Vorstudie
zur Identifikation und Einordnung von historischen Lehmbauteilen für die Wiederverwendung hinsichtlich der Anreicherung von Schadstoffen und bauschädlichen Salzen

WIR!-BÜNDNIS GOLEHM
INITIATIVE FÜR LEHMBAU UND NACHHALTIGE KREISLAUFWIRTSCHAFT

Golehm-HistRCL

FKZ 03WIR5704

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

ZRS

Simon Alexander Schröder,

Dr. Ute Kalbe,

Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert

IMPRESSUM

Projektnehmer

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Dr. Ute Kalbe, BAM FB 4.3, Projektleitung
Simon Schröder, BAM FB 4.3, Projektmitarbeiter
Dr. Ina Stephan, BAM FB 4.1, Mikrobiologie
Dr. Matthias Richter, BAM FB 1.4; Dr. Wolfgang Horn, BAM FB 4.5, Luftschadstoffe
Antje Bollwahn, Bianca Coesfeld, Maren Riedel, BAM 4.3, Pr.-vorbereitung, Analytik

Projektpartner

Bauschädliche Salze
Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert, Gloria Hohmann
ZRS Ingenieure GmbH (kurz ZRS oder ZRSI)
Schlesische Straße 26, 10997 Berlin

Mikrobiologie
Prof. Dr. habil. Matthias Noll, Katharina Trunzer
Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg
Fakultät Angewandte Naturwissenschaften
Friedrich-Streib-Str. 2, 96450 Coburg

Förderkennzeichen 03WIR5704
Laufzeit: 01.11.2022 – 31.01.2024 (kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis 30.04.2024)
Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
Projektträger Jülich (PtJ), Frauke Lönnecker, Dr. Bernd Demuth

Projektkoordination

Prof. Dr. Franziska Knoll, Dr. Norma Henkel, Cedric Polzin
WIR!-Bündnis GOLEHM – Initiative für Lehmbau und nachhaltige Kreislaufwirtschaft
Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt
- Landesmuseum für Vorgeschichte -
Richard-Wagner-Straße 9, 06114 Halle (Saale)

Kontakt

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Dr. Ute Kalbe
4.3 Fachbereich Schadstofftransfer und Umwelttechnologien
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

ute.kalbe@bam.de

Kurzbeschreibung

Lehmbaustoffe, einschließlich Lehm aus dem historischen Baubestand, bieten ein hohes Potenzial für ihre Wiederverwendbarkeit und die Schonung natürlicher Ressourcen. Zur Bewertung des Wiederverwendungspotenzials gibt es bisher nur wenige Studien hinsichtlich der Schadstoffbelastung und der Anreicherung von Salzen in Gebäuden aus dem historischen Bestand.

Tonminerale, die in Lehmbaustoffen als Bindemittel fungieren, können auch Schadstoffe binden. Die Region Mitteldeutschland ist geprägt durch jahrzehntelange Einwirkung erheblicher Schadstoffemissionen aus der Chemie- und Braunkohleindustrie. Auch durch spezifische Nutzungen akkumulierte Schadstoffe oder aus aufsteigender Feuchte angereicherte bauschädliche Salze können einer Wiederverwendung entgegenstehen.

Ziel des Projektes im Rahmen der WIR!-Initiative GOLEHM ist die Überprüfung der Wiederverwendbarkeit von Lehmbaustoffen aus historischen Bauten hinsichtlich der Umwelt- und Nutzerverträglichkeit. Dafür wurden exemplarisch Wellerlehmgebäude aus dem historischen Bestand mit einer potenziellen Salz-, Schadstoff- oder mikrobiologischen Belastung beprobt und anhand von Wandprofilen in unterschiedlichen Höhen untersucht. Referenzproben zur Ermittlung einer regional möglichen geogenen Hintergrundbelastung der ursprünglichen Ausgangsmaterialien für die Lehmbaustoffe wurden bei Verfügbarkeit berücksichtigt. Um die Eignung für die Nutzung in Innenräumen zu bewerten, wurde der mögliche Übergang von flüchtigen organischen Verbindungen in die Luft mit Hilfe von Emissionsprüfkammern analysiert.

Die Vorstudie ergab anhand der gezielt ausgewählten Objekte, dass selbst in der unmittelbaren Umgebung ehemaliger Industrieregionen wie Bitterfeld-Wolfen keine bedenklichen Anreicherungen von Schadstoffen in Lehmbaustoffen nachgewiesen werden können, die einer Wiederverwertung der Baustoffe entgegenstehen. Nur in einem Fall gab es eine nutzungsbedingte, oberflächliche Anreicherung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) durch extreme Einwirkung von Rauchgasen (Schwarzküche), die vor einem Rückbau gut erkennbar und separierbar wäre. Bei einigen beprobten Objekten wurden teilweise erhöhte Schwermetallgehalte detektiert, welche durch Hintergrundgehalte des verwendeten Baulehms zu erklären sind.

