 19-9 im DGM (oben) und im Orthophoto (unten)





Nr.	Profilfoto	Erosion / Deposition	Zusammensetzung des bodenbildenden Substrates	Horizontierung: Bezeichnung (untere Tiefe [dm])
19-1		kaum Erosion / Deposition: vermutlich vollständige Profil- und Schichtabfolge	Lösslehm, Schmel- zwassersedimente allgemein	Ap (3,5 dm) / Al-Bv (4,5 dm) / Al+Bt (7,5 dm) / Bt+Ael (10 dm) / Bt (> 10,5 dm)
19-2		Standort erodiert	Lösslehm, Schmel- zwassersedimente allgemein	Ap (3,4 dm) / Ael+Bt (7 dm) / Bt (9 dm) / ilCtv (12 dm) / ilCv (> 12,3 dm)
19-3		kaum Erosion / Deposition: vermutlich vollständige Profil- und Schichtabfolge	Lösslehm, Schmel- zwassersedimente allgemein	Ap (3,5 dm) / Al-Bv (4,5 dm) / Al+Bt (> 9 dm)
19-4		kaum Erosion / Deposition: vermutlich vollständige Profil- und Schichtabfolge	Lösslehm, Schmel- zwassersedimente allgemein	Ap (3 dm) / Al-Bv (4,5 dm) / Al+Bt (8,5 dm) / ilCtv (> 11,5 dm)

Abb. 32 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Salzenforst



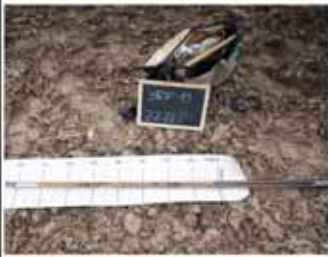

Nr.	Profilfoto	Erosion / Deposition	Zusammensetzung des bodenbildenden Substrates	Horizontierung: Bezeichnung (untere Tiefe [dm])
19-5		kaum Erosion / Deposition: vermutlich vollständige Profil- und Schichtabfolge	Lösslehm, Schmel- zwassersedimente allgemein	Ap (2,6 dm) / Al-Bv (4 dm) / Al+Bt (8 dm) / Bt (> 10,5 dm)
19-6		Standort stark erodiert	Lösslehm, Schmel- zwassersedimente allgemein	Ap (2 dm) / rAp (4,5 dm) / ilCtv (6,5 dm) / ilCtbv (> 10 dm)
19-7		Standort erodiert	Lösslehm, Schmel- zwassersedimente allgemein	Ap (4 dm) / rAp+Bt (5,5 dm) / Bt (7 dm) / ilCtv (> 8,5 dm)
19-9		Standort erodiert	Lösslehm, Schmel- zwassersedimente allgemein	Ap (3,5 dm) / Al+Bt (8 dm) / Bt (11 dm) / ilCtv (> 12,5 dm)

Abb. 32 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Salzenforst

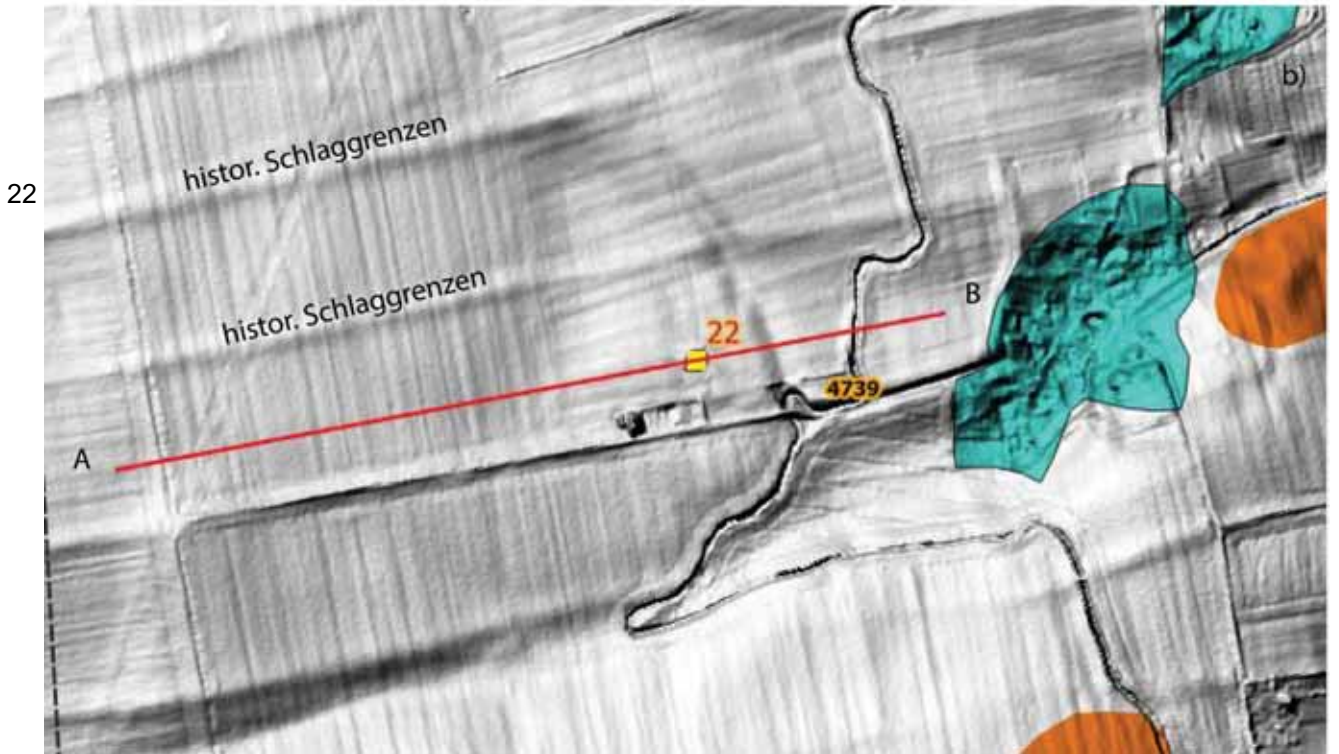
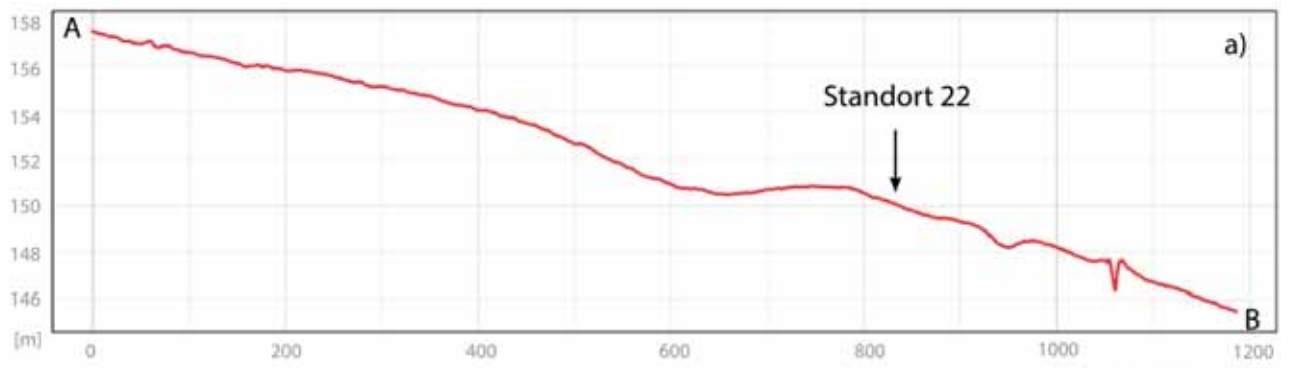


Abb. 33 Untersuchungsraum der BDF 22: Kitzen - Profilschnitt oben: Profilschnitt, unten: Reliefsituation



Abb. 34 Standort 22: Kitzten - Profilfoto Kolluvisol über Braunerde-Tschernosem aus Löss LH: Hauptlage, LM: Mittellage, LB: Basislage (Foto: F. Hieke)

Abb. 35 Die Topografie im Gebiet Kitzten mit der Lage der Bodenprofile K-1 bis K-8. Braune Areale sind Bodendenkmale.

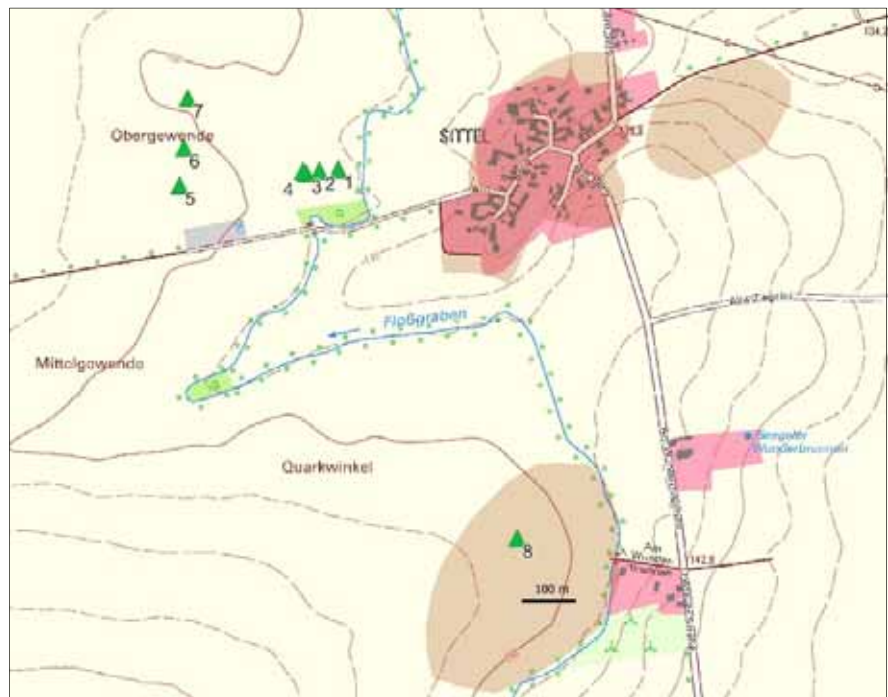




Abb. 36 Das Untersuchungsgebiet im Bereich der Kartierpunkte Profile K-3 bis K-5.

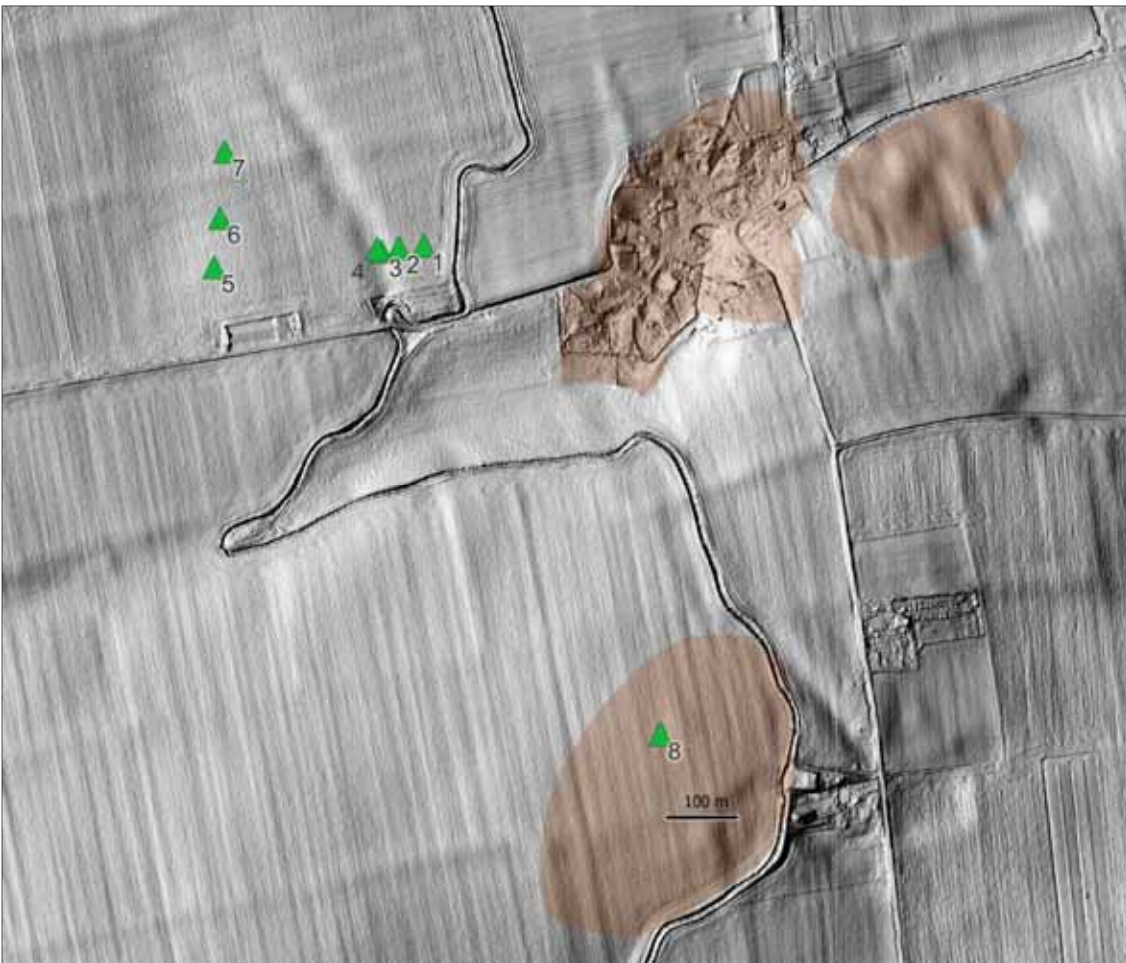


Abb. 37 Die Lage der Kartierungspunkte DGM.

Bodengeologisches Löss - Normalprofil Kitzen

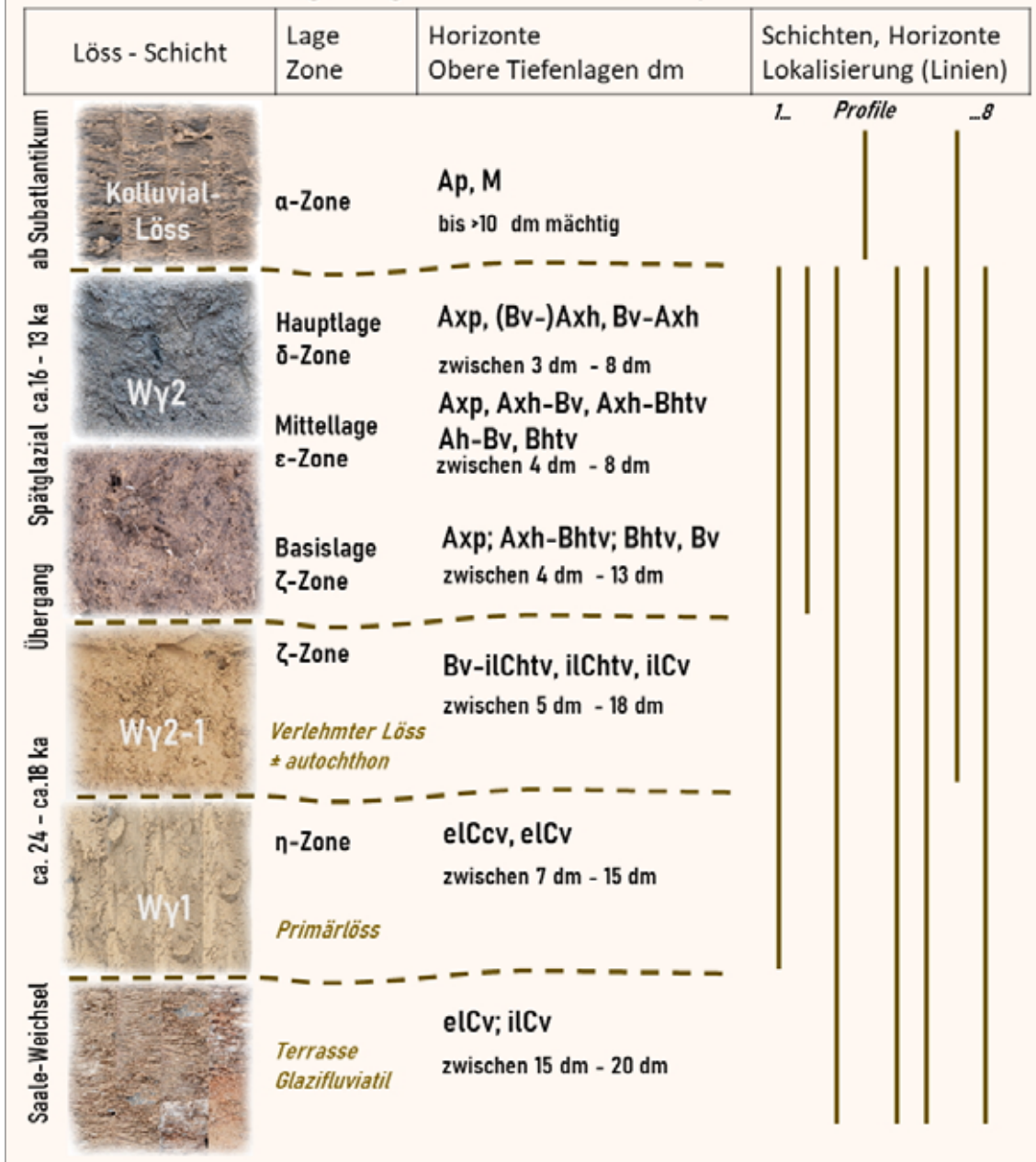


Abb. 38 Bodengeologisches Löss-Normalprofil Untersuchungsraum Kitzen.

Obere Tiefenlage dm → Ap, M sind nicht berücksichtigt

Löss-Stratigrafie nach Lieberoth 1963 / xx, Lage nach AG Boden (KA 4/5) 1994, 2005 / xx

Zone nach Kopp / Schwanecke 1970 / xx

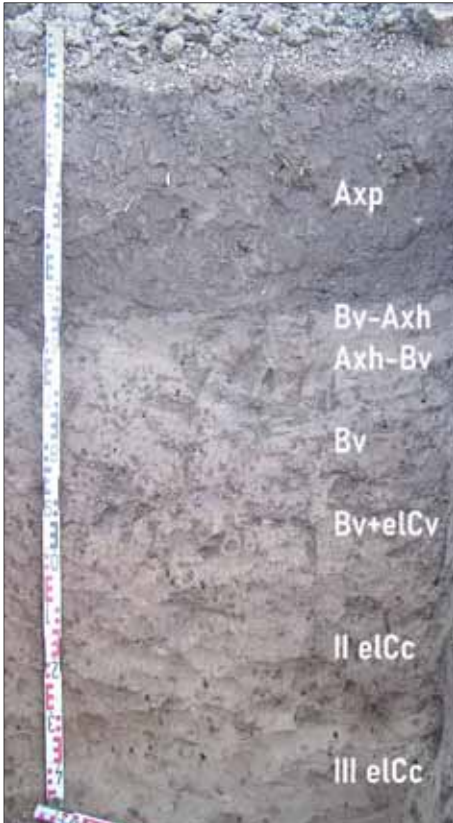


Abb. 39a Das Leitprofil Kitzen. Der Axh-Horizont zeigt teilweise eine schwache Verbraunung, auf den Aggregatbruchflächen ist die Verbraunung aber kaum erkennbar. Der Bv-Horizont besitzt noch sehr geringe Humusgehalte. Die Poren und Klüfte enthalten sehr schwach ausgeprägte Ton-Humus-Cutane.

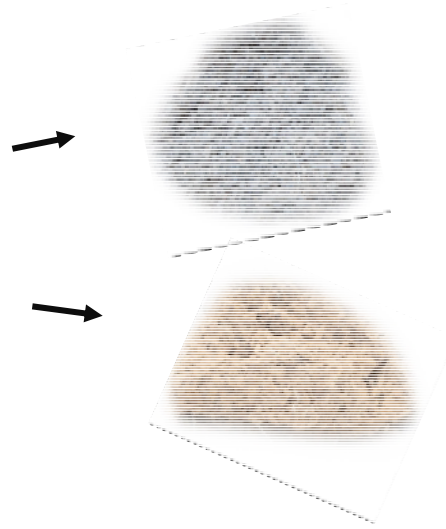


Abb. 39b Der Horizontübergang Axp/Axh/Bv-Axh



Abb. 40 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Kitzen.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
K-1		Hangverflachung, sehr schwach geneigt; sehr gering erodiert	Lösslehm // Primärlöss	Lessivierter Braunerde- Tschernosem 1 dm I Axp 3 dm I rAxp 4 dm I Bv-Axh 5 dm II Axh-Bhtv 8 dm III Bhtv 11 dm IV ilChtv 15 dm V elCv
K-2		Hangverflachung, sehr schwach geneigt; nicht erodiert	Lösslehm	Lessivierter Braunerde- Tschernosem 1 dm I Axp 3 dm I rAxp 5 dm I Axh 6 dm I Bv-Axh 7 dm II Bhtv
K-3		Hangverflachung, Randlage zu Mulde, sehr schwach geneigt; mittel erodiert	Lösslehm // Primärlöss /// Terrasse	Erodierte Humusparabraunerde- Braunerde 1 dm I Ap 4 dm I rAp 5 dm II Bhtv 7 dm III ilCv 13 dm IV elCv 15 dm V ilCv 21 dm VI ilCv 23 dm VII ilCv
K-4		Hangmulde, schwach geneigt; Auftrag >10 dm	Kolluvialer Löss	Kolluvisol 1 dm I Ap 3 dm I rAp 8 dm I M 10 dm II M

Abb. 40 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Kitzen.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
K-5		Plateau, sehr schwach geneigt; nicht erodiert	Lösslehm // Primärlöss /// Terrasse	Braunerde-Tschernosem 1 dm I Axp 3 dm I rAxp 4 dm I Axh 6 dm I Bv-Axh 9 dm II Ah-Bv 11 dm III Bv-ilChtv 15 dm IV eCv 18 dm V eCv 25 dm VI eCv
K-6		Hang, schwach geneigt; sehr gering erodiert	Lösslehm /// Primärlöss /// Terrasse	Lessivierter Braunerde- Tschernosem 1 dm I Axp 3 dm I rAxp 4 dm I Axh 8 dm II Axh-Bv 15 dm III ilChtv 18 dm IV eCv 20 dm V eCv 21 dm VI ilCv
K-7		Hangmulde, schwach geneigt; gering erodiert	Kolluvialer Lösslehm // Lösslehm	Kolluvisol über Braunerde- Tschernosem 1 dm I Ap 2 dm I rAp 8 dm I M 11 dm II fAxh 13 dm II Bv-Axh 18 dm III Bhtv 20 dm IV ilCv
K-8		Hang, sehr schwach geneigt; sehr gering erodiert	Lösslehm // Primärlöss /// Terrasse	Lessivierter Braunerde- Tschernosem 2 dm I Axp 3 dm I rAxp 5 dm I Axh 6 dm II Axh-Bhtv 9 dm III ilChtv 15 dm IV eCv 23 dm V eCv 24 dm VI ilCv



Abb. 41 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Untersuchungsraum Kitzen mit angrenzendem Bodendenkmal (braun).

Abb. 42 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Gebiet Kitzen mit Bodendenkmalen.