Es wurden keine leicht flüchtigen Stoffe in bedeutendem Ausmaß identifiziert, so dass gesundheitsschädliche Einflüsse auf die Innenraumluft nicht zu erwarten sind.

An den beprobten Wellerlehmwänden konnten keine deutlich sichtbaren Bauschäden ausgemacht werden. Dennoch wurden bauschädliche Salze teilweise in Gehalten über den Grenzwerten für Lehmbaustoffe gefunden, die sich im Inneren der Wände aufkonzentriert hatten. Da Grenzwerte für Wellerlehm nicht reguliert sind, wurden Festlegungen aus den Normen für Lehmbaustoffe (DIN 18945 bis 18947) herangezogen. Schlussfolgerungen und praktische Empfehlungen für die Wiederverwertung wurden nach zukünftigen Nutzungskategorien abgeleitet.

Die Machbarkeit des erneuten Einsatzes von Lehmbaustoffen aus dem historischen Gebäudebestand hat sich anhand der untersuchten Beispielobjekte bestätigt. Durch die Ergebnisse kann ein wesentlicher Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen und zu einer nachhaltigen und geschlossenen Kreislaufwirtschaft geleistet werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 12

1.1 Hintergrund 12

1.2 Problem- und Zielstellung 13

1.3 Fachlicher Kenntnisstand 15

1.3.1 Schadstoffquellen und Eintragspfade 15

1.3.2 Sorption, Mobilität und Abbau von Schadstoffen in Lehmbauteilen 17

1.3.3 Mechanismen der Einwirkung von Feuchte auf Lehmbaustoffe 19

1.3.4 Verhalten und Wirkung bauschädlicher Salze in Lehmbaustoffen 20

1.4 Bewertungsgrundlagen 23

2 Objektauswahl 25

2.1 Probenbeschreibung 26

2.2 Objekte A (Scheune) und B (Backhaus) in Pouch 27

2.3 Objekt C (Gaststätte) in Halle 29

2.4 Objekte D (Utzberger Hof) und E (Haus Abtsbessingen) in Hohenfelden 30

2.5 Objekt F (Scheune) in Schleberoda 32

3 Ergebnisse und Diskussion 33

3.1 Bodenparameter 33

3.2 Anorganische Schadstoffe 33

3.2.1 Zielstellung und Probenumfang 33

3.2.2 Bewertungsmaßstäbe, regulative und gesundheitsrelevante Einordnung 34

3.2.3 Ergebnisse 35

3.2.3.1 Erhöhte Cu- und Co-Konzentrationen in Objekt A 36

3.2.3.2 Erhöhte Cr-, Ni- und Cu-Konzentrationen in Objekt D 37

3.2.3.3 Einfluss von externen Quellen auf die As, Zn, Pb und Cu Akkumulation 38

3.2.3.4 Bewertung der RFA-Ergebnisse für Sb, Tl, Hg, Cd 39

3.3 Bauschädliche Salze (ZRS) 39

3.3.1 Zielstellung und Probenumfang 39

3.3.2 Bewertung der Ergebnisse nach WTA-Merkblatt 39

3.3.3 Bewertung der Rezyklierbarkeit 44

3.4 Organische Schadstoffe 48

3.4.1 Zielstellung und Probenumfang 48
3.4.2 Ergebnisse GC-MS Screening 49
3.4.3 Ergebnisse der PAK-Quantifizierung mittels GC-MS 51
3.4.4 Ergebnisse Phthalatquantifizierung 55
3.4.5 Regulative und gesundheitsrelevante Einordnung 57

3.5 Luftschadstoffe 58

3.5.1 Zielstellung und Probenumfang 58
3.5.2 Ergebnisse 59
3.5.3 Regulative und gesundheitsrelevante Einordnung 60

3.6 Mikrobiologische Untersuchungen ausgewählter Proben auf die Besiedelung mit Pilzen 60

3.6.1 Zielstellung und Probenumfang 60
3.6.1.1 Bestimmung der Pilzgattung durch molekularbiologische Analysen 61
3.6.1.2 Gesundheitsrelevante Einstufung der Sequenzierergebnisse 61
3.6.2 Ergebnisse 61
3.6.2.1 Anzahl an Genkopien 61
3.6.2.2 Zuordnung bestimmter Pilzgattungen zu einer Risikogruppe 63
3.6.3 Hinweise zu gesundheitsschutzrelevanten Aspekten und Forschungsbedarf 65

4 Schlussfolgerungen und Transfer der Ergebnisse 68

4.1 Schlussfolgerungen 68

4.2 Ergebnistransfer 73

4.3 Weiterer Forschungsbedarf 73

5 Material und Methoden 74

5.1 Probenahme 74

5.1.1 Lehmwellerwände 74
5.1.2 Bodenproben 74

5.2 Probenaufbereitung Lehmproben 74

5.3 Feststoffanalytik 75

5.3.1 Bodenparameter 75
5.3.1.1 Feuchte 75
5.3.1.2 pH-Wert und Leitfähigkeit 76
5.3.1.3 Korndichte 76
5.3.1.4 Glühverlust 76
5.3.2 Chemische Elemente: Röntgenfluoreszenzanalyse 76

5.3.3 Kationen: Königswasseraufschluss zur anschließenden Messung mittels ICP 77
5.3.4 Anionen: Photometrie (ZRS) 77
5.3.5 Organische Substanzen 77
5.3.5.1 Screening mittels GC-MS 77
5.3.5.2 Quantifizierung von PAK mittels GC-MS 78
5.3.5.3 Quantifizierung der Phthalate mittels GC-MS 79

5.4 Luftschadstoffe 80
5.4.1 Emissionsprüfkammer 80
5.4.2 GC-MS Untersuchungen 81

5.5 Mikrobiologische Untersuchungen 81
5.5.1 Aufschluss und Nukleinsäure-Extraktion der Proben 81
5.5.2 Analyse der Probenextrakte mittels ITS basierter qPCR 82
5.5.3 Quantifizierung der pilzlichen Genkopienanzahl mittels qPCR und mit einem *Fusarium solani* Standard 82
5.5.4 ITS Gen basierte Sequenzierung und Auswertung der Sequenzrohdaten 83
5.5.5 Einstufung von Pilzen in Risikogruppen 84

6 Tabellarische Übersichten der Messergebnisse 86

6.1 Probenübersicht und Untersuchungsumfang 86

6.2 Feststoffgehalte Elemente 88

6.3 Ergebnisse organisches Screening mit GC-MS 91

6.4 Übersicht untersuchte PAK und ermittelte Feststoffgehalte 93

7 Quellenverzeichnis 97

8 Anlagen 102

8.1 Erläuterung zur Probennummerierung 102

8.2 Übersetzungsschlüssel für die Probennummern bei den Projektpartnern 103

8.3 Ergebnisse der Untersuchungen ZRS Ingenieure 105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geochemische Übersichtskarte der Oberböden von Sachsen für Kupfer [13]. 16

Abbildung 2: Übersichtskarte der beprobten Objekte. 25

Abbildung 3: Objekt A (Scheune Pouch); (a) Außenansicht der östlichen Fassade, (b) Innenansicht der Wand zu Profil A-1 nach Beprobung. 28

Abbildung 4: Objekt B (Backhaus Pouch); (a) Außenansicht der südlichen Fassade, (b) Innenansicht der Wand zu Profil B-1 nach Beprobung und Verputzung. 29

Abbildung 5: Objekt C (Gasthaus Halle); (a) Außenansicht der süd-westlichen Fassade und Wand zu Profil C-2; (b) Innenansicht der Wand zu Profil C-2 nach Beprobung. 30

Abbildung 6: Objekt D (Utzberger Haus); (a) Außenansicht der südlichen Fassade, (b) Innenansicht der Wand zu Profil D-1 vor Beprobung. 31

Abbildung 7: Objekt E (Haus aus Abtsbessingen); (a) Außenansicht der östlichen Fassade und Wand zu Profil E-1, (b) Innenansicht der Wand zu Profil E-1 vor Beprobung. 32

Abbildung 8: Objekt F (Bewohnter Stall in Schleberoda); (a) Außenansicht der südlichen Fassade, (b) Innenansicht der Wand zu Profil F-1 vor Beprobung. 32

Abbildung 9: GC-MS-Chromatogramm zu Probe E-1-1-5. Die einzelnen Peaks entsprechen den detektierten organischen Substanzen im DCM-Extrakt. 50

Abbildung 10: GC-MS-Chromatogramm zu Probe D-1-5-2. Die einzelnen Peaks entsprechen den detektierten organischen Substanzen im DCM-Extrakt. 50

Abbildung 11: Gemittelte Feststoffanteile der PAK_{16} für Profil D-1 (Abkürzungen s. Tabelle 23). 53