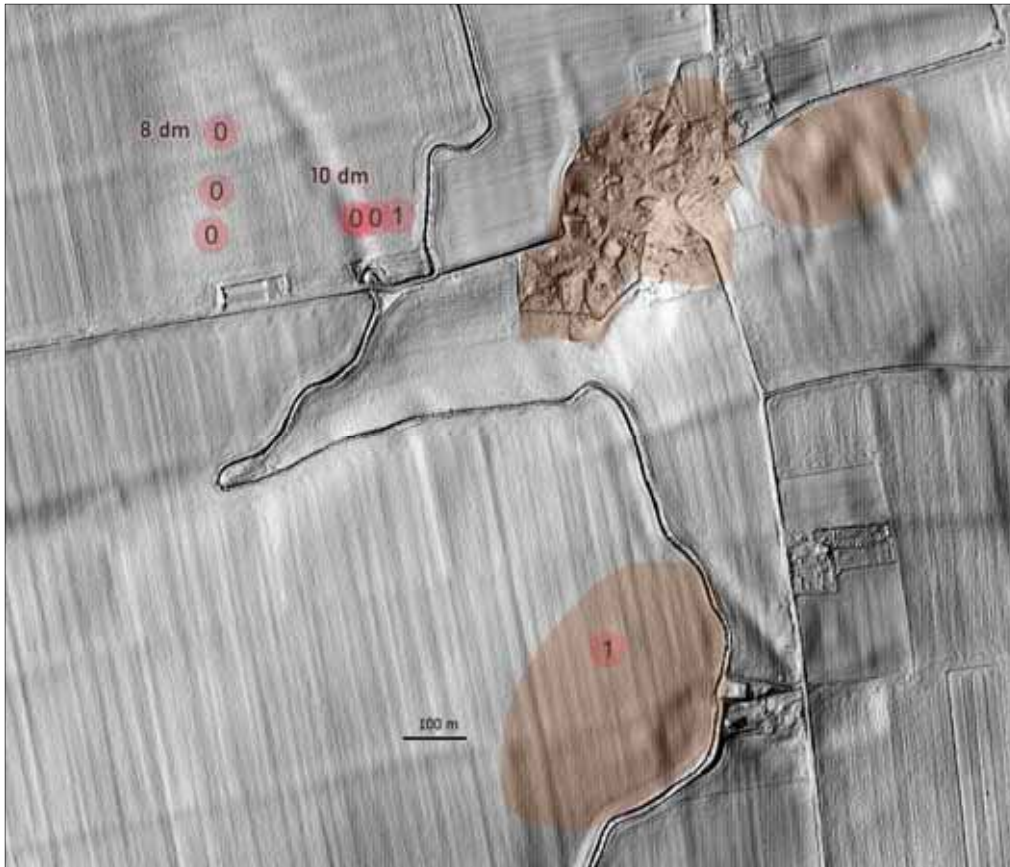


Abb. 43 Kartierung der Erosionsgrade nach KA5 (=Standort Kartierpunkt) sowie der Aufträge (dm) der Kartierpunkte K-1 bis K-8. Rotbraun: Denkmalflächen.

Abb. 44 BK-50-Flächeneinheiten und Bodenlandschaften, Bodenkarte ergänzt.





Abb. 45 Untersuchungsraum 28: Noßwitz rosa: mutmaßliche Reste von Wölbäckern im Osten und eine Deponie im Süden, rote Dreiecke: Aufnahmepunkte der Catena, rotes Quadrat: Standort 28, rote Flächen: Bodendenkmale



Abb. 46 Die Landschaft von Untersuchungsgebiet Noßwitz, Blick nach Norden. Im Vordergrund die Hangmulde mit den Profilen (N-)11 und 12.

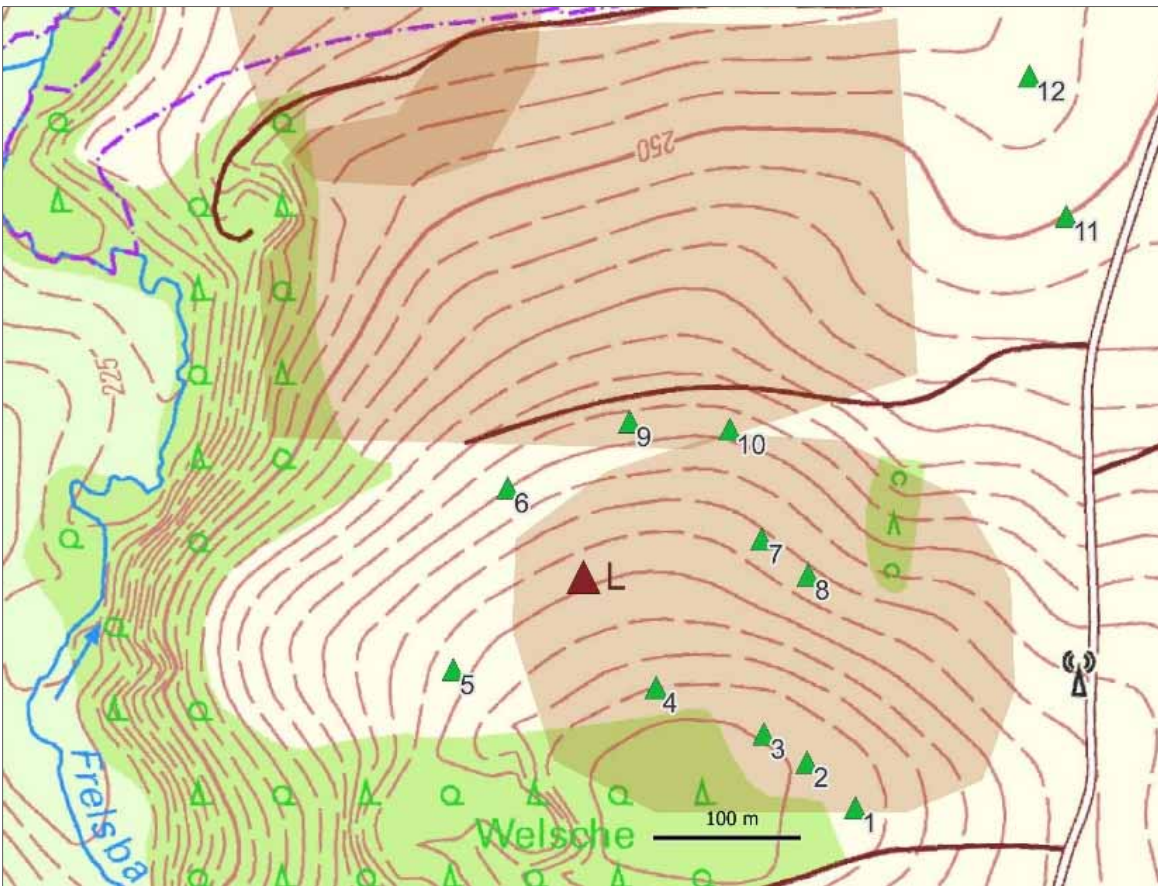


Abb. 47 Topografie des Untersuchungsraums Noßwitz mit Lage der Kartierpunkte.

Abb. 48 Lage der Kartierungspunkte und das Untersuchungs-Leitprofil 28 (Noßwitz) im DGM. Das Leitprofil 28 ist mit ΔL dargestellt. Braune Flächen sind Bodendenkmale.







Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
N-1		Plateau, sehr schwach geneigt; gering erodiert	Lössderivat mit Ryolithverwitterung	Erodierte Pseudogley- Fahlerde 3 dm I Ap 4 dm II Bt+Ael 6 dm II Sw-Bt+Ael 10 dm III Swd-Bt
N-2		Plateau, sehr schwach geneigt; gering erodiert	Kolluvialer Lösslehm \ Lössderivat mit Ryolithverwitterung // Rhyolithsolifluktion mit Lösslehm	Erodierte Pseudogley- Fahlerde 3 dm I Ap 4 dm II Bt+Ael 6 II Ael+Bt 8 dm II Sw-Bt 10 dm IV Swd
N-3		Plateau, sehr schwach geneigt; gering erodiert	Kolluvialer Lösslehm \ Lössderivat mit Ryolithverwitterung // Rhyolith- Solifluktion mit Lösslehm	Erodierte Pseudogley- Fahlerde 4 dm I Ap 6 dm II Bt+Ael 7 dm III Sw-Ael+Bt 9 dm III Swd-Bt
N-4		Oberhang, mittel geneigt; sehr gering erodiert	Lössderivat mit Ryolithverwitterung / Rhyolith- Solifluktion mit Lösslehm	eBB-LFFahlerde 2 dm I Ap 3 dm I Ael 4 dm I Ael+Bt 6 dm II Bt 7 dm III Bt-ilCv

Abb. 49 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Noßwitz.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
N-5		Mittelhang, mittel geneigt; sehr gering erodiert	Lössderivat mit Ryolithverwitterung // Rhyolith- Solifluktion mit Lösslehm	Erodierte Fahlerde- Pseudogley 3 dm I Ap 4 dm I Ael-Sw 5 dm II Ael+Bt-Sw 8 dm III Bt-Sdw 10 dm V Swd
N-6		Mittelhang, mittel geneigt; sehr gering erodiert	Kolluvialer Lösslehm / Lössderivat mit Ryolithverwitterung	Kolluvisol über erodierte Pseudogley-Fahlerde 4 dm I Ap 5 dm II fAp-M 6 dm III fAel+Bt 8 dm IV Sw-Bt 9 dm V Sdw-Bt
N-7		Mittelhang, mittel geneigt; gering erodiert	Lössderivat mit Ryolithverwitterung	Erodierte Pseudogley- Fahlerde 2 dm I Ap 3 dm II Bt+Ael 5 dm III Sw-Ael+Bt 10 dm IV Swd-Bt
N-8		Hangmulde, Mitteldelle, mittel geneigt; gering erodiert	Lössderivat mit Ryolithverwitterung	Erodierte Fahlerde 4 dm I Ap 5 dm II Ael+Bt 7 dm II Bt 10 dm III ilCtv

Abb. 49 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Noßwitz.





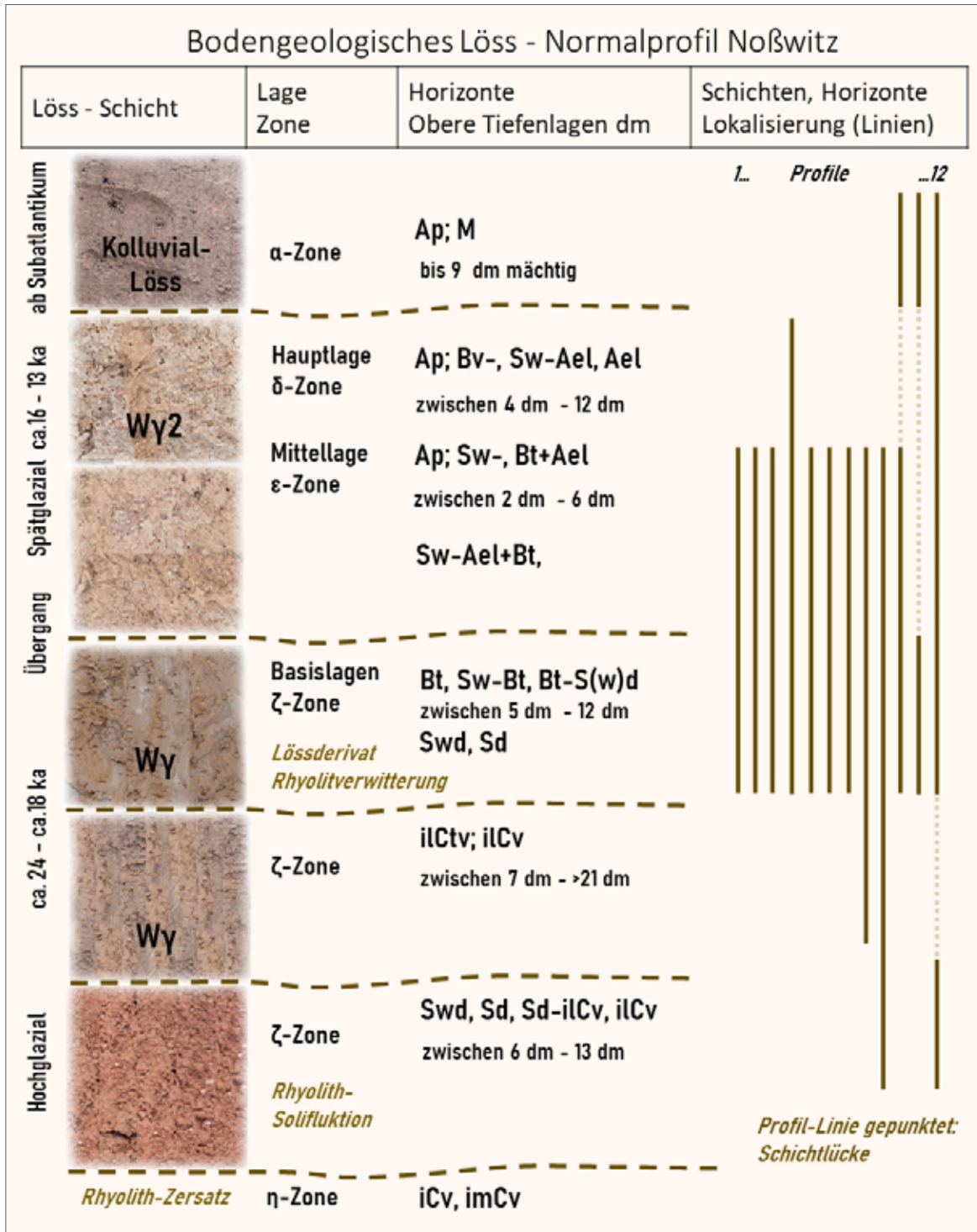
Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
N-9		Mittelhang, Hangdelle, mittel geneigt; gering erodiert	Lössderivat mit Rhyolithverwitterung /// Rhyolith-Solifluktion	Erodierte Braunerde- Fahlerde 3 dm I Ap 5 dm I Bvt+Ael 6 dm II Ael+Bt 7 dm III Bt 13 dm IV iCtv 17 dm V iCv
N-10		Mittelhang, mittel geneigt; gering erodiert, Auftrag 4 dm	Kolluvialer Lösslehm / Lössderivat mit Rhyolithverwitterung	Erodierte Fahlerde 3 dm I Ap 4 dm II fAp-M 6 dm III Ael+Bt 7 dm IV Bt 8 dm IV Bt-iCv
N-11		Hangmulde, schwach geneigt; stark erodiert, Auftrag 9 dm	Kolluvialer Lösslehm / Lössderivat mit Rhyolithverwitterung // Rhyolith-Solifluktion mit Lösslehm	Pseudogley-Kolluvisol 3 dm I Ap 4 dm II fAp-M 9 dm III Sw-M 12 dm IV Swd 15 dm V Swd
N-12		Hangmulde, schwach geneigt; gering erodiert, Auftrag 8 dm	Kolluvialer Lösslehm // Lössderivat mit Rhyolithverwitterung /// Rhyolith-Solifluktion mit Lösslehm	Pseudogley-Kolluvisol 4 dm I Ap 5 dm I M 8 dm II Sw-M 12 dm III Sew 15 dm IV Swd 18 dm V Swd 20 dm VI Swd

Abb. 49 Kurzcharakterisierung der Profile im Gebiet Noßwitz.

Abb. 50 Das bodengeologische Normprofil für das Untersuchungsgebiet Noßwitz

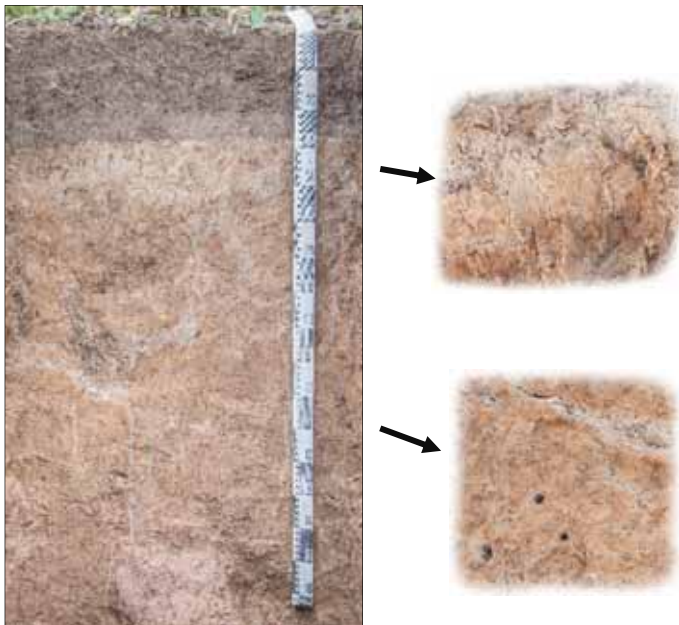


Obere Tiefenlage dm → Ap, M sind nicht berücksichtigt

Löss-Stratigrafie nach Lieberoth 1963 / xx, Lage nach AG Boden (KA 4/5) 1994, 2005 / xx

Zone nach Kopp / Schwanecke 1970 / xx

Abb. 51 Parabraunerde-Pseudogley (Standort 28-Leitprofil) / LfULG 2020.



Die Lessivierungsmerkmale und die Hydromorphie unterliegen vor allem in der Hauptlage deutlichen Schwankungen. Es dominiert Rostfleckung in Kombination mit Tonauswaschung und beginnender Tonilluvation.

Die Basislage ist idealtypisch als dichter Staunässehorizont mit Tonilluvation ausgebildet.

Abb. 52 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Untersuchungsraum Noßwitz mit Bodendenkmalen (braun).

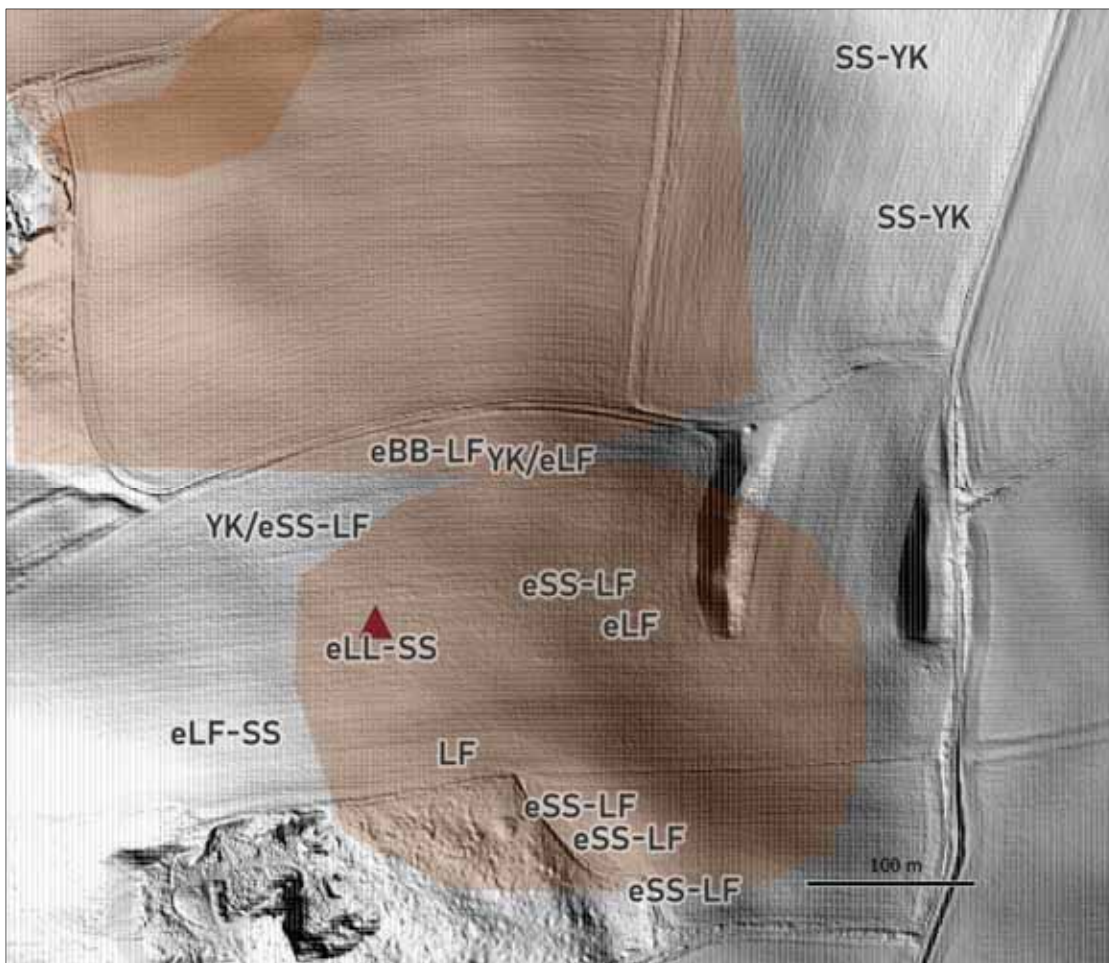


Abb. 53 Die Erosionsgrade nach KA5 und Aufträge (dm) im Gebiet Noßwitz lt. Feldbefunden.

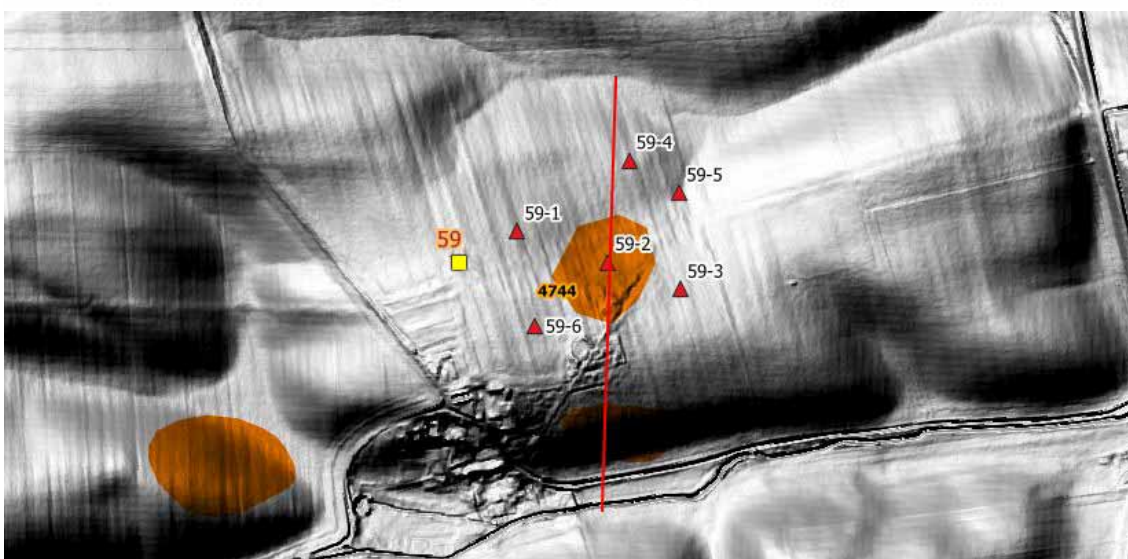
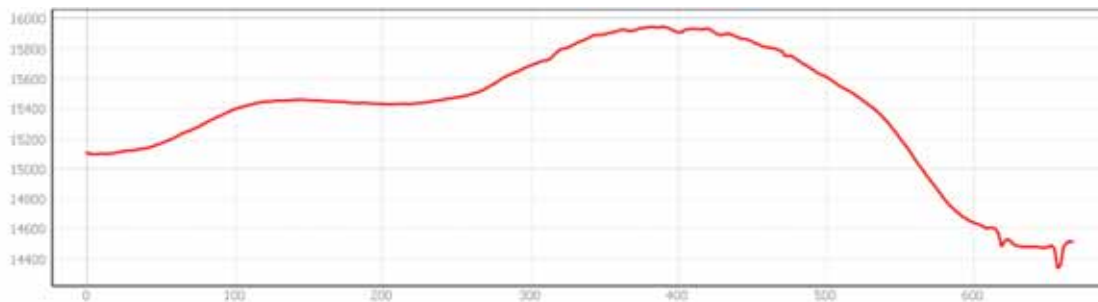


Abb. 54 Untersuchungsraum 59: Schmorren - Profilschnitt N-S oben: Profilschnitt, unten: Reliefsituation, die Profillinie ist N-S orientiert

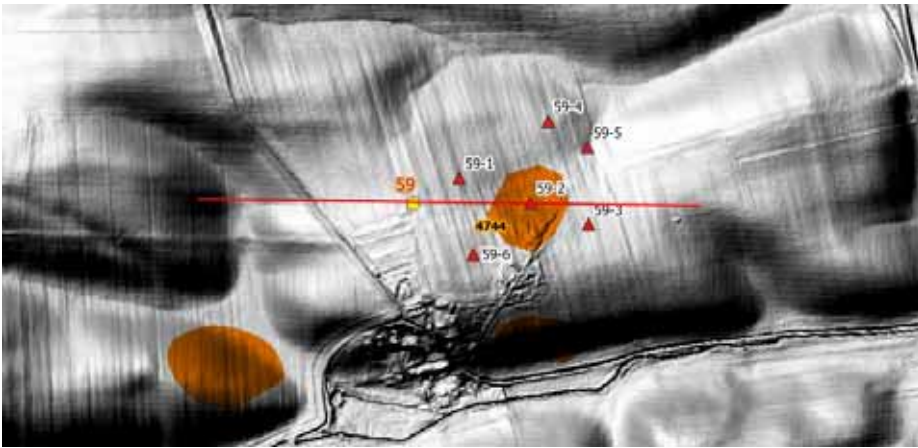
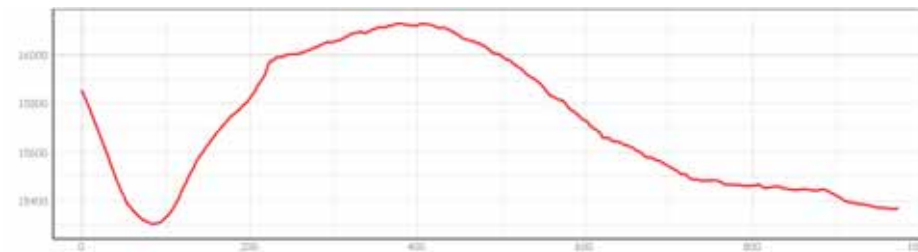


Abb. 55 Untersuchungsraum 59: Schmorren - Profilschnitt O-W oben: Profillschnitt, unten: Reliefsituation, die Profillinie verläuft in W-O Richtung.