Abbildung 12: Vergleich der gemittelten Feststoffanteile nieder- und höhermolekularer PAK_{16} für Lehmproben Profil D-1, Bodenproben Objekt D und Hintergrundwerte für Oberböden in Sachsen-Anhalt [31]. 54

Abbildung 13: Vergleich der gemittelten Feststoffanteile niedrig- und höhermolekularer PAK_{16} mit zunehmender Wandtiefe für Horizont D-1-5. 54

Abbildung 14: Vergleich der gemittelten Feststoffanteile der PAK_{16} eingeteilt nach Toxizitätsäquivalentfaktor (TEF, s. Tabelle 23) für Lehmproben Profil D-1, Bodenproben Objekt D und Hintergrundwerte für Oberböden in Sachsen-Anhalt [31, 44]. 55

Abbildung 15: Lehmwandproben in Glaspetrischalen. 80

Abbildung 16: Mikrokammer bestückt mit zwei Lehmwandproben. 80

Abbildung 17: Mikrokammer mit 6 parallelen Kammern. 81

Abbildung 18: Probenahme an der Mikrokammer mit Tenax® TA-Rohren. 81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Quellen von Anionen bauschädlicher Salze..... 22

Tabelle 2: Bewertungsstufen verschiedener schadensverursachenden Anionen nach WTA-Merkblatt [25]. 24

Tabelle 3: Zulässige Mengen von verschiedenen schadensverursachenden Salzen in Lehmbaustoffen nach DIN 18945 – 47 [22-24]. 24

Tabelle 4: Übersicht und Informationen zu den beprobten Objekten. 26

Tabelle 5: Auflistung von Referenzwerten und Bewertungskriterien in Form von Feststoffgehalten in mg/kg.... 34

Tabelle 6: Profildarstellung der Cu-Feststoffgehalte für Profil A-1 in mg/kg. Bestimmt mittels ICP-OES nach Königswasseraufschluss. 37

Tabelle 7: Profildarstellung der Cr-Feststoffgehalte für Profil D-1 in mg/kg. Bestimmt mittels RFA. 38

Tabelle 8: Profildarstellung der Ni-Feststoffgehalte für Profil D-1 in mg/kg. Bestimmt mittels RFA. 38

Tabelle 9: Profildarstellung der Gesamtkonzentration der PAK_{16}-Feststoffgehalte für Profil D-1 in mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard). 52

Tabelle 10: Profildarstellung der Gesamtkonzentration der PAK_{16}-Feststoffgehalte für Profil B-1 in mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard). 52

Tabelle 11: Auflistung der ermittelten Phthalat-Feststoffgehalte für die Horizonte C-1 und C-2 in mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (DCM-Extrakt, externer Standard). 57

Tabelle 12: Messergebnisse in µg/m³ der Lehmprobenuntersuchung auf Decamethylcyclopentasiloxan (CAS-RN: 541-02-6) der Probenahme in Pouch. 59

Tabelle 13: Messergebnisse in µg/m³ der Lehmprobenuntersuchung auf Octamethylcyclotetrasiloxan (CAS-RN: 556-67-2) der Probenahme in Pouch. 59

*Tabelle 14: Anzahl der nachgewiesenen Genkopien *(Mittelwert aus vier Einzelmessungen). 62*

Tabelle 15: Taxonomische Zuordnung aller detektierten ITS basierten Sequenzierungsergebnisse nach Abundanz der OTU counts. 64

Tabelle 16: Ermittelte Gattungen, die eine Art der Risikogruppe 2 nach TRBA 460 [55] beinhalten. 64

Tabelle 17: Belastung (Summe OTUs) mit Pilzgattungen, die Arten der Risikogruppe 2 enthalten können, in Gegenüberstellung mit anderen Probenparametern. 65

Tabelle 18: Einfache Bewertungskriterien für die Wiederverwendbarkeit von Wellerlehm..... 70

Tabelle 19: Auflistung aller entnommenen Lehmproben und durchgeführten Untersuchungen. 86

Tabelle 20: Auflistung aller Feststoffgehalte in der Mantelverordnung geregelter Elemente mit Gefährdungspotenzial in mg/kg. 88

Tabelle 21: Auflistung der mittels GC-MS-Screening identifizierten Substanzen in Probe E-1-1-5. 91

Tabelle 22: Auflistung der mittels GC-MS-Screening identifizierten Substanzen in Probe D-1-5-2. 92

Tabelle 23: Auflistung der PAK_{16} mit kanzerogenem Potential (Toxizitätsäquivalentfaktor, TEF) im Verhältnis zu BaP. 93