Abb. 56 Standort 59: Schmorren - Profilfoto Tschernosem-Braunerde aus Löss LH: Hauptlage, LM1, 2: Mittellage, LB1, 2: Basislage, Ln : Lage unbestimmt (Foto: F. Hieke, Farben verfälscht).

Abb. 57 Der Untersuchungsraum Schmorren, Blick nach Nordwesten u.a. zum Bereich von Profil S-9

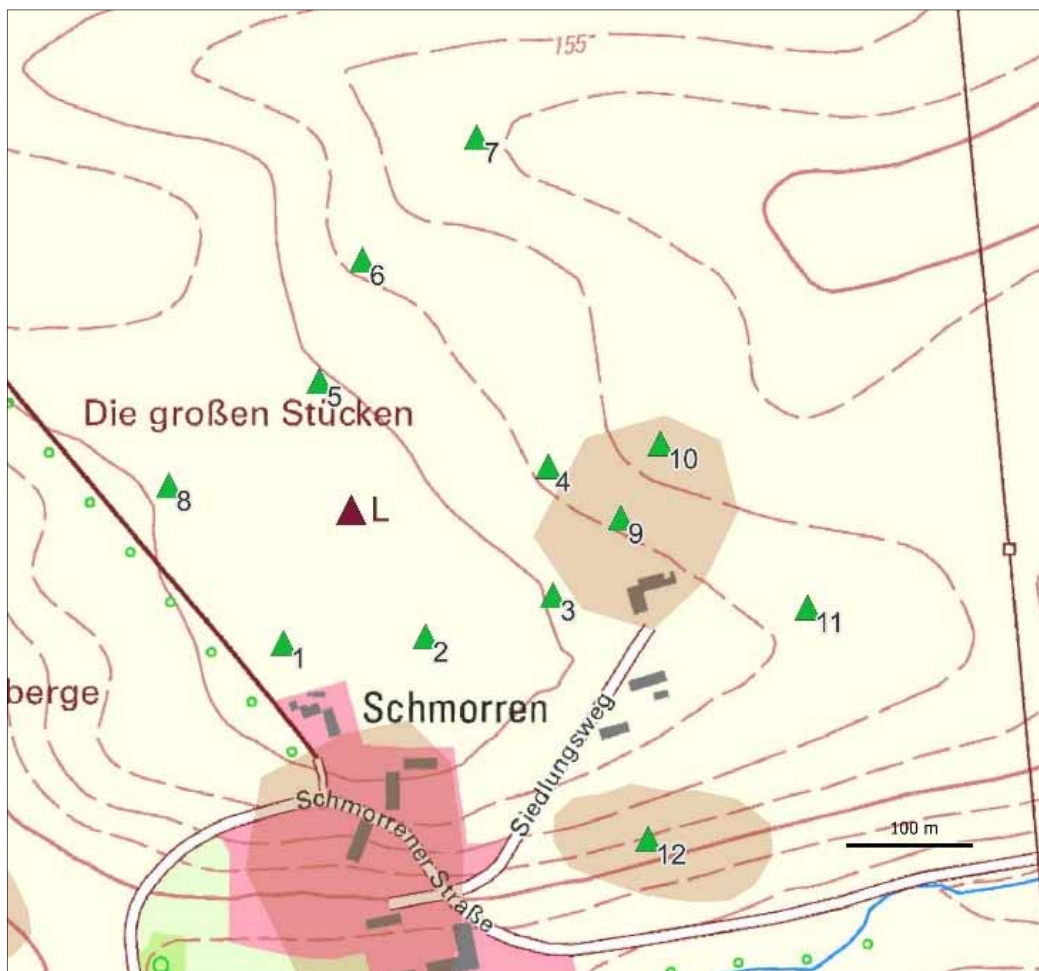
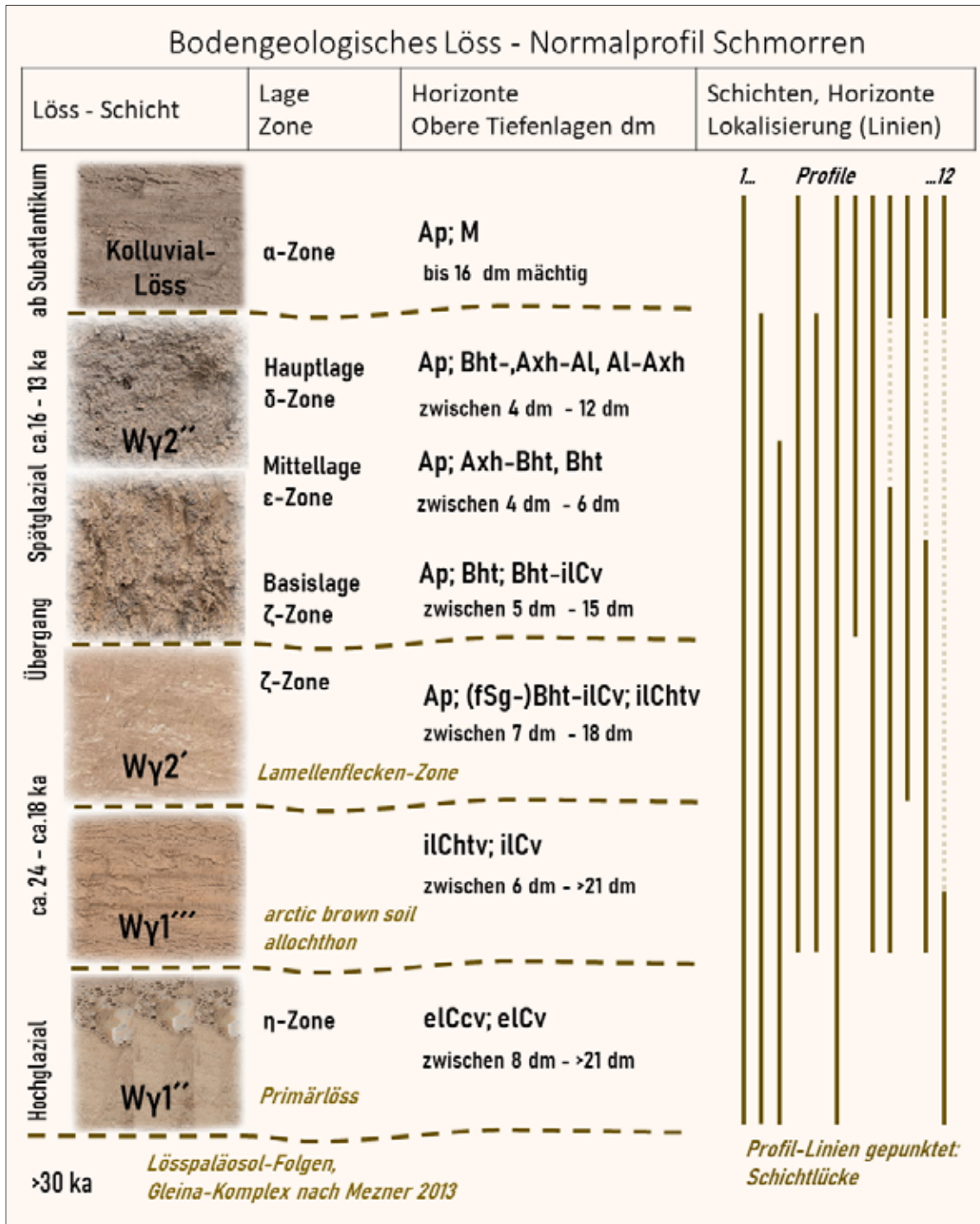


Abb. 58 Topografie von Gebiet Schmorren und Lage der tatsächlichen Kartierpunkte (Δ L - entspricht der des BDF-Leitprofiles).



Abb. 59 Lage der Kartierungspunkte und das Standort Profil 59 im DGM. Das Leitprofil 59 ist mit ΔL dargestellt.

Abb. 60 Bodengeologisches Löss-Normalprofil Untersuchungsraum Schmorren.

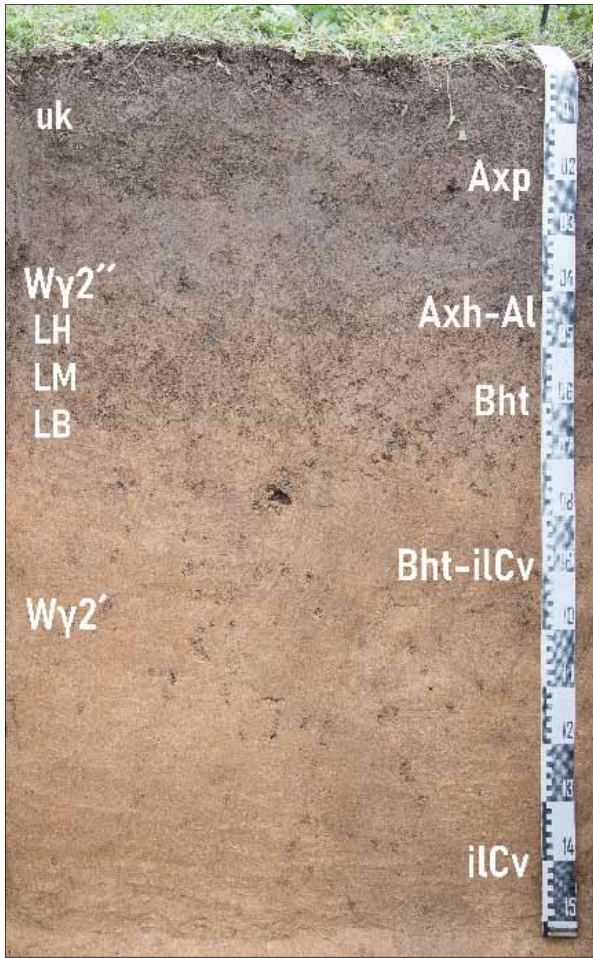


Obere Tiefenlage dm → Ap, M sind nicht berücksichtigt

Löss-Stratigraphie nach Lieberoth 1963 / xx, Lage nach AG Boden (KA 4/5) 1994, 2005 / xx

Zone nach Kopp / Schwanecke 1970 / xx

Die aktuelle Löss-Stratigraphie nach Mezner 2013 (Unit I – V) / xx wurde nicht verwendet aufgrund der feldgeologischen Relevanz von Lieberoth 1963 / xx.



Der im Profilbild dunkelgraue Axh-Al-Horizont ist deutlich an Ton-Humus verarmt, besser erkennbar an der Aggregatbruchfläche mit heller Fleckung

Abb. 61 Das BDF-Leitprofil „Tschernosem-Parabraunerde aus Löss / xx und diagnostische Bodenaggregate des Profils.

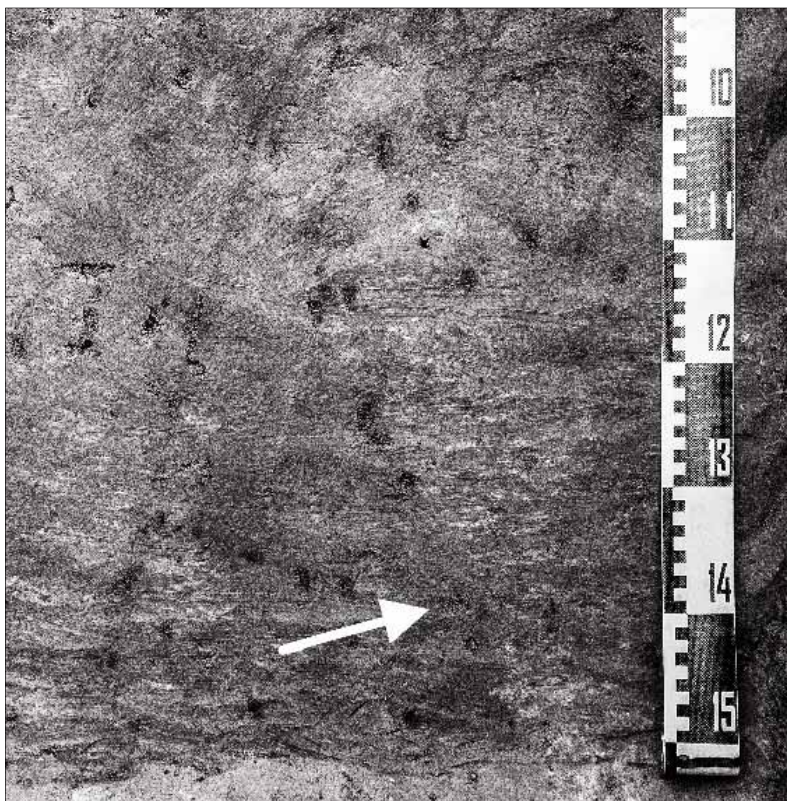


Abb. 62 Eiskeil-Struktur in Leitprofil BDF 59.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
S-1		Plateau, sehr schwach geneigt; sehr gering erodiert, Auftrag 9 dm	Kolluvialer Lösslehm // Kryo-Lösslehm /// Verlehmter Löss /// Primärlöss	Kolluvisol über tiefem Parabraunerde -Tschernosem 4 dm I Ap 6 dm II fAp-M 9 dm III M 10 dm IV fAl-Axh 15 dm IV Bht 17 dm V Bht-ilCv 19 dm V ilCv 21 dm VI eCv
S-2		Plateau, sehr schwach geneigt; gering erodiert	Kolluvialer Lösslehm \ Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss /// Primärlöss	Erodierte Tschernosem- Parabraunerde 4 dm I Ap 5 dm II Axh-Bht-Al 6 dm III Bht 9 dm IV Bht 12 dm IV Bht-ilCv 20 dm V ilCv 23 dm VI eCv
S-3		Plateau-Randlage, Oberhang schwach geneigt; gering erodiert	Kolluvialer Lösslehm \ Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss /// Primärlöss	Erodierte Tschernosem- Parabraunerde 4 dm I Ap 6 dm II Axh-Bht 10 dm III Bht 12 dm III Bht-ilCv 19 dm IV ilCv 20 dm V eCv
S-4		Hangmulde, schwach geneigt; Auftrag 10 dm	Kolluvialer Lösslehm // Kryo-Lösslehm /// Verlehmter Löss	Kolluvisol über tiefem Parabraunerde -Tschernosem 4 dm I Ap 5 dm II fAp-M 10 dm III M 12 dm IV fAxh 14 dm IV Bht-Al-Axh 16 dm V Bht 20 dm V Bht-ilCv 21 dm VI ilCv

Abb. 63 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Schmorren.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
S-5		Oberhang, schwach geneigt; gering bis mittel erodiert	Kolluvialer Lösslehm / Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss	Erodierte Tschernosem- Parabraunerde 4 dm I Ap 6 dm II Axh-Bht 11 dm III Bht 14 dm III Bht-ilCv 21 dm IV ilCv
S-6		Hangmulde, schwach geneigt; gering bis mittel erodiert, Auftrag 4 dm	Kolluvialer Lösslehm \ Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss /// Primärlöss	Erodierte kolluviale Tschernosem-Parabraunerde 3 dm I Ap 4 dm I M 5 dm II fAxh-Al+Bht 8 dm III Bht 12 dm III Bht-ilCv 19 dm IV ilCv 25 dm IV elCv
S-7		Hangrinne, schwach geneigt; gering bis mittel erodiert, Auftrag 4 dm	Kolluvialer Lösslehm /// Kryo-Lösslehm	Pseudovergleyter Kolluvisol (über sehr tiefem Parabraunerde- Haftnässepseudogley- Tschernosem) 4 dm I Ap 11 dm I M 16 dm II fSg-M 19 dm III fSg-Al-Axh 20 dm III Sg-Axh-Bht 21 dm IV Sg-Bht
S-8		Oberhang, schwach geneigt; gering erodiert, Auftrag 6 dm	Kolluvialer Lösslehm / Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss	Kolluvisol über erodiertem Parabraunerde-Tschernosem 4 dm I Ap 6 dm I M 7 dm II fAl+Bht-Axh 12 dm III Bht 19 dm III Bht-ilCv 21 dm IV ilChtv

Abb. 63 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Schmorren.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
S-9		Plateau-Randlage, Hangmulde sehr schwach geneigt; mittel erodiert, Auftrag 12 dm	Kolluvialer Lösslehm / Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss	Kolluvisol über erodierter Humusparabraunerde 4 dm I Ap 5 dm I M 7 dm II fBht 9 dm II Bht-ilCv 15 dm III ilCtv 21 dm IV ilCv
S-10		Hangmulde schwach geneigt; mittel erodiert, Auftrag 5 dm	Kolluvialer Lösslehm \ Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss /// Primärlöss	Kolluvisol über sehr tiefem Parabraunerde-Tschernosem 4 dm I Ap 5 dm II fAp-M 9 dm III M 12 dm IV M 15 dm V Al-Axh 16 dm V Axh-Bht 18 dm V Bht 21 dm VI Bht-ilCv
S-11		Flanke, Oberhang, schwach geneigt; mittel erodiert, Auftrag 7 dm	Kolluvialer Lösslehm // Kryo-Lösslehm /// Verlehmter Löss /// Primärlöss	Kolluvisol über tiefer erodierter Humusparabraunerde 4 dm I Ap 7 dm I M 9 dm II fBht 13 dm III Bht-ilCv 14 dm IV ilCtv 19 dm IV ilCv 21 dm V elCcv
S-12		Oberhang- Versteilung, mittel geneigt; sehr hoch erodiert, Auftrag 6 dm	Kolluvialer Lösslehm / Verlehmter Löss // Primärlöss	Kolluvisol 3 dm I Ap 4 dm II fAp-M 6 dm III M 8 dm IV ilCv 21 dm V elCv

Abb. 63 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Schmorren.



Abb. 64 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Untersuchungsraum Schmorren mit Bodendenkmalflächen (braun).

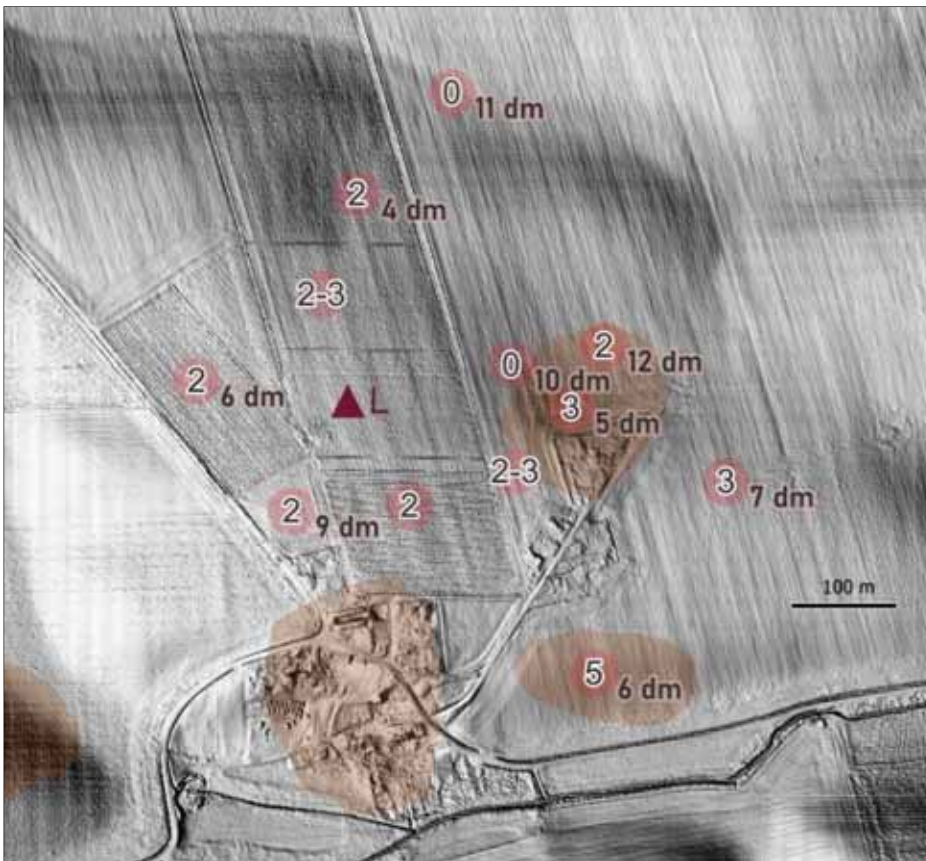


Abb. 65 Die Erosionsgrade nach KA5 und Aufträge (dm) im Gebiet Schmorren It. Feldbefunden.



Abb. 66 M-Horizont 12 dm und wahrscheinlich nicht verkürzter Al-Axh-Horizont in Profil S-10.



Abb. 67 Extreme Profilverkürzung mit Wy1-Löss unter M-Horizont in Profil S-12.



Abb. 68 Dunkles Kolluvium bis mind. 16 dm Tiefe im Profil S-7.



Abb. 69 Topografie des Untersuchungsraums Leuben und Lage der Kartierungspunkte.