Tabelle 24: Auflistung aller ermittelten Feststoffgehalte der PAK_{16} in entnommenen Proben in mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard). 94

Tabelle 25: Übersetzungsschlüssel für die Probennummern bei der BAM und ZRS 103

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
µCTE	Micro-Chamber/Thermal Extractor
I123P	Indeno(1,2,3-cd)pyren
Ace	Acenaphthen
Acy	Acenaphthylen
Anth	Anthracen
ArbMedVV	Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge
As	Arsen
BaA	Benzo(a)anthracen
BaP	Benzo(a)pyren
BAuA	Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BbF	Benzo(b)fluoranthen
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BG	Bestimmungsgrenze
BghiP	Benzo(ghi)perylen
BkF	Benzo(k)fluoranthen
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CAS-RN	Chemical Abstracts Service – Registry Number
Cd	Cadmium
Chry	Chrysen
Co	Cobalt
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DBahA	Dibenzo(a,h)anthracen
DCM	Dichlormethan (oder auch Methylenchlorid)
DEHP	Bis-(2-ethylhexyl)-phthalat
DIBP	Di-iso-butylphthalat
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DSM	Deutsche Sammlung für Mikroorganismen
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
ECHA	Europäische Chemikalienagentur
Flu	Fluoren
FluA	Fluoranthen
GC-MS	Gaschromatographie-Massenspektrometrie
Hg	Quecksilber
IC, CIC	Ionenaustauschchromatographie, Verbrennungsionenchromatographie
ICP-MS	Massenspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas
ICP-OES	optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas

Abkürzung	Erläuterung
ITS	Internal transcribed spacer (Interner transkribierter Abstandshalter)
KMUs	Kleine und mittlere Unternehmen
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
Na_2SO_4	Natriumsulfat
NaCl	Natriumchlorid
Naph	Naphthalin
Ni	Nickel
NIST	National Institute of Standards and Technology
OKRF oder OKFF	Oberkante ab Rohfussboden oder Fertigfussboden
OKS	Oberkante ab Sockelhöhe
OTU	Operational taxonomic unit (operative taxonomische Einheit)
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
Phen	Phenanthren
PVC	Polyvinylchlorid
Pyr	Pyren
qPCR	Quantitative polymerase chain reaction (quantitative Polymerase-Kettenreaktion)
REACH	Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
rLF	Relative Luftfeuchte
RW	Vorsorgerichtwert für Innenraumluft
Sb	Antimon
SDD	Silizium-Drift-Detektor
TED-GC-MS	Thermoextraktion-Desorption-Gaschromatographie-Massenspektrometrie
TEF	Toxizitätsäquivalentfaktor
Tl	Thallium
t_R	Retentionszeit
TRBA	Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)
WTA	Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege
Zn	Zink

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Der Lehmbau in Mitteldeutschland kann auf eine lange Bautradition zurückblicken, die mit einer Kontinuität an Neubauten bis in die Gegenwart einhergeht. Die hohe Dichte an Bestandsbauten in dieser Region ist dabei weitestgehend geologischen bzw. klimatologischen Faktoren geschuldet: Im Windschatten des Mittelgebirges Harz haben sich über Jahrtausende große Vorkommen an Löss abgelagert, dessen lokale Verfügbarkeit verbunden mit der relativen Trockenheit in der Region, die Attraktivität von Lehm als Baustoff gefördert haben [1]. Hierbei hat sich im Besonderen, unter anderem aufgrund von Jahrhunderten der Holzknappheit das Wellern von Lehm durchgesetzt: Durch das Aufschichten von Lehmschichten und der anschließenden mechanischen Verdichtung dieser, konnten massive Konstruktionen erbaut werden, deren Instandhaltung durch einfache Ausbesserungsarbeiten unter geringem Aufwand gesichert ist [2].

Maßgeblich beeinflusst durch den Ausbau des Mitteldeutschen Braunkohlereviers Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Industrialisierung in dieser Region im besonderen Maße gefördert. Braunkohle als Energieträger aber auch als Ausgangsstoff für ein breites Band industriell gefertigter Produkte förderte die Ansiedlung von chemischer Industrie in der Region, wodurch große chemische Industriezentren wie Leuna und Bitterfeld entstanden [3]. Die Rohstoffverknappung nach dem Zweiten Weltkrieg und die Autokratiebestrebungen der DDR forcierten den Ausbau der chemischen Industriezentren. Damit einhergehend kam es zu einem massiven Eintrag von Schadstoffen in die Umwelt, dem trotz äußerlicher umweltpolitischer Bestrebungen nur wenig Einhalt geboten wurde [4]. Neben der Emittierung von Schadstoffen in die Luft und dem Eintrag in Flüsse wurden Braunkohletagebauten, vor allem in der Region Bitterfeld-Wolfen mit Industrieabfällen verfüllt. Die Erfassung und der Abtrag dieser Altlasten reichen nach dem Fall der Mauer bis in die Gegenwart und die daraus resultierenden Auswirkungen für Mensch und Natur sind noch immer schwer einschätzbar [5].

Der klimafreundliche Roh- und Baustoff Lehm hat das Potenzial, wesentlich zu einer ökologischen Bauwende beizutragen. Der Baustoff Lehm ist regional nahezu unbegrenzt verfügbar und schneidet in Berechnungen zur Lebenszyklusanalyse, zur Ökobilanzierung und zum Rückgewinnungspotenzial gut ab [6]. Lehm ist darüber

hinaus ohne energieintensive Aufbereitungsprozesse wiederverwendbar. Durch den erneuten Einsatz von Lehmbaustoffen aus dem Gebäudebestand kann ein wesentlicher Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen und zu einer nachhaltigen und geschlossenen Kreislaufwirtschaft geleistet werden. Die Wiederbelebung des Massivlehmbaus kann durch einen deutlich reduzierten Energieverbrauch und Treibhausgas-Ausstoß zur Erfüllung der klimapolitischen Ziele beitragen und auch langfristig in einem nachhaltigen Wirtschaftssektor den Grundstein für Wachstum von KMUs und Beschäftigung legen. Die Verwendung von recyceltem und/oder nachwachsendem Material kann diese Ziele nochmals verstärken.

1.2 Problem- und Zielstellung

Die seit etwa 40 Jahren andauernde Renaissance des Lehmbaus ist im besonderen Maße auf positive Umweltbilanz als auch auf die positiven Eigenschaften von Lehm als Baustoff zurückzuführen: Durch die lokale Verfügbarkeit von Lehmgruben, die relativ simple Aufarbeitung zu verbaubaren Lehmbauteilen sowie der energiearme Abbindeprozess weist Lehm, im Vergleich zu anderen Baustoffen, eine hervorragende CO_2-Bilanz auf [7]. Darüber hinaus verstärkt die große Oberfläche der im Lehm vertretenen Tonminerale das Sorptionsverhalten von Lehmbauteilen. Hierdurch wird nicht nur die Aufnahme von Feuchtigkeit, sondern vermutlich auch die von Schadstoffen begünstigt [8, 9]. In Regionen, die einen starken Eintrag von Umweltgiften erfahren, könnten die genannten Vorzüge jedoch ins Negative umschwenken: Einerseits ist es möglich, dass in stark verschmutzten Gebieten bereits kontaminierter Lehm verbaut worden ist, andererseits kann es über den Luft- oder Bodeneintragspfad zu einer Akkumulation von Schadstoffen in bereits verbauten Lehm gekommen sein. Beide Varianten machen, nicht nur im Sinne der baurechtlichen Rezyklierbarkeit, sondern auch in Anbetracht der Umweltverträglichkeit eine Prüfung der Bausubstanz notwendig.

Die Palette von Schadstoffen ist dabei breit gesät: Nicht nur Schwermetalle und organische Schadstoffe (PAK, Pestizide) aus der Agrarnutzung und der Industrie können der Wiederverwendung im Weg stehen, sondern auch, Schimmelpilze und bauschädliche Salze. Eine umfängliche vergleichende Identifizierung und Quantifizierung dieser Substanzen wurde bezüglich Lehmbestandsbauten in Mitteldeutschland bisher noch nicht durchgeführt. In Anbetracht der aufkommenden Herausforderungen hinsichtlich der klimatischen und gesellschaftlichen

Veränderungen ist es notwendig, dass Voraussetzungen für einen Lehmbau geschaffen werden, der vollständig in die Kreislaufwirtschaft integriert werden kann. Bei bisherigen Gesetzgebungsverfahren wurden zwar andere Baustoffe bzgl. ihrer Wiederverwendbarkeit bei Kontamination reguliert, für Lehm als Baustoff ist dies bisher noch nicht der Fall. Mit dieser Vorstudie soll daher nicht nur ein Überblick darüber gegeben werden, welche Schadstoffe und in welchem Maße diese in Lehmbestandsbauten im betrachteten Gebiet gefunden werden könnten, sondern auch ein Grundstein dafür gelegt werden, die Verwendung von rezyklierten Baustoffen im Interesse des Verbrauchers zu regulieren.