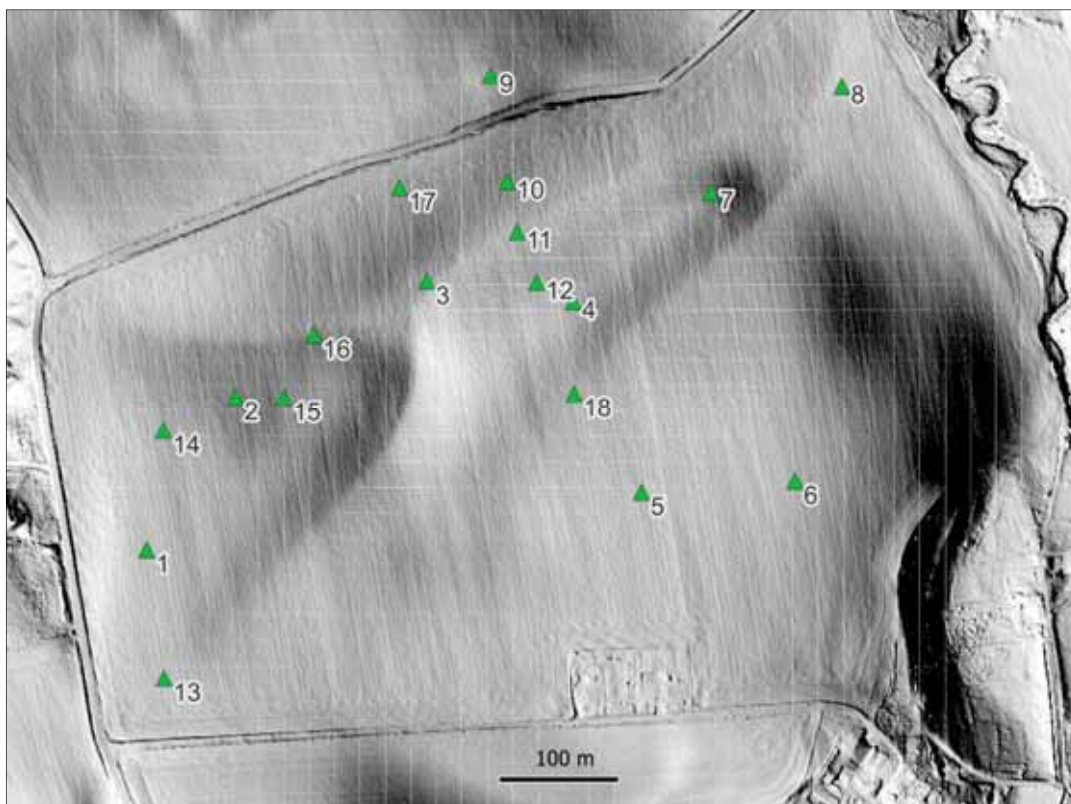


Abb. 70 Lage der Kartierungspunkte im DGM dargestellt

Bodengeologisches Löss - Normalprofil Leuben

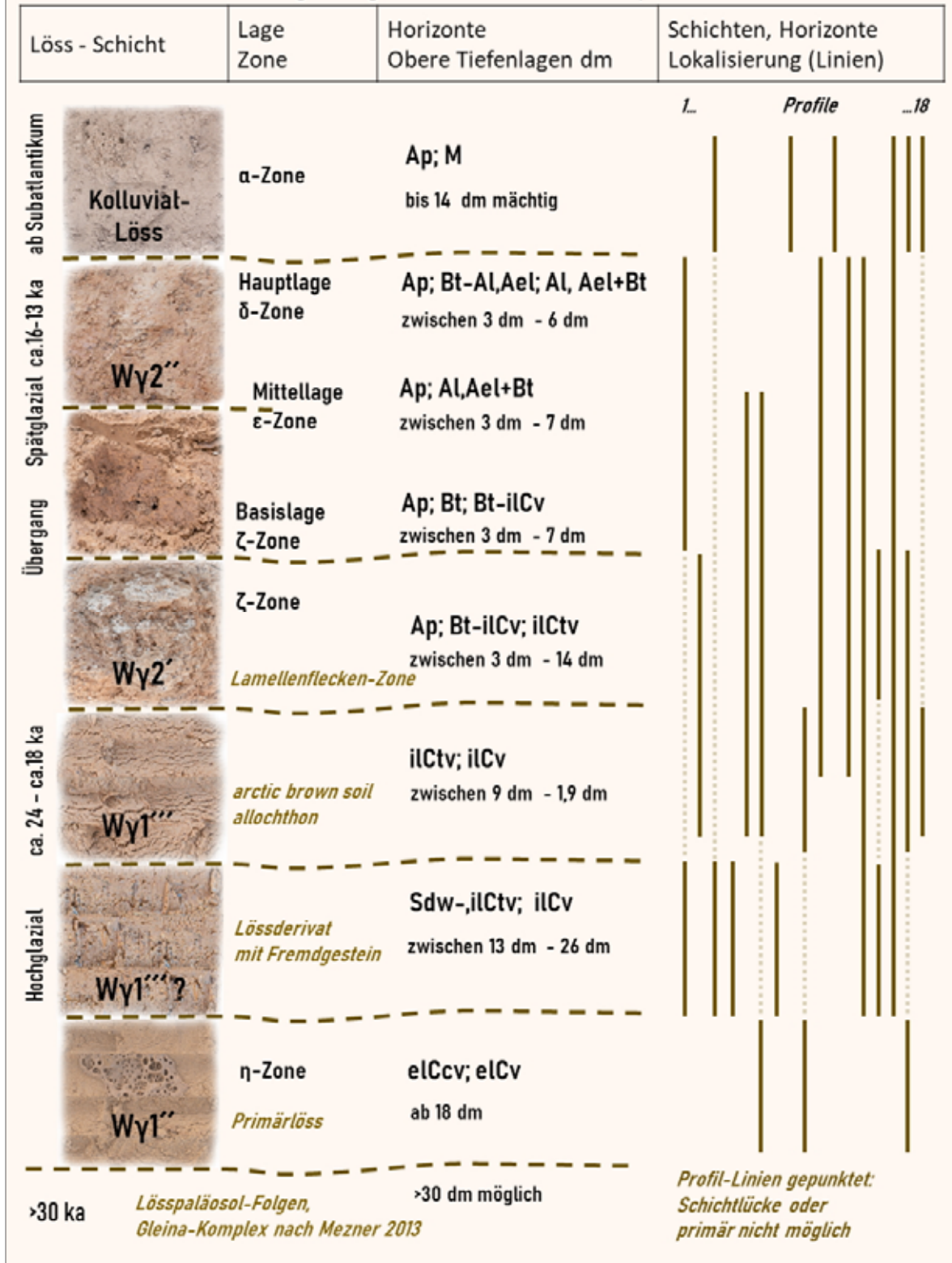


Abb. 71 Bodengeologisches Löss-Normalprofil Untersuchungsraum Leuben.

Obere Tiefenlage dm → Ap ist nicht berücksichtigt

Löss-Stratigraphie nach Lieberoth 1963 / xx, Lage nach AG Boden (KA 4/5) 1994, 2005 / xx

Zone nach Kopp / Schwanecke 1970 / xx

Die aktuelle Löss-Stratigraphie nach Mezner 2013 (Unit I – V) / xx wurde nicht verwendet auf Grund der feldgeologischen Relevanz von Lieberoth 1963 / xx.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion / Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
L-1		Oberhang, schwach geneigt; gering erodiert	Kryo-Lösslehm /// Verlehmter Löss	Erodierte pseudovergleyte Fahlerde 4 dm I Ap 6 dm II Ael+Bt 9 dm III Bt 12 dm IV Sdw-Bt-ilCv 15 dm IV ilCv 17 dm V fSdw-ilCtv 18 dm VI ilCv
L-2		Unterhang, mittel geneigt; hoch erodiert	Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss	Erodiertes Parabraunerde-Regosol 3 dm I Ap 5 dm II Bt-ilCv 10 dm III ilCtv 11 dm III ilCtv
L-3		Hangrinne, mittel geneigt; sehr hoch erodiert, Auftrag 11 dm	Kolluvialer Lösslehm // Verlehmter Löss	Kolluvisol 4 dm I Ap 6 dm I M 11 dm II M 21 dm III ilCtv
L-4		Mittelhang, horizontal konvex, schwach geneigt; sehr hoch erodiert	Verlehmter Löss // Primärlöss	Regosol 2 dm I Ap 8 dm I ilCtv 15 dm II elCv

Abb. 72 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Leuben





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion / Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
L-5		Oberhang, mittel geneigt; hoch erodiert	Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss	Erodierte Parabraunerde 4 dm I Ap 6 dm II Bt 10 dm III ilCtv 16 dm IV ilCv 20 dm IV ilCv
L-6		Flanke, schwach geneigt; hoch erodiert	Kryo-Lösslehm // Verlehmter Löss /// Primärlöss	Erodierte Parabraunerde 3 dm I Ap 8 dm II Bt 11 dm III Bt-ilCv 18 dm IV ilCv 22 dm V elCcv 24 dm VI elCv
L-7		Unterhang, horizontal konnex, mittel geneigt;	Schmelzwasserkies und -sand	Regosol 2 dm I Ap 4 dm II ilCv
L-8		Hangverflachung, Unterhang, schwach geneigt; Auftrag >16 dm	Kolluvialer Lösslehm	Kolluvisol 2 dm I Ap 4 dm I M 8 dm II M 16 dm III M

Abb. 72 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Leuben.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion / Deposition	Substrate	Bodentyp; Horizonte (untere Tiefe dm)
L-9		Mittelhang, horizontal konvex, schwach geneigt; sehr hoch erodiert	Verlehmtter Löss / Primärlöss	Regosol 2 dm I Ap 4 dm II iCv 6 dm III eCv
L-10		Mittelhang, mittel geneigt; sehr hoch erodiert	Kryo-Lösslehm / Verlehmtter Löss // Primärlöss	Erodierte Parabraunerde 2 dm I Ap 5 dm I Al-Bt 8 dm II Bt 11 dm II iCtv 14 dm III eCv
L-11		Hangrinne, schwach geneigt; sehr hoch erodiert	Kolluvialer Lösslehm	Erodierte Parabraunerde 2 dm I Ap 4 dm I M 13 dm II M
L-12		Mittelhang, mittel geneigt; gering erodiert	Kryo-Lösslehm	Fahlerde-Braunerde 2 dm I Ap 3 dm I Bv 8 dm II Ael+Bt 11 dm III Bt

Abb. 72 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Leuben.





Nr.	Profilfoto	Relief; Erosion / Deposition	Substrate	Horizonte (untere Tiefe dm)
L-13		Plateau-Randlage, schwach geneigt; gering erodiert	Kryo-Lösslehm /// Verlehmtter Löss /// Lössderivat	Erodierte Fahlerde 3 dm I Ap 4 dm II Bt+Ael 6 dm III Bt 8 dm III Bt-ilCv 13 dm IV ilCv 26 dm V ilCv 29 dm VI ilCv 30 dm VII ilCv
L-14		Unterhang, mittel geneigt; hoch erodiert	Kryo-Lösslehm /// Lössderivat	Erodiertes Parabraunerde-Regosol 3 dm I Ap 10 dm II Bt-ilCv 13 dm III ilCv 15 dm IV ilCv
L-15		Unterhang, mittel geneigt; mittel erodiert, Auftrag 6 dm	Kolluvialer Lösslehm / Kryo-Lösslehm /// Verlehmtter Löss	Kolluvisol über erodierte Parabraunerde 3 dm I Ap 6 dm I M 7 dm II Al-Bt 9 dm III Bt 12 dm IV Bt-ilCv 18 dm IV ilCv 20 dm V ilCv
L-16		Hangrinne, mittel geneigt; Auftrag >10 dm	Kolluvialer Lösslehm	Kolluvisol 4 dm I Ap 5 dm II M 10 dm III M

Abb. 72 Kurzcharakterisierung der Profile Gebiet Leuben.

Abb. 73 Erosierte Fahlerde aus Lösslehm in Profil L-13



Abb. 74
Lössderivat
an der Basis
von Profil L-
13.



Abb. 75 Das Bodenprofil L-6 im Bohrstock.

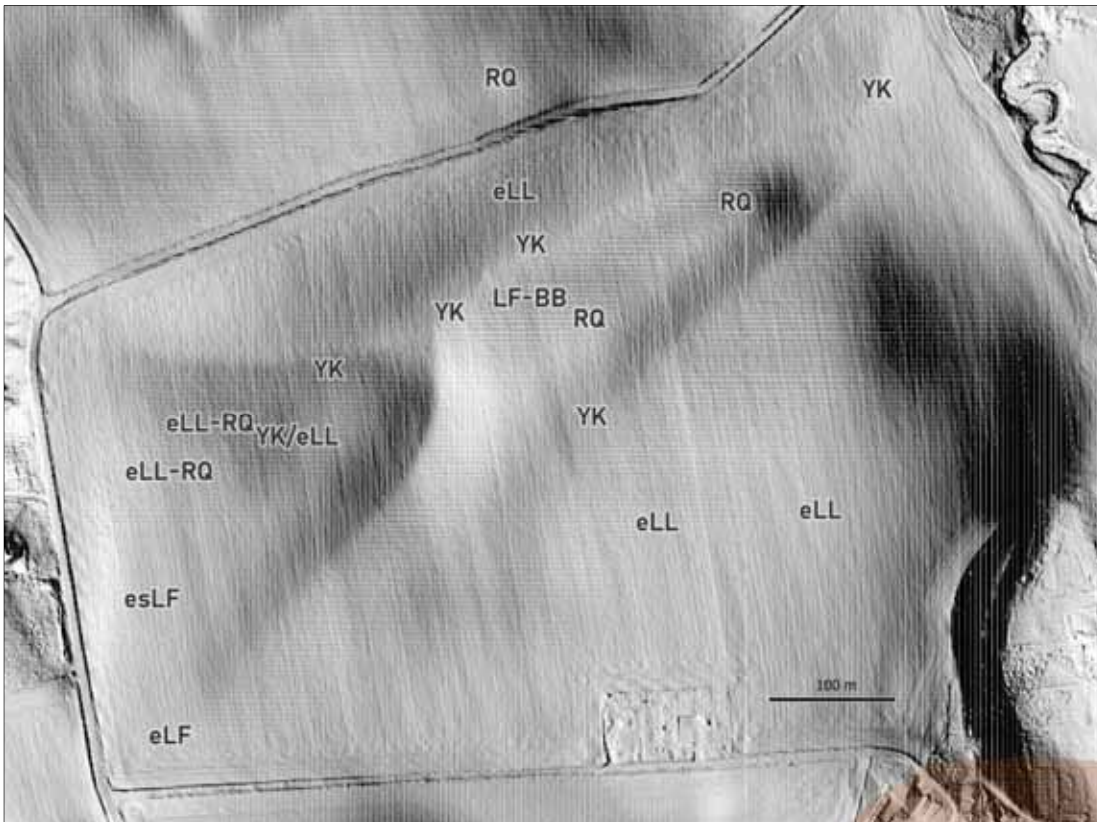


Abb. 76 Die Bodenheterogenität (Bodentypen) im Untersuchungsraum Leuben mit angrenzender Bodendenkmalfläche (braun).

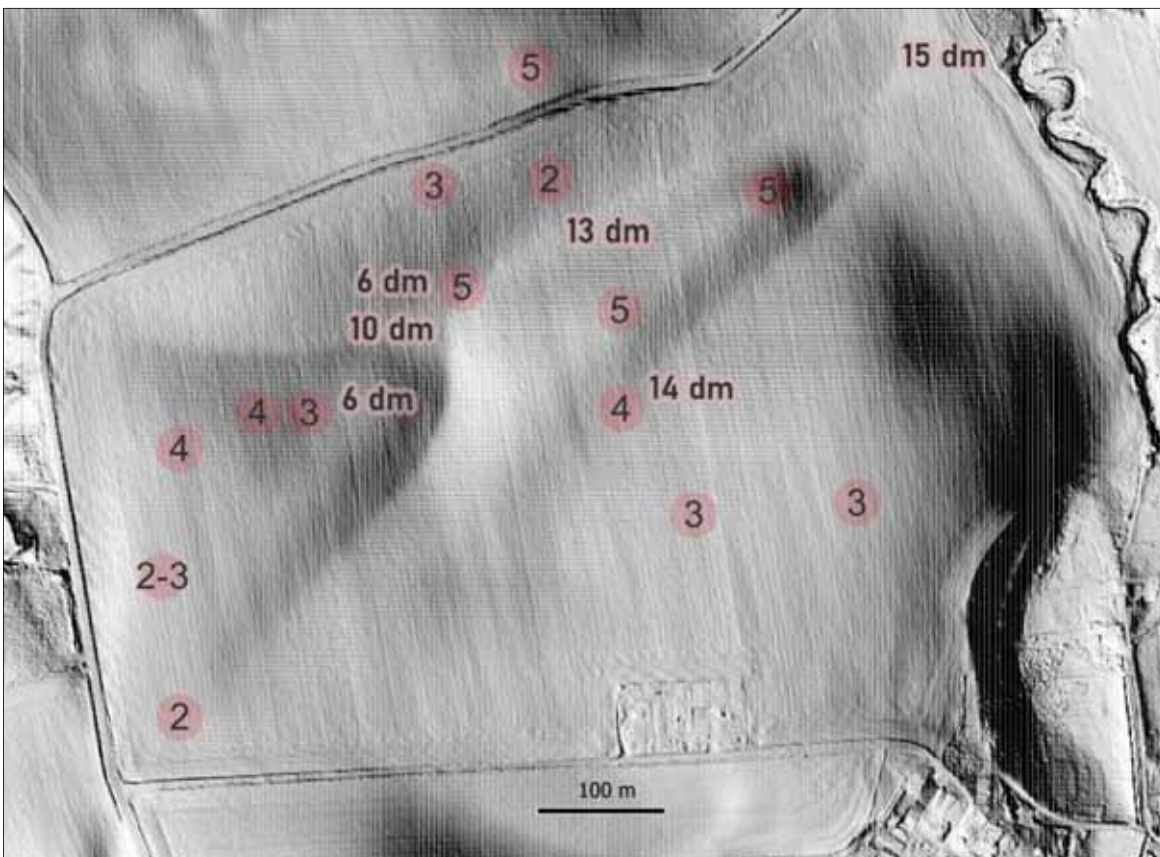


Abb. 77 Die Erosionsgrade nach KA5 und Aufträge (dm) im Gebiet Leuben lt. Feldbefunden.

Abb. 78 Dokumentierte Aufnahmepunkte der Catena und Klassenflächen der Bodenschätzung mit Klassenzeichen (KLZ).

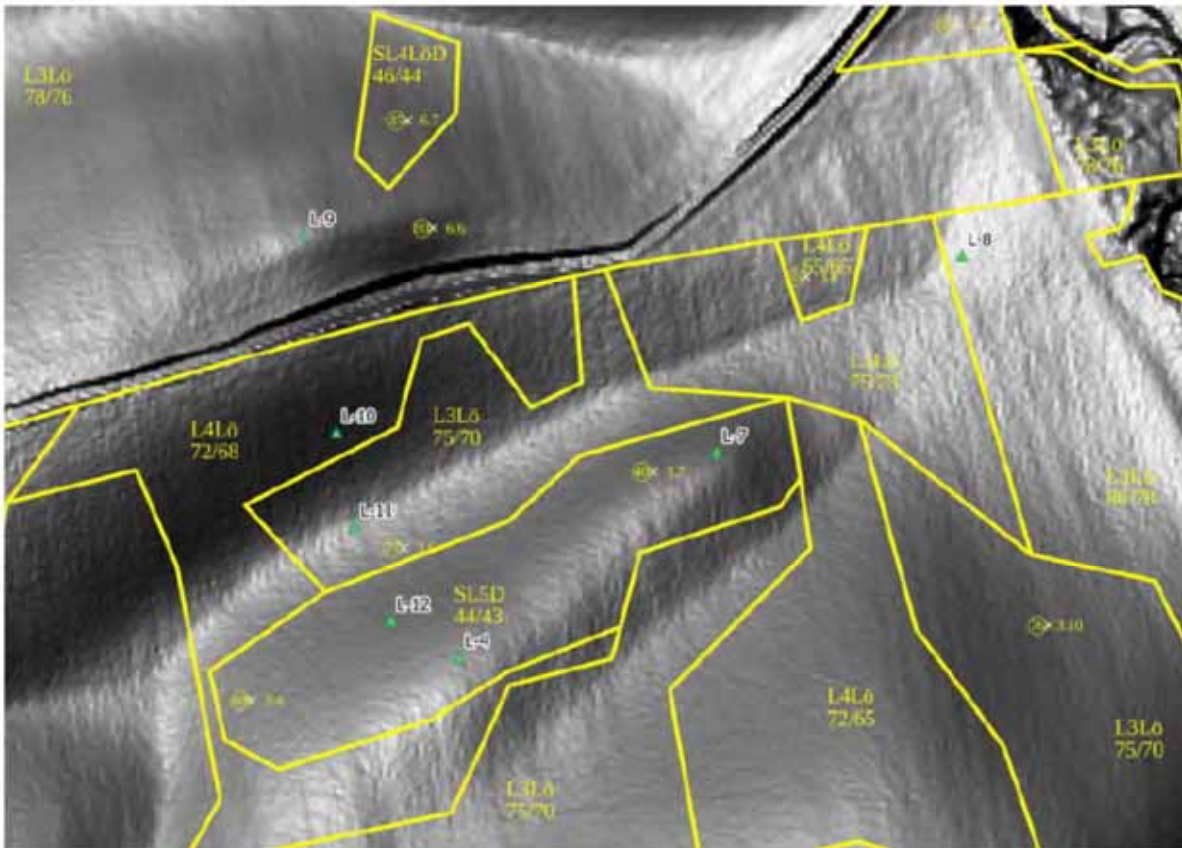


Abb. 79 KLZ der Boden(alt)schätzung.