Mitteldeutschland als Region der WIR!-Initiative der GOLEHM ist als strukturschwacher Wirtschaftsraum ausgewiesen und teilweise direkt vom Ausstieg aus der Braunkohleförderung sowie der damit einhergehenden Umorientierung in Industrie und Wirtschaft betroffen. Das Thema *Recyclinglehm* ordnet sich in den *Innovationspfad Bestandsbau* der Initiative ein. Die Weiterverwendung des Baustoffes Lehm kann eine wertvolle Ressource darstellen, erfordert jedoch eine Einschätzung der Machbarkeit bei Sanierungsarbeiten oder Neubauvorhaben mit Lehm.

Ziel des Projektes war es daher, eine Überprüfung der Wiederverwendbarkeit von Lehmbaustoffen aus historischen Bauten hinsichtlich der Umwelt- und Nutzer-verträglichkeit vorzunehmen.

Es wurden exemplarisch Wellerlehmgebäude aus dem historischen Baubestand mit einer potenziellen Salz-, Schadstoff- oder mikrobiologischen Belastung beprobt und anhand von Wandprofilen in unterschiedlichen Höhen untersucht. Referenzproben zur Ermittlung einer geogenen Hintergrundbelastung der ursprünglichen Ausgangs-materialien für die Lehmbaustoffe wurden bei Verfügbarkeit berücksichtigt.

Anforderungen an Ausgangsstoffe, z.B. zulässige Salzgehalte oder Schadstoff-grenzwerte in Bezug auf den Transfer für den Pfad Boden-Grundwasser wurden orientierend herangezogen, um eine Bewertung der Rückführbarkeit in den Stoff-kreislauf vorzunehmen. Um die Eignung von rezykliertem Lehm für die Nutzung in Innenräumen und damit einhergehende gesundheitsrelevante Aspekte zu bewerten, wurde der mögliche Übergang von flüchtigen organischen Verbindungen in die Luft mit Hilfe von Emissionsprüfkammern analysiert. Darüber hinaus wurden exemplarisch und

orientierend mikrobiologische Untersuchungen hinsichtlich der Besiedelung von Lehm mit Pilzen durchgeführt.

1.3 Fachlicher Kenntnisstand

1.3.1 Schadstoffquellen und Eintragspfade

Mit Bezug auf Böden wird davon gesprochen, dass Schadstoffe Stoffe und Stoffverbindungen sind „die aufgrund ihrer Eigenschaften und der vorkommenden Konzentrationen schädlich für Mensch und Umwelt sein können“ [10]. Diese Definition trifft für anorganische (Schwermetalle, radioaktive Stoffe) und organische Schadstoffe (PAK, Pestizide) durchaus zu, kann aber durch mikrobielle Einflüsse (Pilze, Viren) erweitert werden. Allgemein können Schadstoffe auf natürliche (Waldbrände, Verwitterung von geogenen Mineralien) und anthropogene Quellen (Industrie, Landwirtschaft, Bergbau) zurückgeführt werden, wobei letzteren ein größerer Einfluss zuzurechnen ist. Das Auftreten von Schadstoffen in Lehmbauten kann deshalb größtenteils durch lokale Begebenheiten und individuelle Nutzung begründet werden.

Schadstoffe können direkt oder indirekt in Lehmbauteile gelangen, indem das Baumaterial bereits kontaminiert war oder ein nachträglicher Eintrag erfolgte. Für den direkten Eintrag muss das Ausmaß der Kontamination immer im Kontext des Zeitpunktes der Erbauung gesehen werden: Historische Lehmbauten wurden meist mit Lehm, Holz und Additiven aus lokalen Quellen erbaut, deren Kontamination ist somit ein Abbild der lokalen Begebenheiten. Für Objekte, die vor dem 19 Jh. n. u. Z erbaut wurden, kann deshalb eine Grundkontamination des Baumaterials hinsichtlich organischer Schadstoffe im weitesten Sinne ausgeschlossen werden, da die Menge und Vielfalt von synthetisch produzierten Materialien vergleichsweise gering waren. Großen Einfluss kann hingegen dem Eintrag von Mikroorganismen und vor allem dem historischen Bergbau zugerechnet werden: Durch die relative frühe Erschließung von Erzquellen vor allem im mitteldeutschen Raum (Harz, Erzgebirge, Mansfelder Revier) und der damit verbundenen Etablierung von metallverarbeitenden Betrieben sind große Mengen von Schwermetallen wie Kupfer, Chrom, Nickel in die Umwelt gelangt und könnten somit auch regional in den Baustoff Lehm gelangt sein[11, 12]. Die in Abbildung 1 dargestellte Karte zeigt beispielsweise die gegenwärtige Kontamination von Oberböden durch Kupfer in Sachsen [13]. Hervorzuheben ist hierbei, dass Flüsse wie die Mulde Kupfer aus den sächsischen Bergbauregionen über weite Strecken

transportieren und durch wiederkehrende Überflutungen anliegende Böden kontaminieren konnten.