Nr.	KLZ ¹ Bodenaltschätzung	KLZ ² Bodenneuschätzung	keine signifikante Veränderung (/) Erosion (-) Deposition (+)
L-9	L 3 L6 78/76	L 4 L6 69	-
L-10	L 4 L6 72/68	L 4 L6 68	/
L-11	L 3 L6 75/70	L 3 L6 80	+
L-12	SL 5 D 44/43	L 4 L6 71	keine Ableitung möglich
L-4	SL 5 D 44/43	L 4 L6 69	keine Ableitung möglich
L-7	SL 5 D 44/43	IS 5 D 35	-
L-8	L 3 L6 80/78	L 2 L6 89	+

¹ s. Abb. 43, KLZ der Boden(alt)schätzung

² Neuschätzung der Aufnahmepunkte L-x durch ehrenamtliche Bodenschätzer (Autoren)

Ackerschätzungsrahmen

Bodenart	Entstehung	Zustandsstufe						
		1	2	3	4	5	6	7
S Sand	D		41 - 34	33 - 27	26 - 21	20 - 16	15 - 12	11 - 7
	Al		44 - 37	36 - 30	29 - 24	23 - 19	18 - 14	13 - 9
	V		41 - 34	33 - 27	26 - 21	20 - 16	15 - 12	11 - 7
SI anlehmgiger Sand	D		51 - 43	42 - 35	34 - 28	27 - 22	21 - 17	16 - 11
	Al		53 - 46	45 - 38	37 - 31	30 - 24	23 - 19	18 - 13
	V		49 - 43	42 - 36	35 - 29	28 - 23	22 - 18	17 - 12
	Vg			37 - 31	30 - 24	23 - 19	18 - 13	
IS lehmiger Sand	D	68 - 60	59 - 51	50 - 44	43 - 37	36 - 30	29 - 23	22 - 16
	Lö	71 - 63	62 - 54	53 - 46	45 - 39	38 - 32	31 - 25	24 - 18
	Al	71 - 63	62 - 54	53 - 46	45 - 39	38 - 32	31 - 25	24 - 18
	V		57 - 51	50 - 44	43 - 37	36 - 30	29 - 24	23 - 17
	Vg			47 - 41	40 - 34	33 - 27	26 - 20	19 - 12
SL stark lehmiger Sand	D	75 - 68	67 - 60	59 - 52	51 - 45	44 - 38	37 - 31	30 - 23
	Lö	81 - 73	72 - 64	63 - 55	54 - 47	46 - 40	39 - 33	32 - 25
	Al	80 - 72	71 - 63	62 - 55	54 - 47	46 - 40	39 - 33	32 - 25
	V	75 - 68	67 - 60	59 - 52	51 - 44	43 - 37	36 - 30	29 - 22
	Vg			55 - 48	47 - 40	39 - 32	31 - 24	23 - 16
sL sandiger lehmiger	D	84 - 76	75 - 68	67 - 60	59 - 53	52 - 46	45 - 39	38 - 30
	Lö	92 - 83	82 - 74	73 - 65	64 - 56	55 - 48	47 - 41	40 - 32
	Al	90 - 81	80 - 72	71 - 64	63 - 56	55 - 48	47 - 41	40 - 32
	V	85 - 77	76 - 68	67 - 59	58 - 51	50 - 44	43 - 36	35 - 27
	Vg			64 - 55	54 - 45	44 - 36	35 - 27	26 - 18
L Lehm	D	90 - 72	71 - 74	73 - 66	65 - 58	57 - 50	49 - 43	42 - 34
	Lö	100 - 92	91 - 83	82 - 74	73 - 65	64 - 56	55 - 46	45 - 36
	Al	100 - 90	89 - 80	79 - 71	70 - 62	61 - 54	53 - 45	44 - 35
	V	91 - 83	82 - 74	73 - 70	69 - 56	55 - 47	46 - 39	38 - 30
	Vg			70 - 61	60 - 51	50 - 41	40 - 30	29 - 19
LT schwerer Lehm	D	87 - 79	78 - 70	69 - 61	60 - 54	53 - 46	45 - 38	37 - 28
	Al	91 - 83	82 - 74	73 - 65	64 - 57	56 - 49	48 - 40	39 - 29
	V	87 - 79	78 - 70	69 - 61	60 - 52	51 - 43	42 - 34	33 - 24
	Vg			67 - 58	57 - 48	47 - 38	37 - 28	27 - 17
T Ton	D		71 - 64	63 - 56	55 - 48	47 - 40	39 - 30	29 - 18
	Al		74 - 66	65 - 58	57 - 50	49 - 41	40 - 31	30 - 18
	V		71 - 63	62 - 54	53 - 45	44 - 36	35 - 26	25 - 14
	Vg			59 - 51	50 - 42	41 - 33	32 - 24	23 - 14
Mo Moor	-		54 - 46	45 - 37	36 - 29	28 - 22	21 - 16	15 - 10

Abb. 80 Identifikation von Erosion /Deposition auf Basis von Bodenart und Zustandsstufe. Brauner Pfeil: Deposition humosen Sedimentes führt bei Beibehaltung der Bodenart Lehm zu besseren Zustandsstufen und höheren Bodenzahlen. Roter Pfeil: Intensive Erosion führt zu sandigeren Bodenarten, schlechteren Zustandsstufen und niedrigeren Bodenzahlen. Ausgangspunkt ist das Klassenzeichen L 4 Lö mit Bodenzahlen zwischen 65 bis 73 (roter Rahmen).

Gebiet	Aufnahmedatum	Gebietsgröße in [km ²]	Abstand der Flugachsen [m]	Fluggeschwindigkeit	Laser-mess rate [Hz]	Scanner-frequenz [Hz]	Scan-Winkel	Streifen-breite [m]	Streifen-überlappung [m]	Flughöhe in [m]	mittl. Punktdichte aller Messpunkte in [Pkt/m ²]
Freiberg	30.04. bis 9.5. 2006	2129	-	180 km/h	100000	-	+/- 22.5 deg	-	-	600 - 800	1.3
Waldheim	11., 13.- 15.01.2008; Nachflug 15.02. 2008	1600	500	65 m/s = 234 km/h	70000	39	+/-20 deg	728	228	1000	2
Torgau	31.03.-02.04.; 09.-11.04.2009	1710	500	75m/s=270 km/h	1 000 000	50	+/-20 deg	600	150	1100	> 2
Dresden	05.12.-22.12.2016 01.04.-10.04.2017	1762	420	200-210 km/h	266000	124	+/-20 deg	>510	>125	700-1110	mind. 4 (gefordert), lt. Statistik: 9.1
Eilenburg	13.02.-15.02.2018 20.02.-01.03.2018	1934	300	260 km/h	400000	40	+/-20 deg	422	>100	580	mind. 4 (gefordert), lt. Statistik: 5.5
Riesa	05.12., 19.12.2018 20.01.-30.01.2019	1664	450	278 km/h	444000	225	+/-20 deg	691	242	950	mind. 4 (gefordert), lt. Statistik: 15

Abb. 83 Technische Spezifikationen der Laserhöhenmessungen für ausgewählte Bearbeitungsgebiete (Etappen) nach GeoSN.

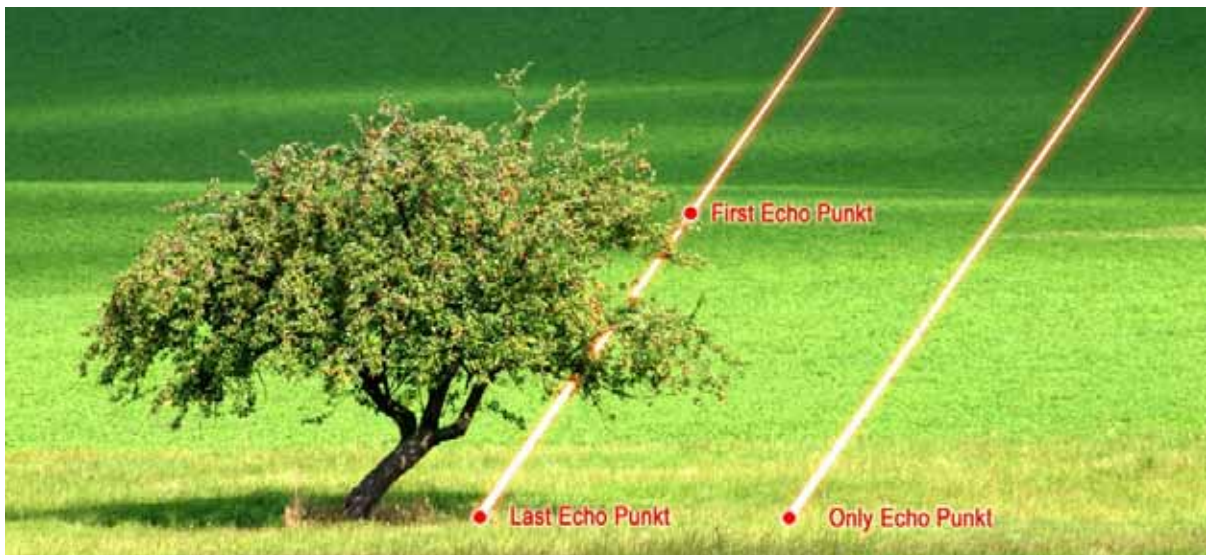


Abb. 84 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Laserscan-Punktklassen <http://www.landesvermessung.sachsen.de/fachliche-details-5304.html>.

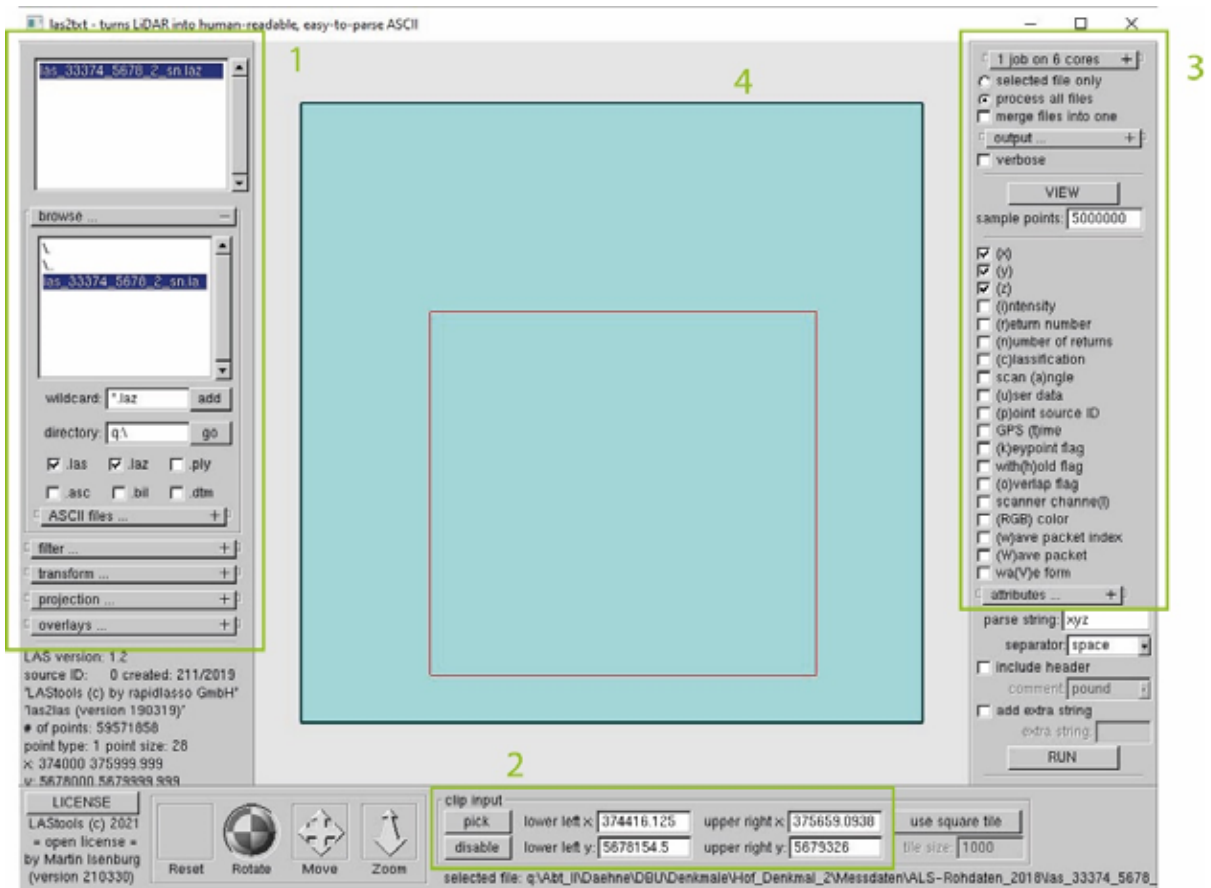


Abb. 85 Oberfläche des Programms ‚las2txt.exe‘; 1 – Browserbereich mit Auswahl der Laserscandatei; 2 – Einstellungsbereich der Ausdehnung des zu filternden Bereiches; 3 – Einstellungen des Ausgabeformats.



Abb. 86 Festlegung der Testflächen am Beispiel von Hof/Stauchitz.

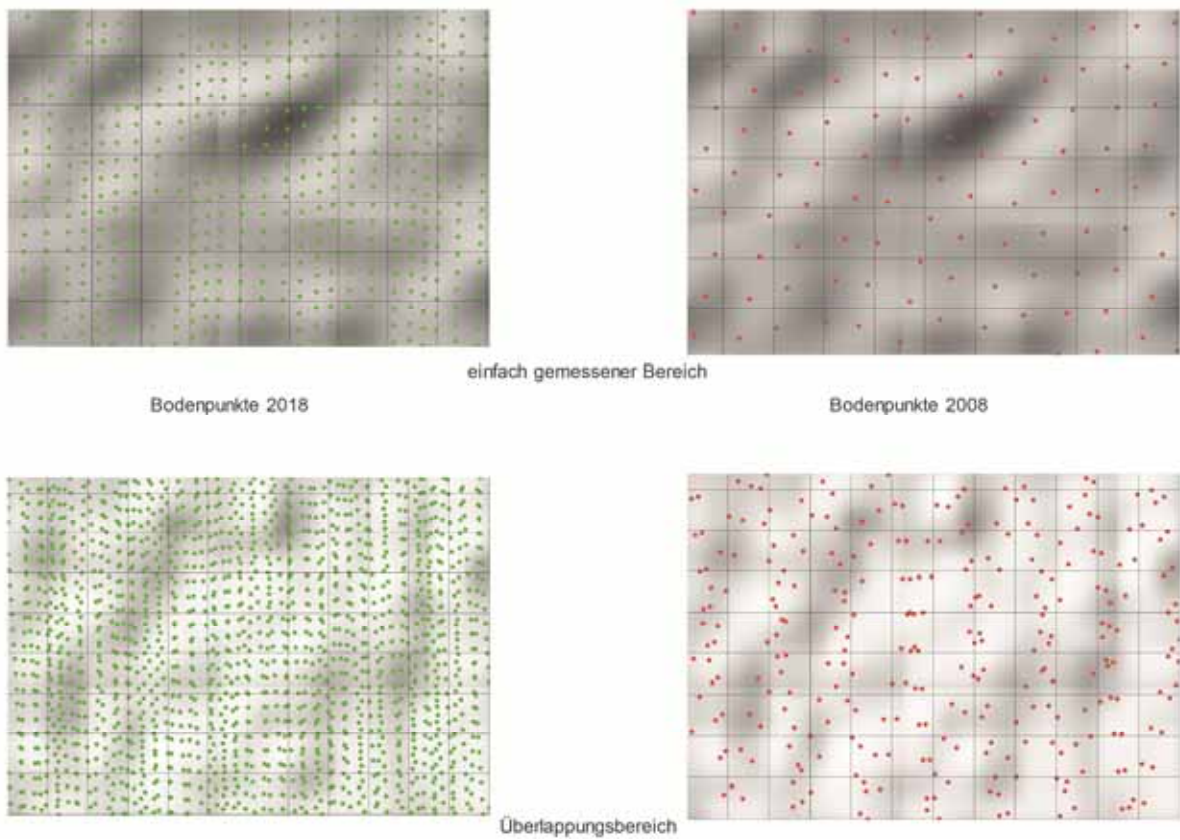
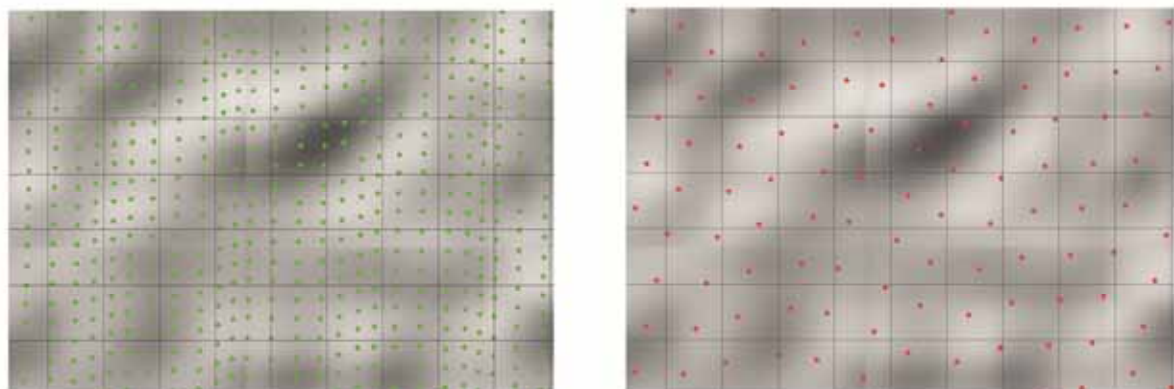
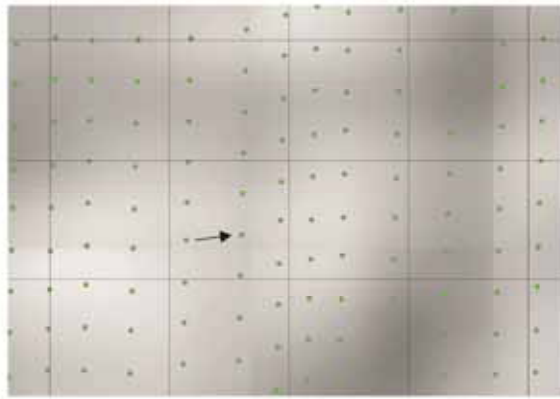


Abb. 87 Vergleichsübersicht der Punktdichte innerhalb der Testflächen mit 1m x 1m Raster.

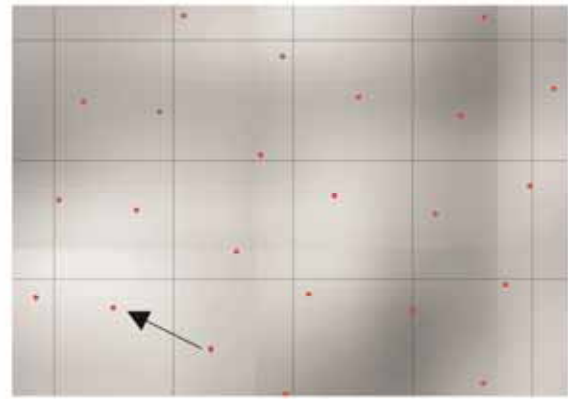


Anzahl 1 m ² -Kacheln	5135	Anzahl 1 m ² -Kacheln	5135
Maximale Punktzahl pro m ²	12	Maximale Punktzahl pro m ²	4
Minimale Punktzahl pro m ²	4	Minimale Punktzahl pro m ²	0
Median	9	Median	1
Durchschnitt Punkte pro m ²	8.1	Durchschnitt Punkte pro m ²	1.5

Abb. 88 Statistik der Bodenmesspunkte im einfach gemessenen Bereich.

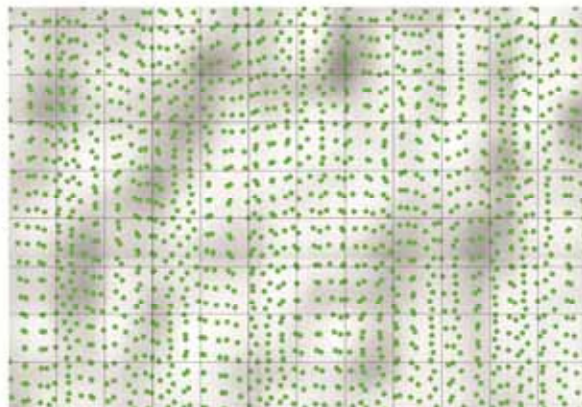


Punktanzahl in Testfläche	42070
Maximaler Abstand in m	0.3750
Minimaler Abstand in m	0
Median in m	0.3210
durchschnittlicher Abstand in m	0.3106

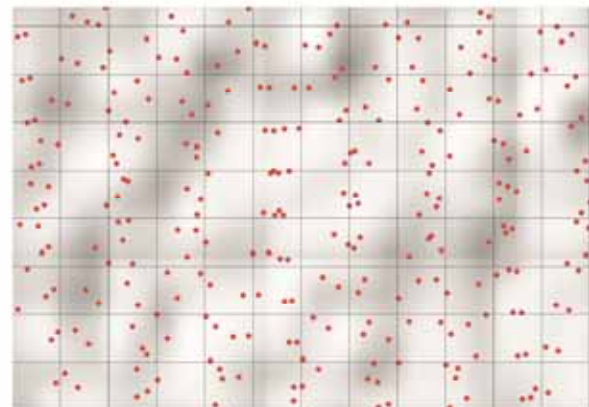


Punktanzahl in Testfläche	7784
Maximaler Abstand in m	0.8588
Minimaler Abstand in m	0.4946
Median in m	0.6892
durchschnittlicher Abstand in m	0.6911

Abb. 89 Distanzanalyse zum nächstgelegenen Punkt im einfach gemessenen Bereich.



Anzahl 1 m ² -Kacheln	5005
Maximale Punktanzahl pro m ²	23
Minimale Punktanzahl pro m ²	9
Median	15
Durchschnitt Punkte pro m ²	15.28



Anzahl 1 m ² -Kacheln	5005
Maximale Punktanzahl pro m ²	8
Minimale Punktanzahl pro m ²	0
Median	3
Durchschnitt Punkte pro m ²	2.78

Abb. 90 Statistik der Bodenmesspunkte im Überlappungsbereich.

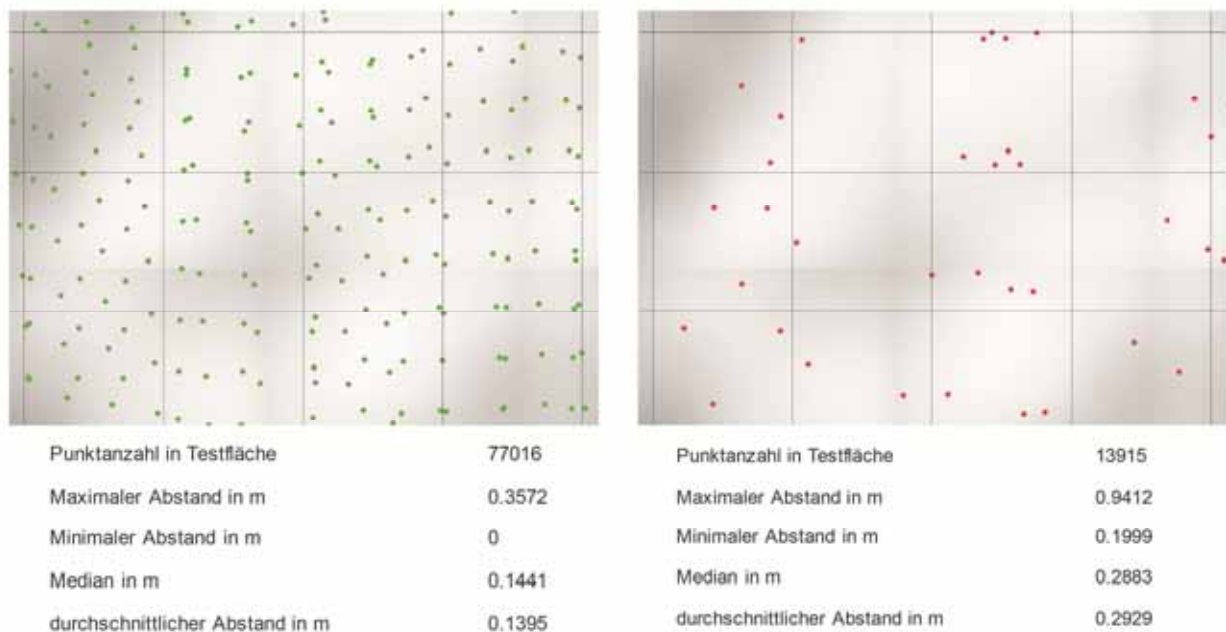


Abb.91 Distanzanalyse zum nächstgelegenen Punkt im Überlappungsbereich.

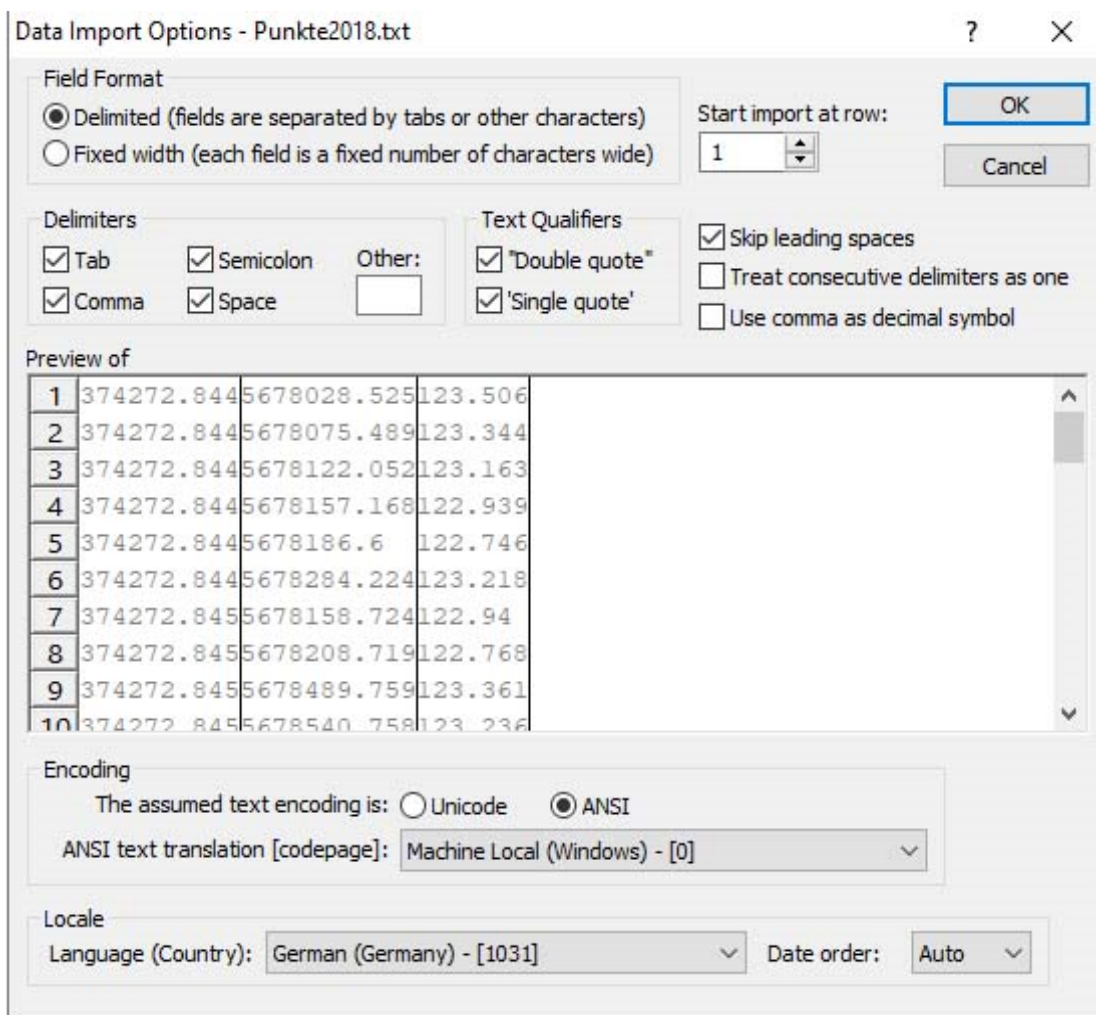


Abb. 92 Oberfläche des Programms ‚Surfer‘ beim Datenimport.

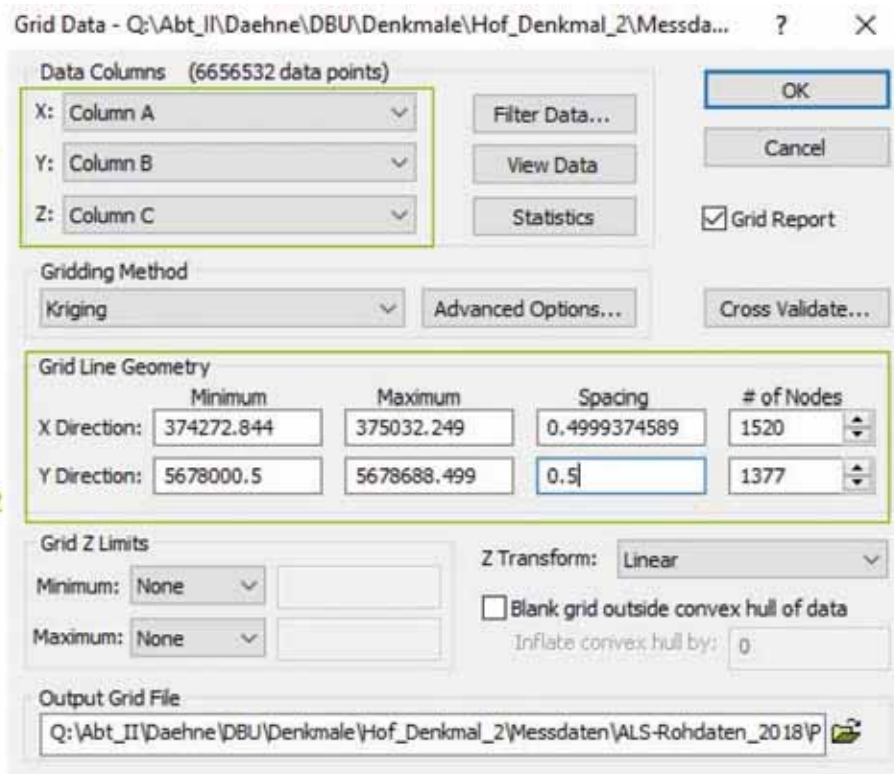


Abb. 93 Oberfläche des Programms ‚Surfer‘ bei den Kriging-Einstellungen; 1 – Zuweisung der Koordinatenspalten; 2 – Ausdehnung der zu rasternden Fläche und Einstellung der Rasterdichte.

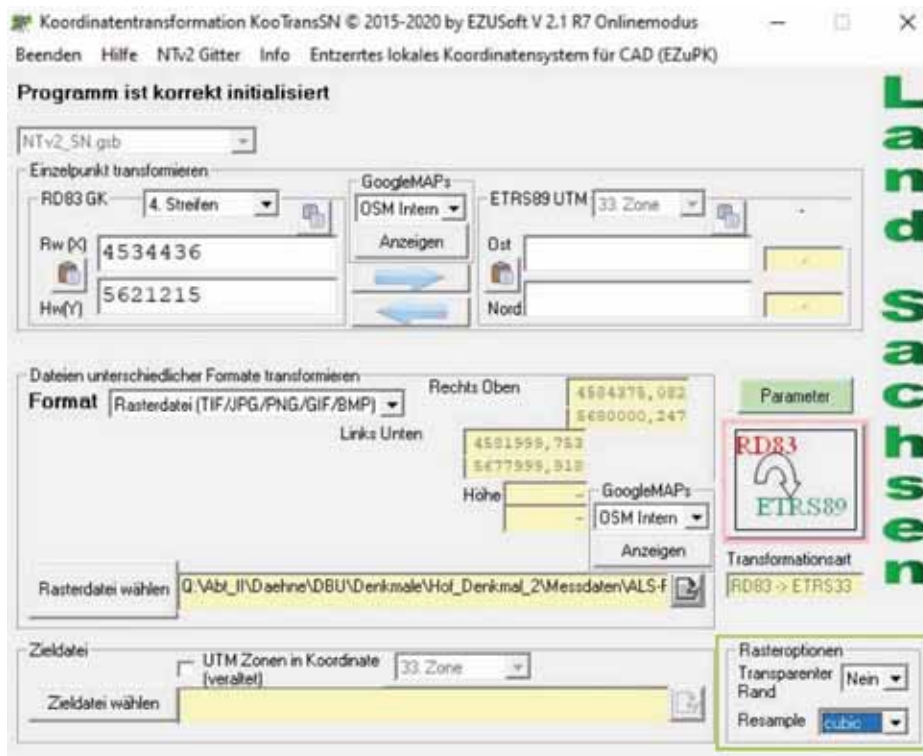
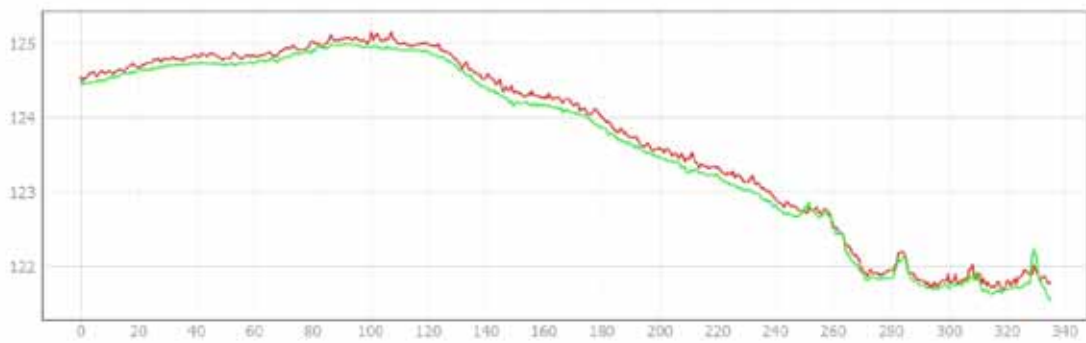


Abb. 94 Oberfläche des Programms ‚KooTransSN‘; 1 – Einstellung der Rasteroption ‚cubic‘.



A



B

Abb. 95 Hof-Stauchitz, Höhenkalibrierung der Daten von 2008 und 2018.



Abb. 96 Korrigierte Differenzberechnung der Höhenmodelle von 2008 und 2018 im Gebiet Hof/Stauchitz mit hinterlegtem Höhenmodell von 2018.

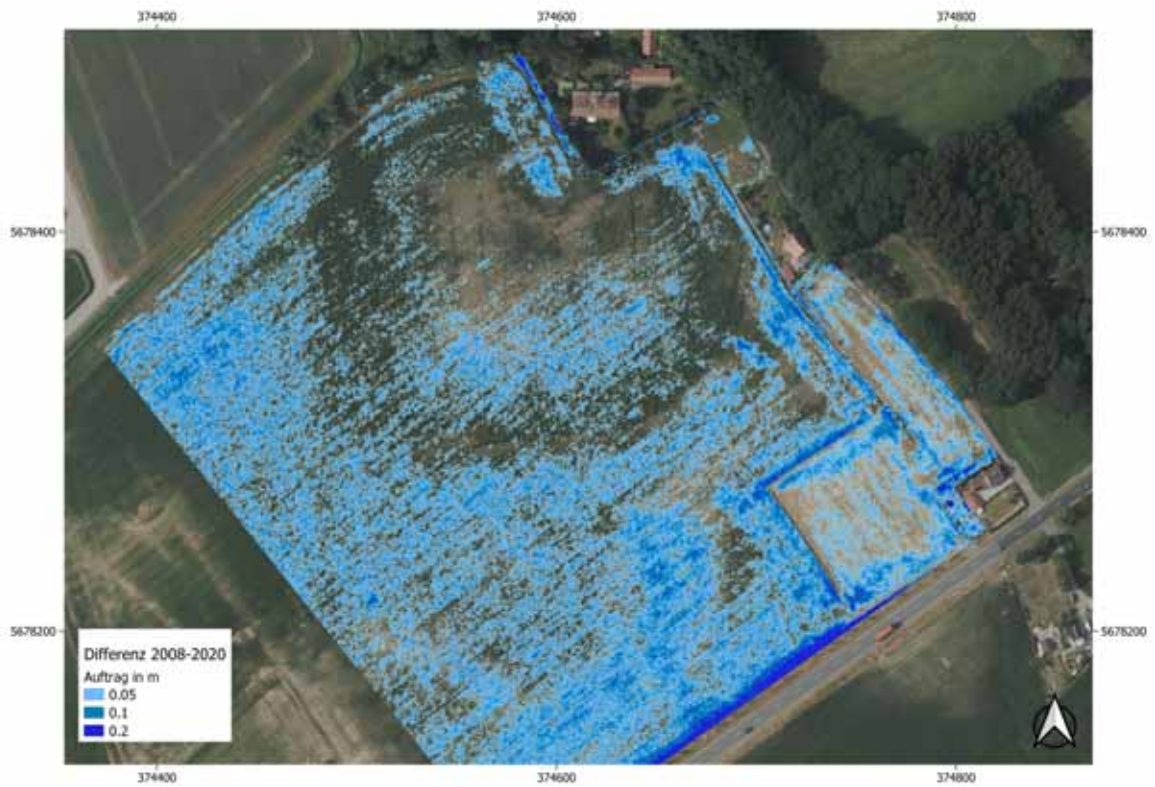


Abb. 97 Bereiche mit Auftrag von mehr als 0.05 m zwischen 2008 und 2018 im Gebiet Hof/Stauchitz.



Abb. 98 Differenzberechnung der Höhenmodelle von 2008 und 2018 im Gebiet Pitschütz.

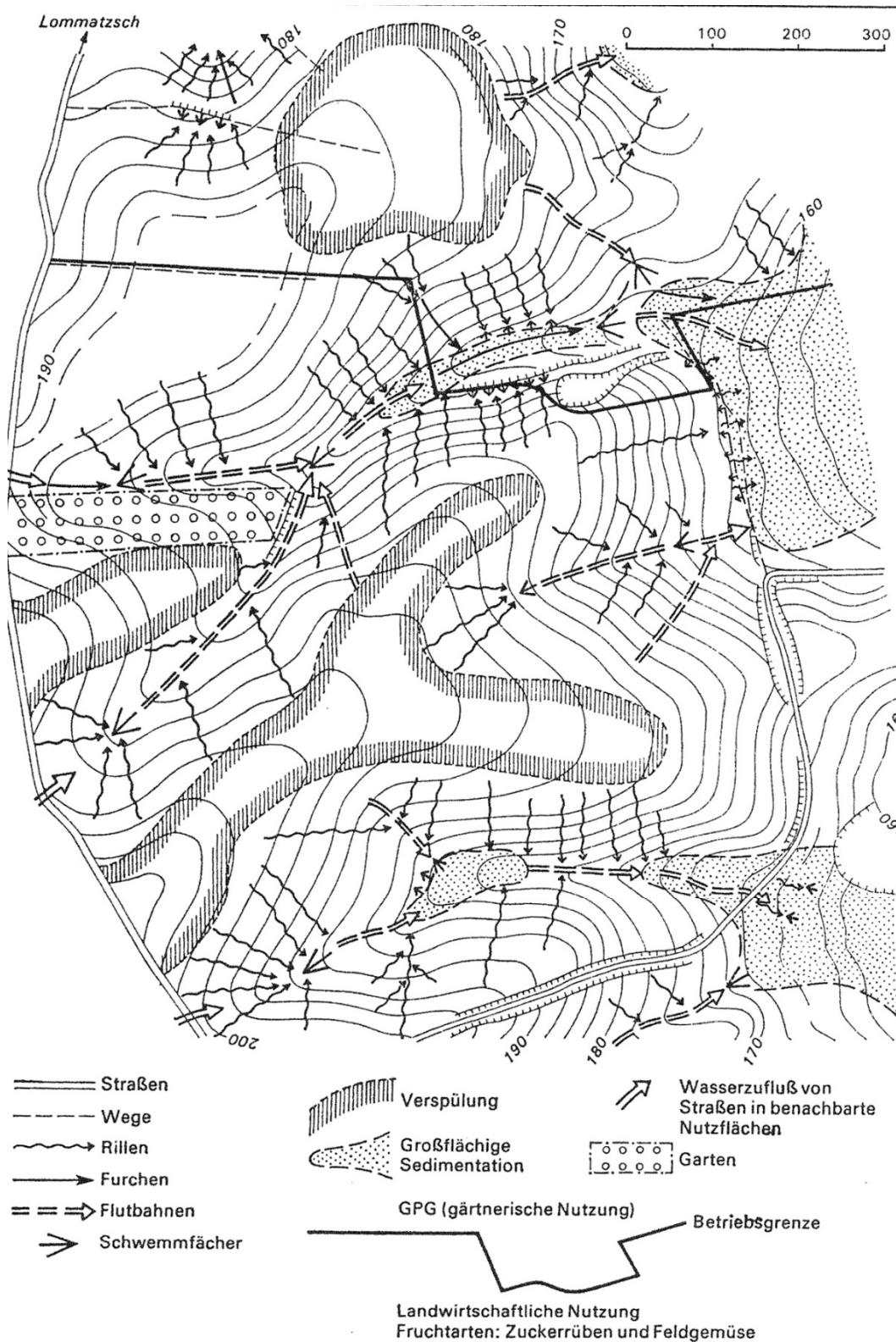


Abb. 99 Erosionsspurenmuster zwischen Leuben und Eulitz im Sommer 1977 (nach Kramer 1981)

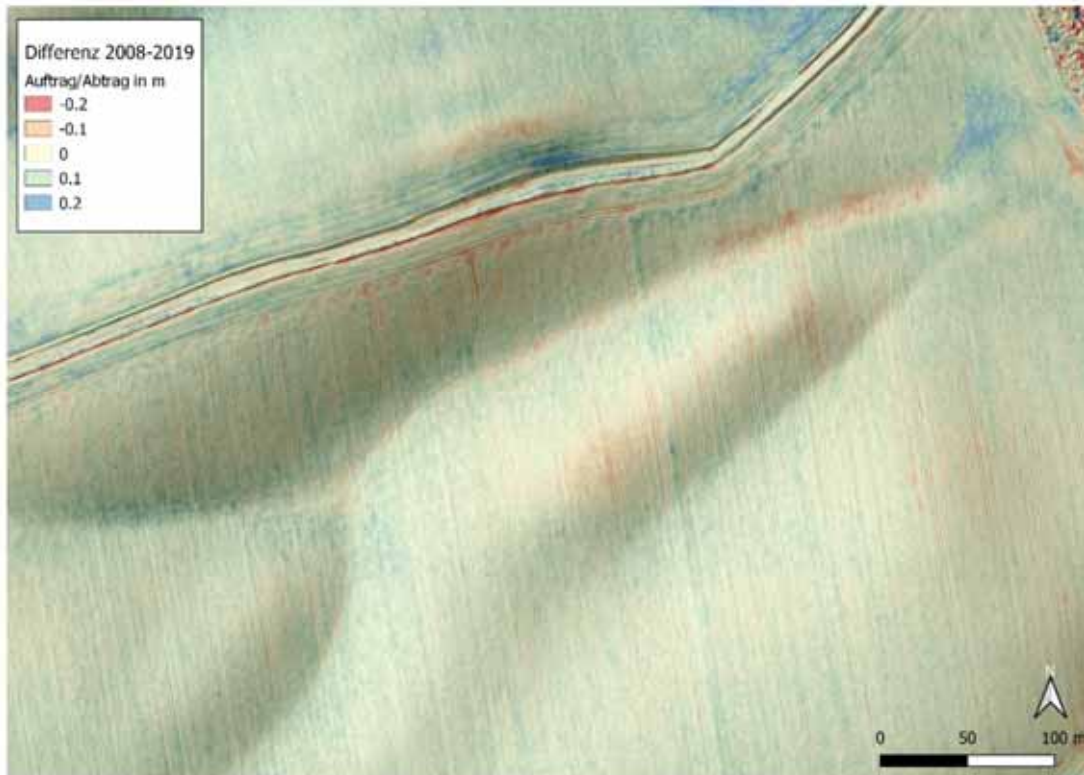


Abb. 100 Differenzberechnung der Höhenmodelle von 2008 und 2018 im Gebiet Leuben.



Abb. 101 Bereiche mit Abtrag von mehr als 0.1 m. Überlagerung mit Orthofoto für den Vergleich mit sichtbar erodiertem Oberboden.

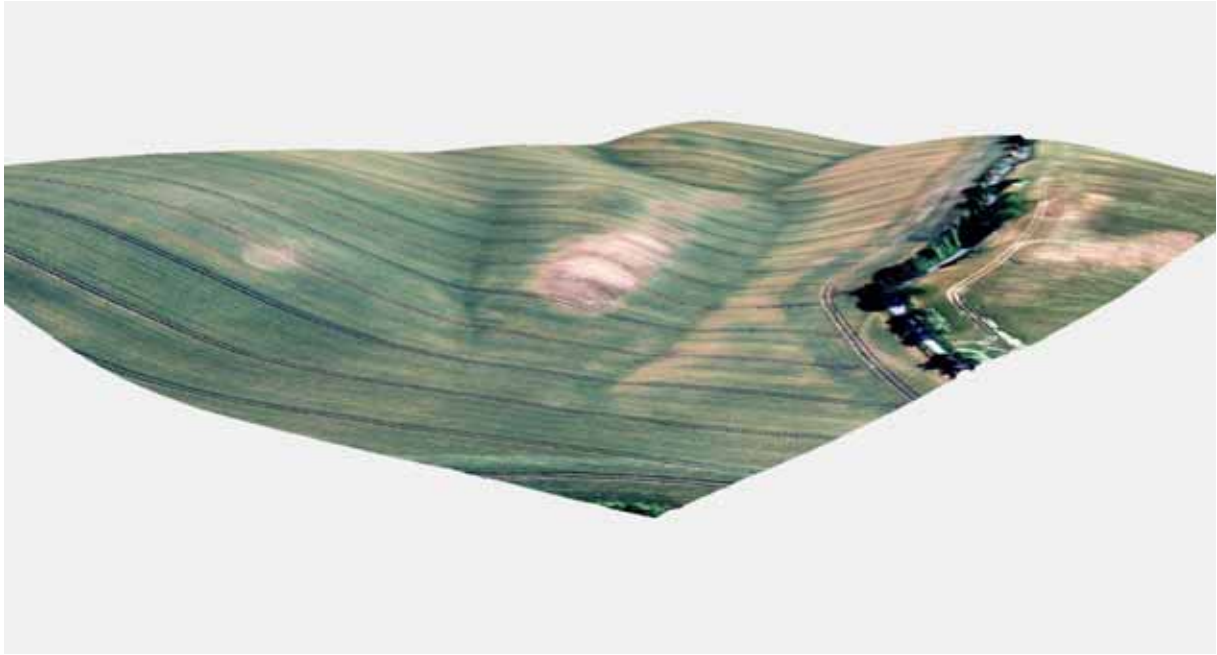


Abb. 102 Leuben - dem Höhenmodell von 2018 angeglichenes Orthofoto mit Blick von Nordosten.

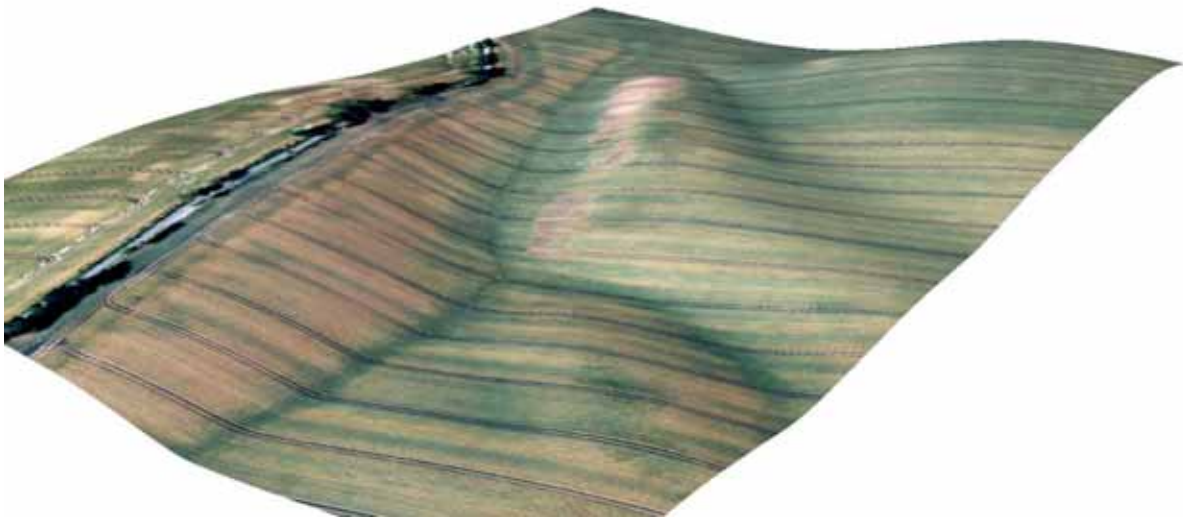


Abb. 103 Leuben - dem Höhenmodell von 2018 angeglichenes Orthofoto mit Blick von Südwesten.

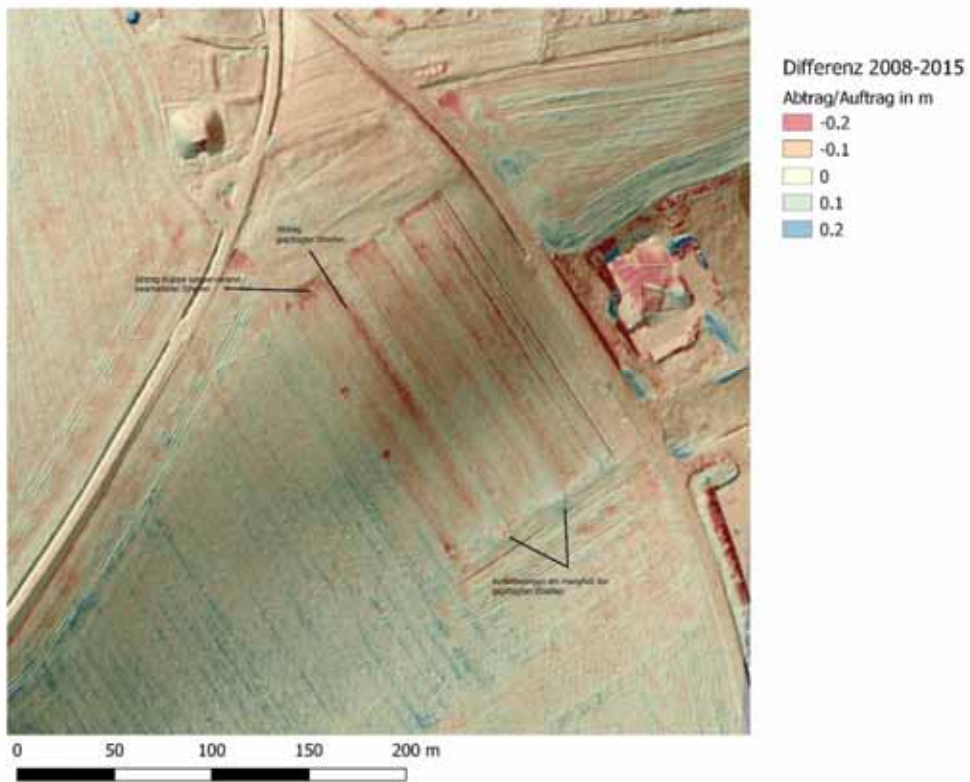


Abb. 104 Methau, LfULG-Versuchsfläche, unkalibrierte Differenzmessung.

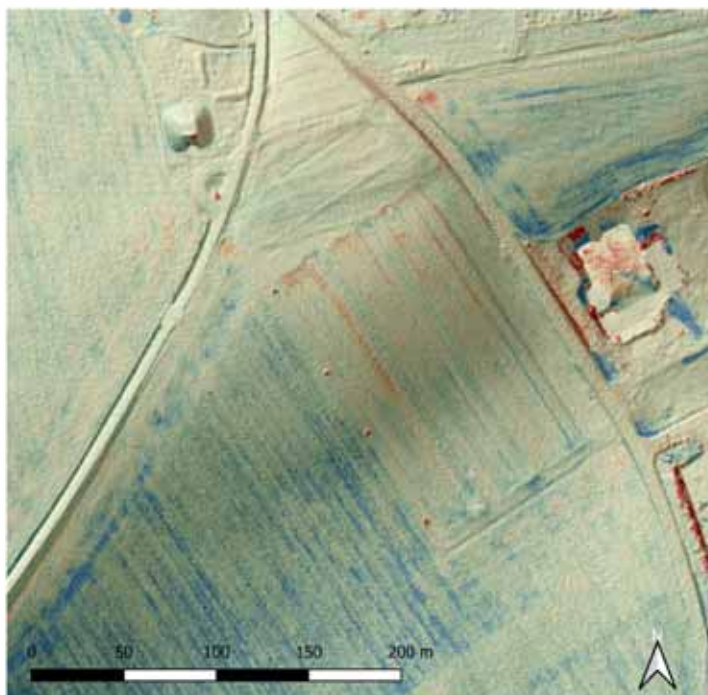


Abb. 105 Methau, LfULG-Versuchsfläche, korrigierte Differenzmessung.

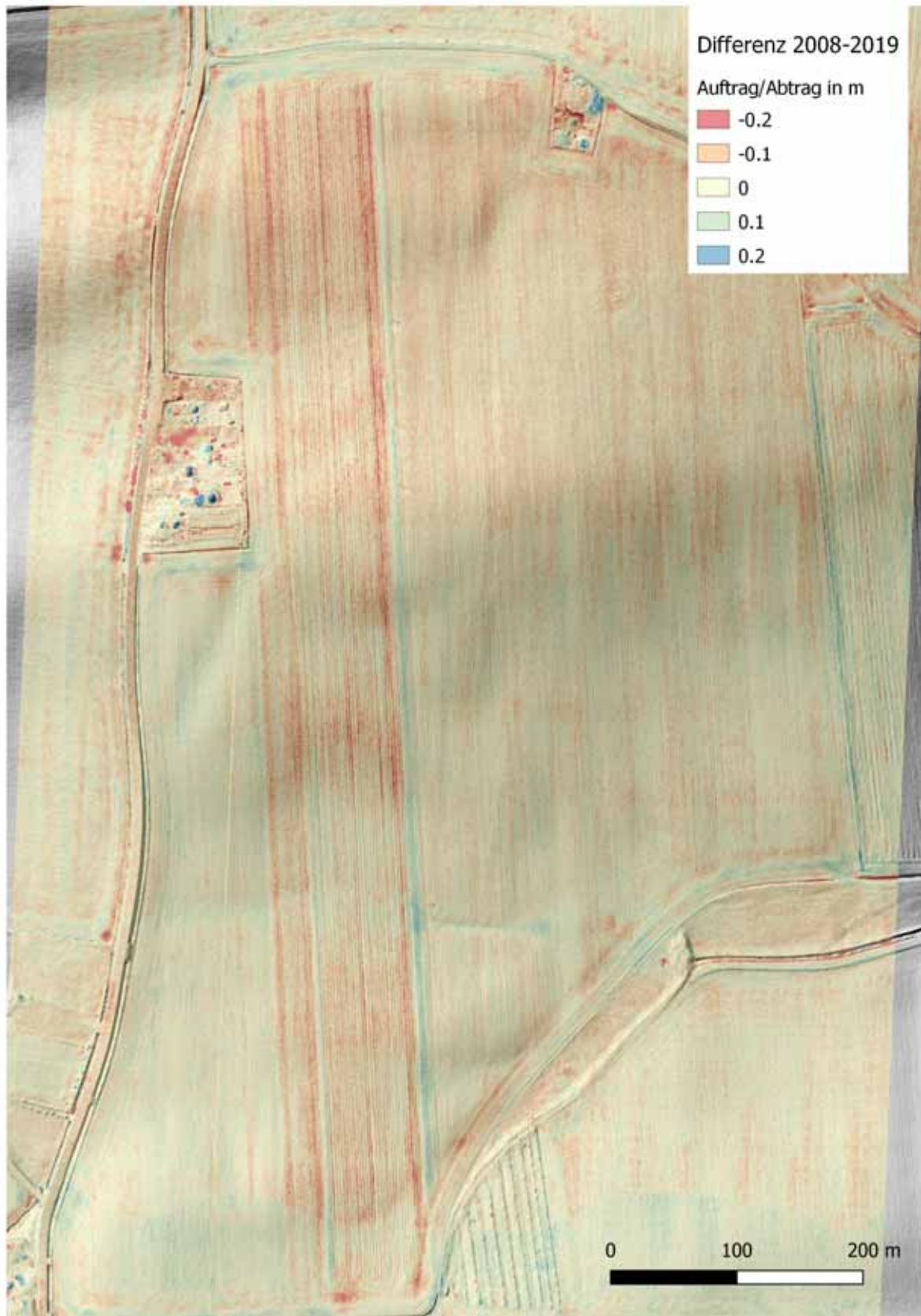


Abb. 106 Lüttewitz, LfULG-Versuchsflächen.



Differenz 2006-2015

Abtrag/Auftrag in m

- 0.2
- 0.1
- 0
- 0.1
- 0.2

Abb. 107 Waldenburg, Vergleich von Feldflächen: Direktsaatverfahren – konventionelle Bestellung.

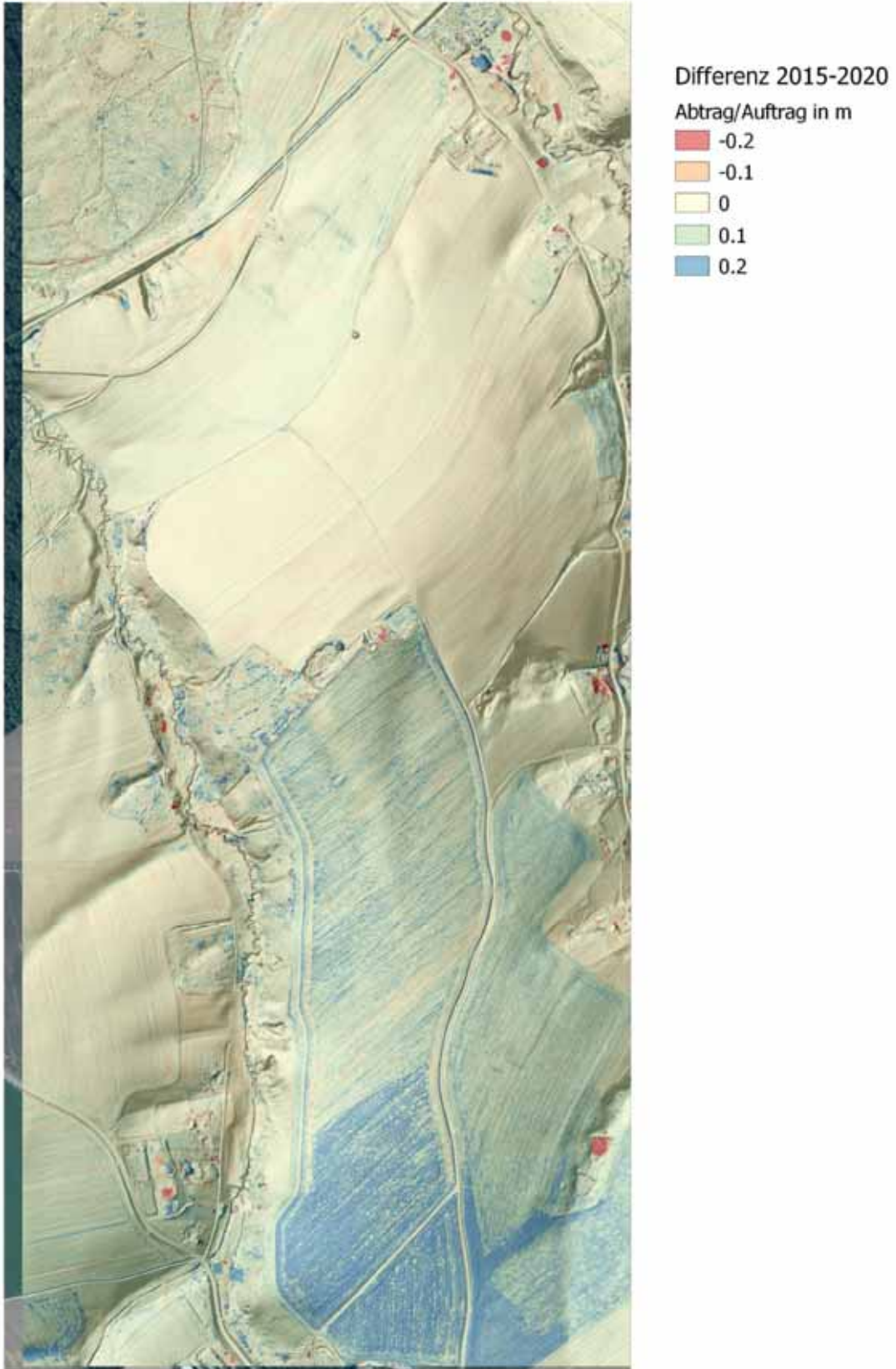


Abb. 108 Waldenburg, Vergleich von Feldflächen: Direktsaatverfahren – konventionelle Bestellung.

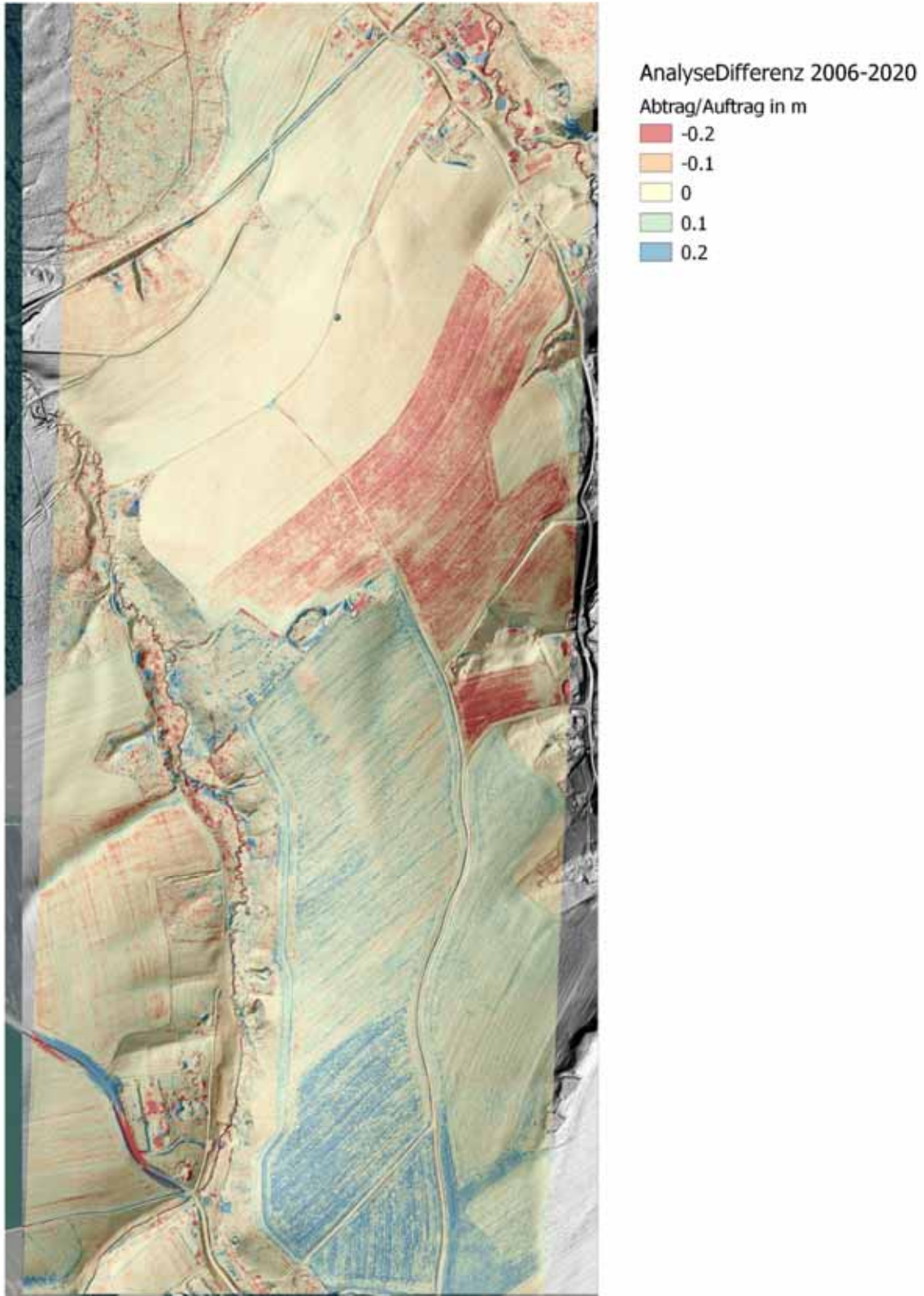


Abb. 109 Waldenburg: Vergleich von Feldflächen: Direktsaatverfahren – konventionelle Bestellung.

Tabella 1: Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hangneigung und Regenerosität (K^*S^*R -Faktor), % = Flächenanteile (5m-Rasterzellen) bezogen auf Gesamtfläche von Sachsen, land-wirtschaftlich genutzte Fläche (LN) und Ackerland (AL)

Stufe Code	Wert aus K^*S^*R	% von Sachsen	% von LN	% von AL	Einstufung DIN19708	Einstufung Cross Compliance
1	<2,5	19	17	17	1= sehr geringe	
2	2,5 - <5	11	12	13	2= geringe	
3	5 - <7,5	7	8	8	3 =mittlere	
4	7,5 - <15	16	17	17	4 = hohe	
5	15 - <27,5	18	20	22	5 = sehr hohe	CC _{Wasser1}
6	27,5 - <65	20	21	20	6 = extrem hoch	CC _{Wasser2}
7	>=65	9	6	3		

Abb. 110 Erosionsgefährdungsstufen.

Tabella 2: Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hanglänge, Hangneigung und Regen-erosivität ($K^*L^*S^*R$ -Faktor), % = Flächenanteile (5m-Rasterzellen) bezogen auf landwirtschaftlich genutzte Fläche (LN) und Ackerland (AL)

Stufe Code	Wert aus $K^*L^*S^*R$ $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$	% von LN	% von AL
1	<5	26	27
2	5 - <10	11	12
3	10 - <15	7	8
4	15 - <30	16	16
5	30 - <55	16	16
6	55 - <130	17	16
7	>=130	7	5

Abb. 111 Erosionsgefährdungsstufen.

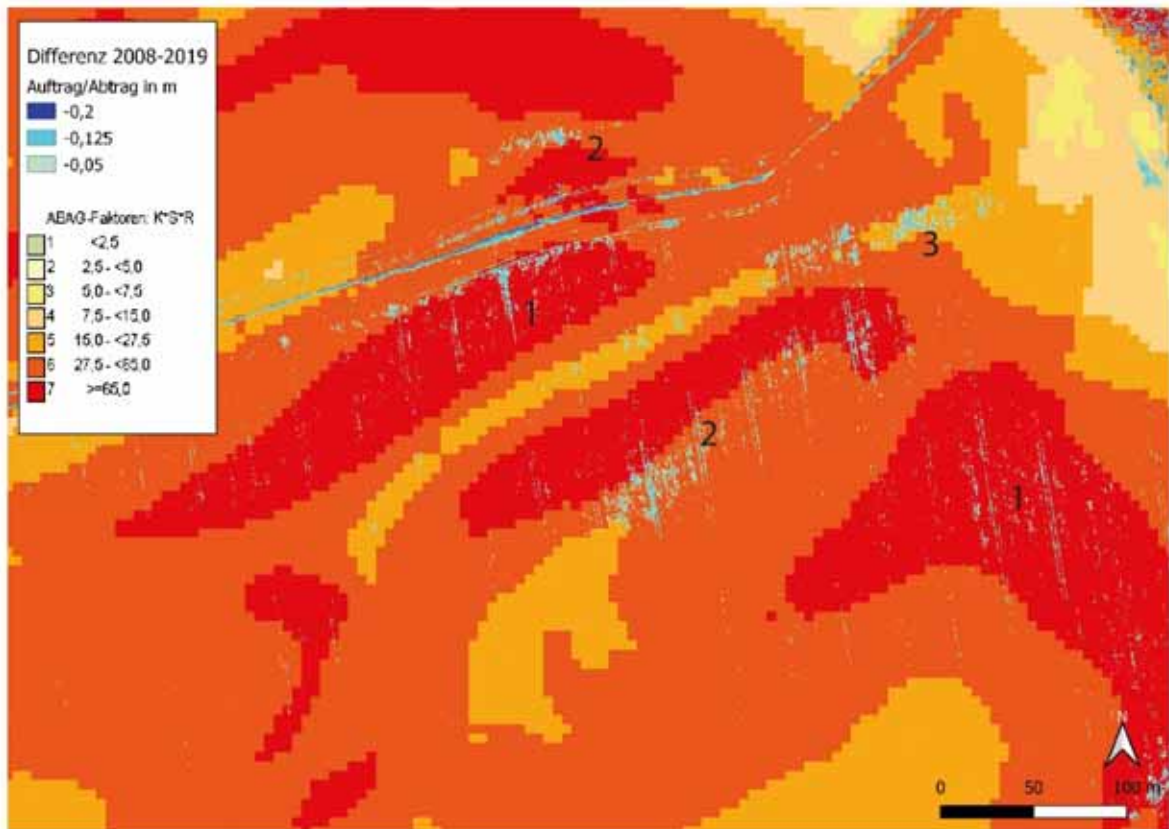


Abb. 112 Leuben, KSR-M und potentieller tatsächlicher Abtrag.

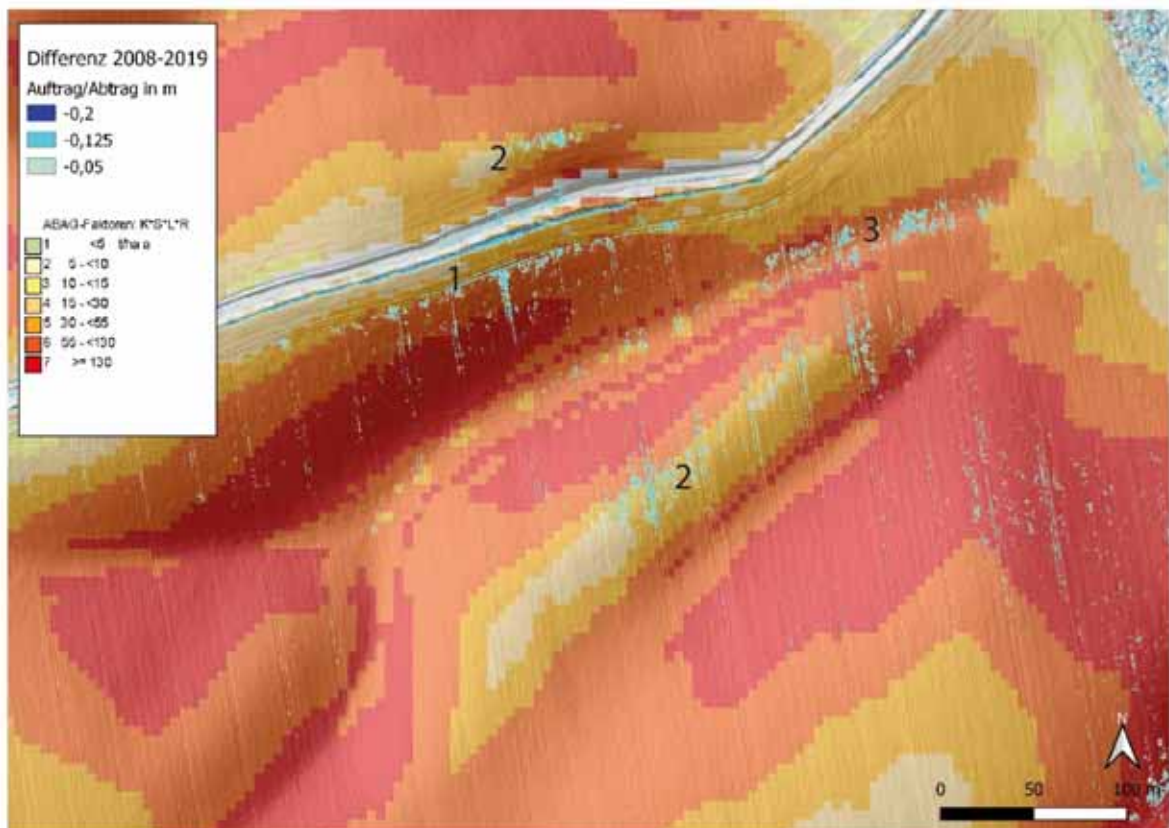


Abb. 113 Leuben, KLSR-M und potentieller tatsächlicher Abtrag.

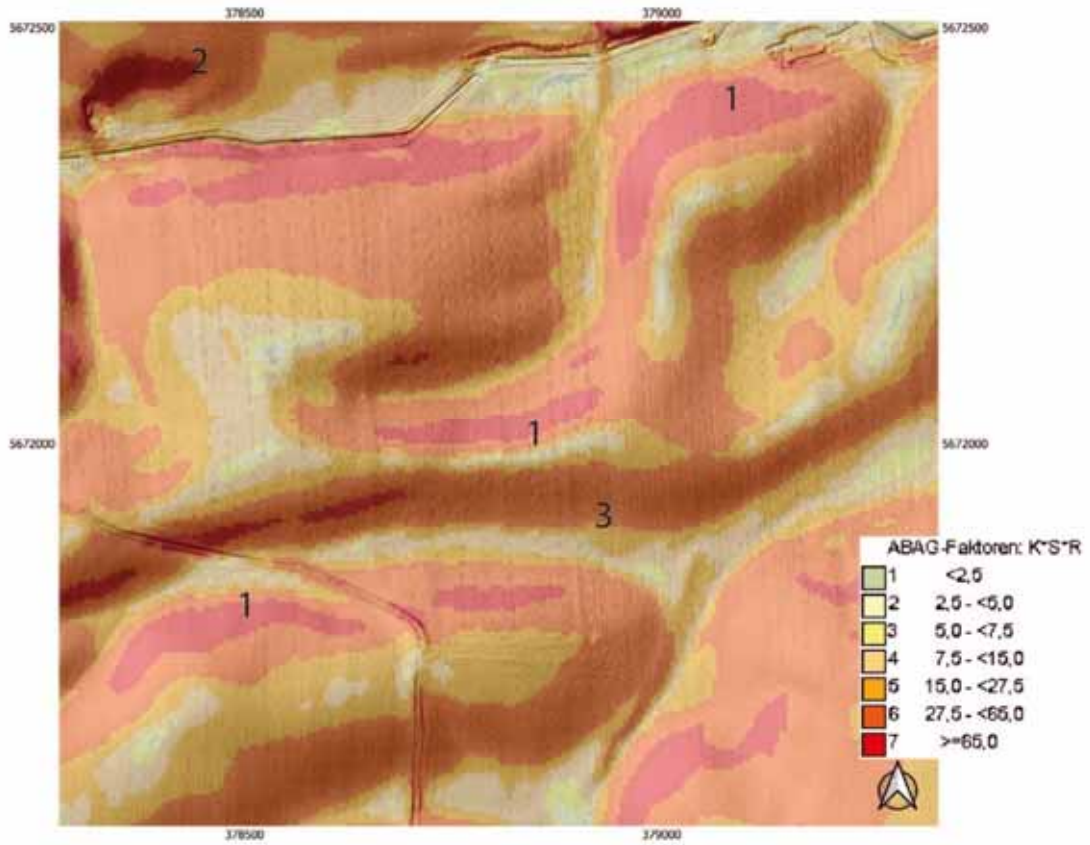


Abb. 114 Pitschütz, KSR-M und Relief.

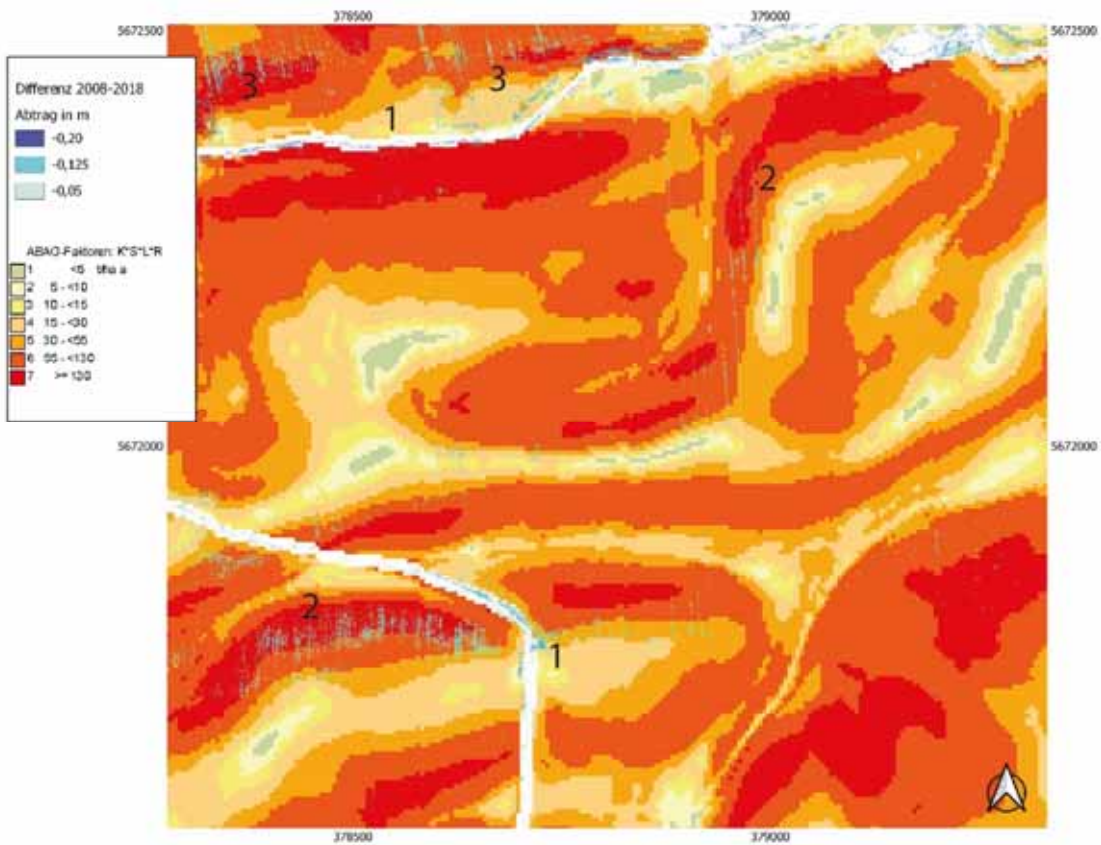


Abb. 115 Pitschütz, KSLR-M und tatsächlicher Abtrag.

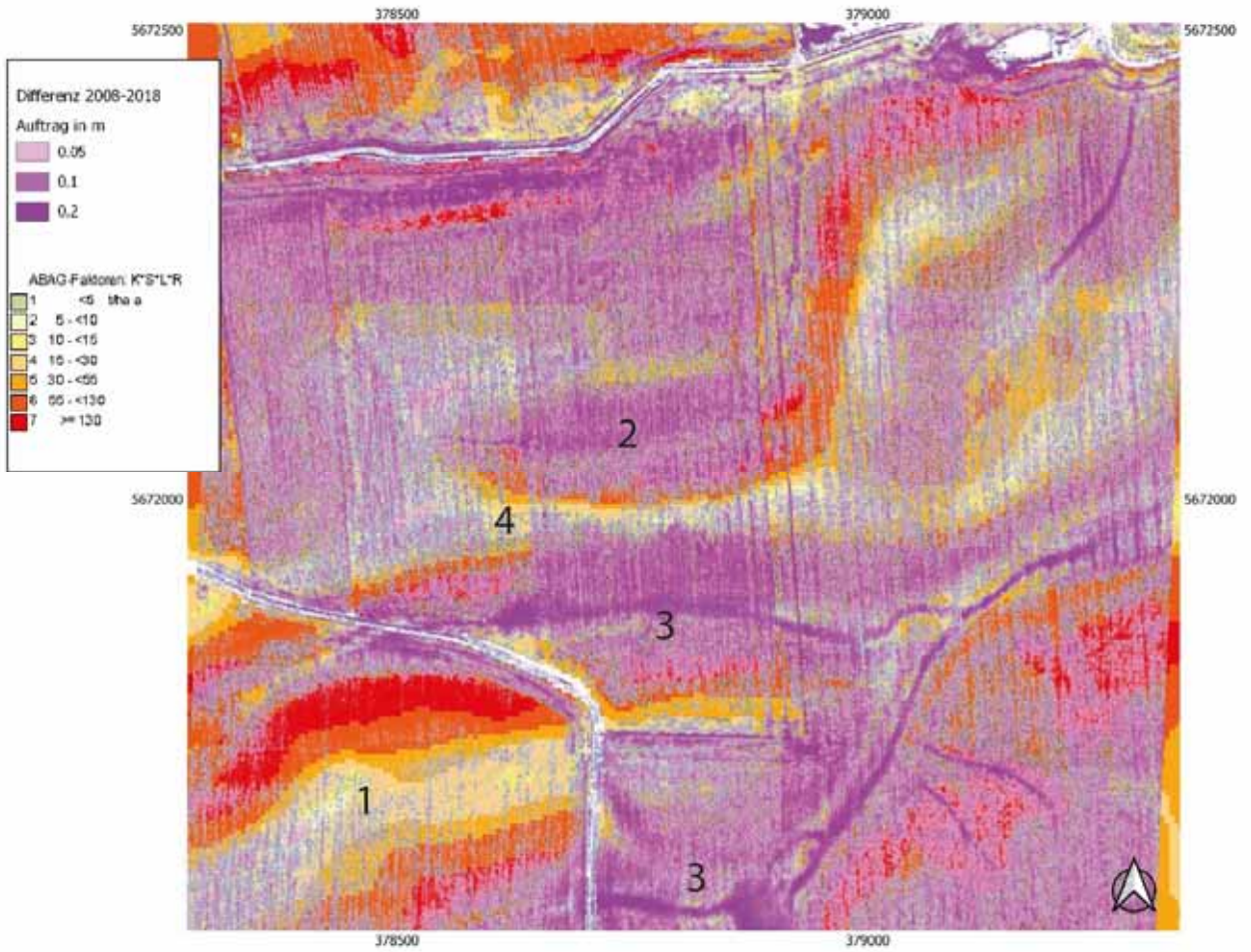


Abb. 116 Pitschütz, KSLR-M-und Auftrag.



Abb. 117 Ausschnitt aus der Karte des Thüneninstituts zur Landnutzung in der Agrarlandschaft im Untersuchungsgebiet von Pitschütz mit Legende.



Abb. 118 Der Tanzberg von Piskowitz/Prositz von Westen. Auf der Kuppe lag ein ausgedehntes Gräberfeld. Die heterogenen Bodenverhältnisse lassen sich allein am unterschiedlichen Maisaufwuchs ablesen.



Abb. 119 Untersuchungsgebiet Pitschütz im Orthophoto von 2018. In dem trockenen Sommer entwickelten sich Standortheterogenitäten und Bewuchsmerkmale, z. B. in kolluvial gefüllten Rinnen und Dellen, die gewöhnlich nicht in diesem Ausmaß sichtbar werden. Eingetragen sind die Fruchtarten nach der Karte des Thüneninstituts zur Landnutzung in der Agrarlandschaft (WW: Winterweizen, WG: Wintergerste, ZR: Zuckerrüben, LEG: Leguminosen, vermutlich Erbsen, WR: Winterraps).

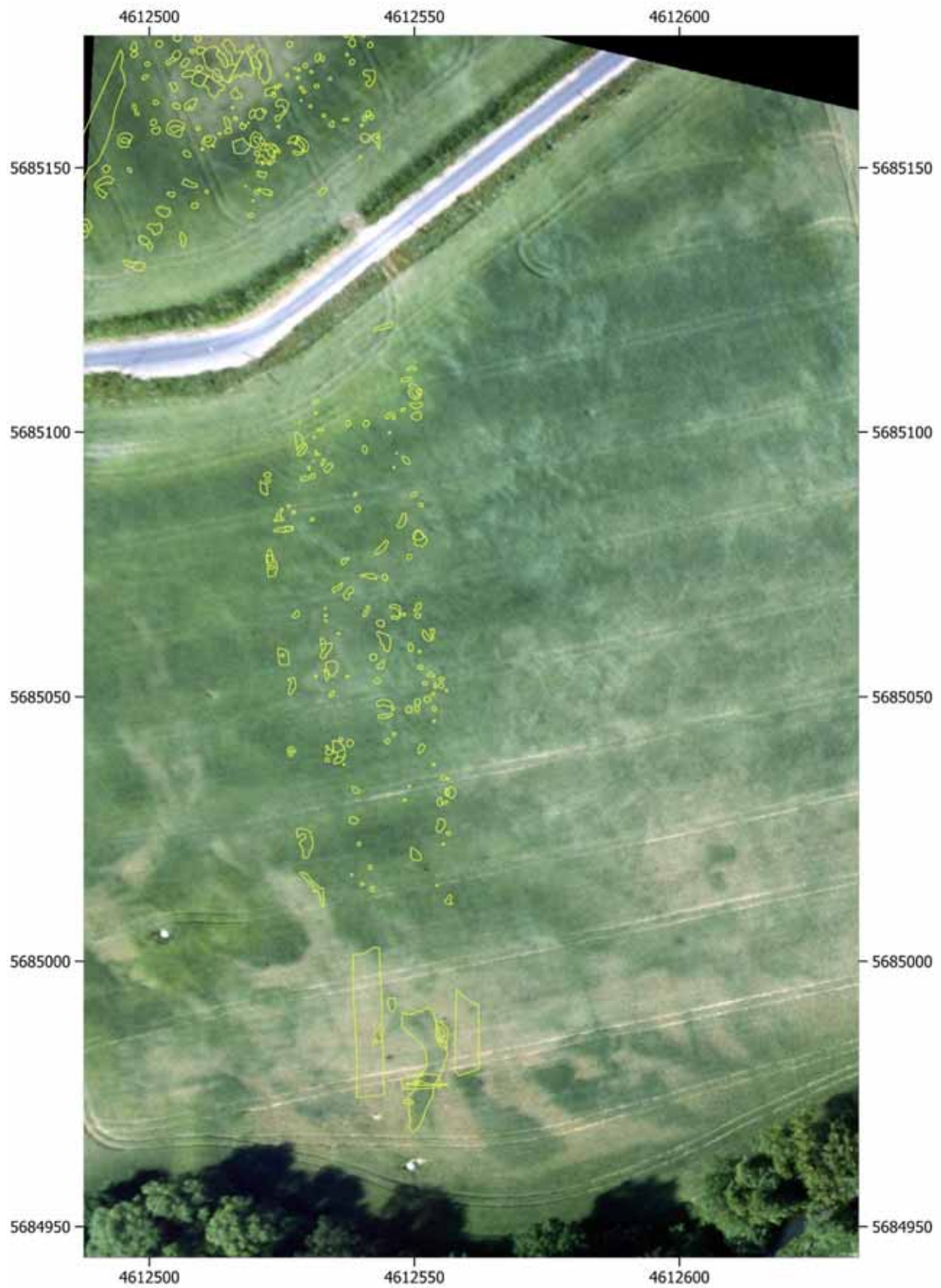


Abb. 120 Überlagerung von entzerrtem Luftbild (1998) und tatsächlich untersuchten Grabungsbefunden.

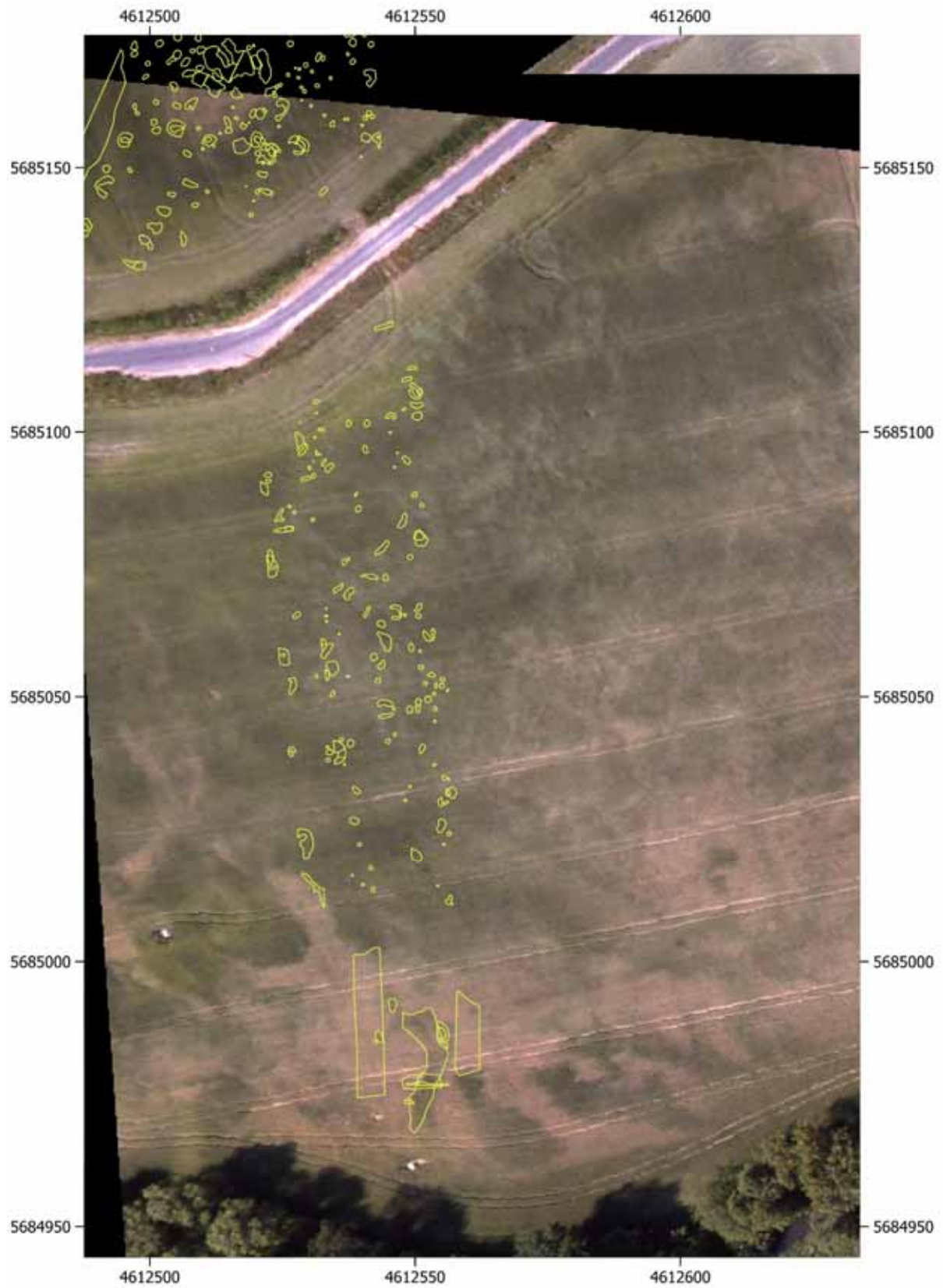


Abb. 121 Überlagerung von entzerrtem Luftbild (1998) und tatsächlich untersuchten Grabungsbefunden.

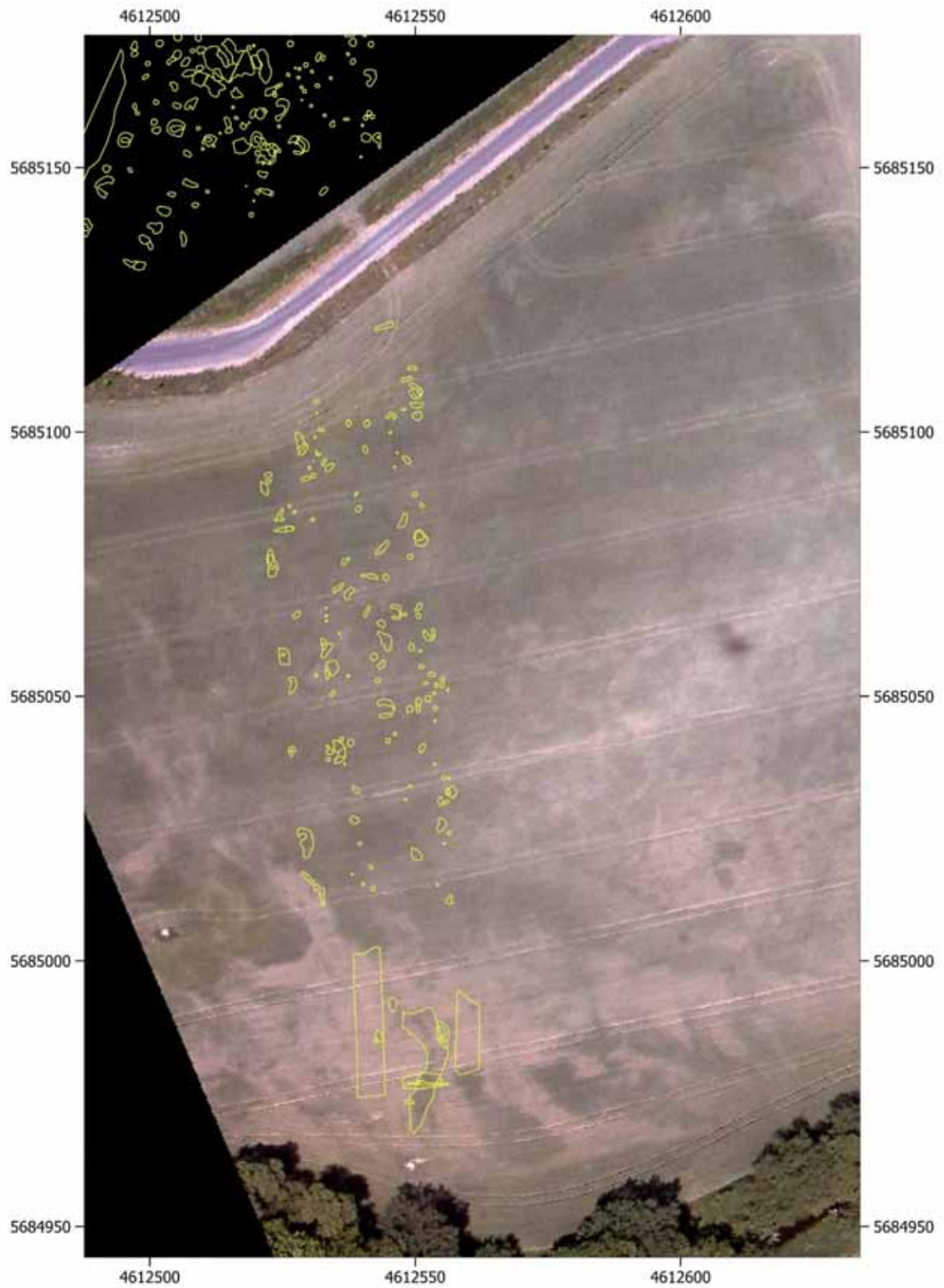


Abb. 122 Überlagerung von entzerrtem Luftbild (1998) und tatsächlich untersuchten Grabungsbefunden.