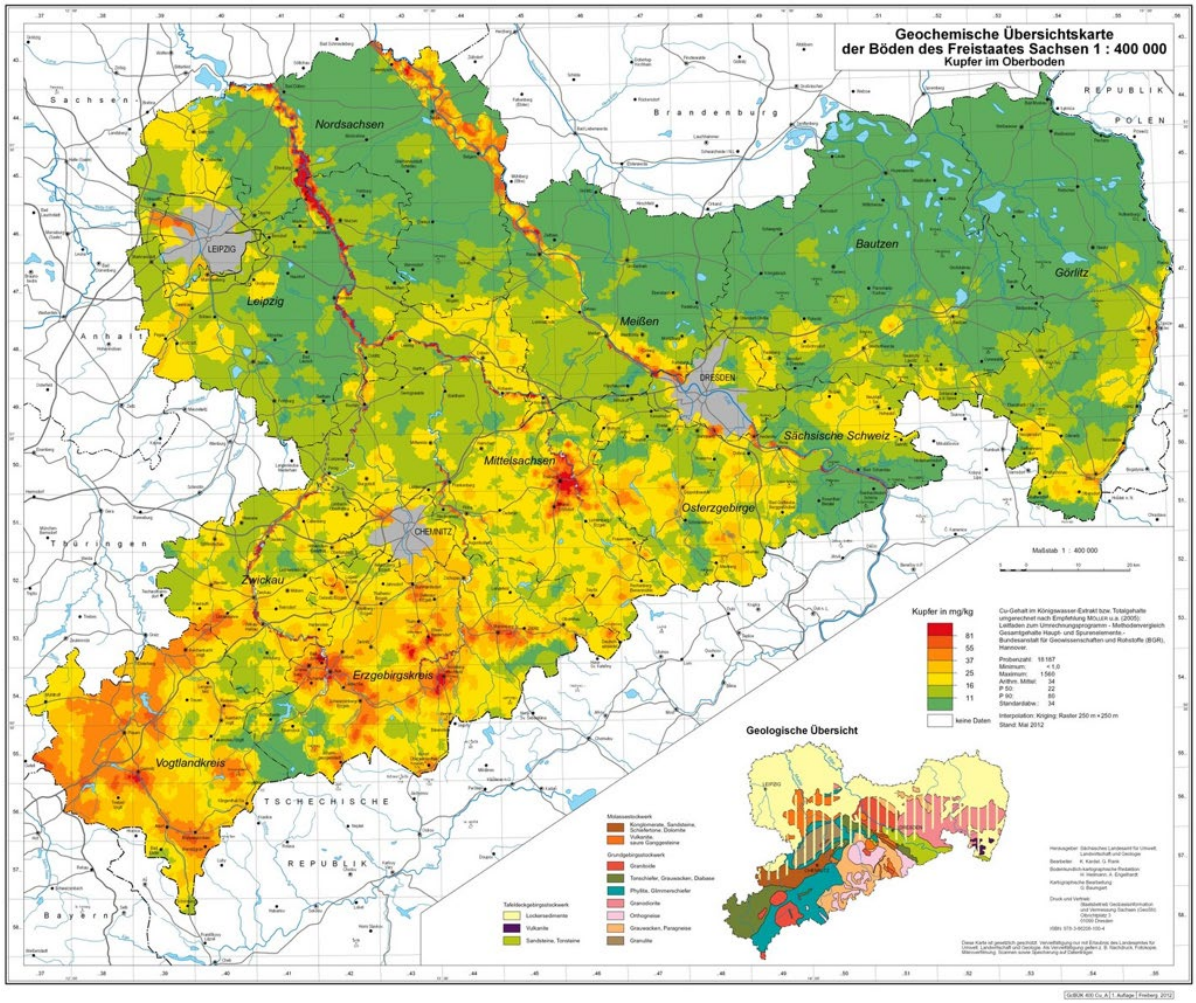


Abbildung 1: Geochemische Übersichtskarte der Oberböden von Sachsen für Kupfer [13].

Der indirekte Eintrag von Schadstoffen ist ebenfalls standortabhängig, erfolgt hingegen kontinuierlich, weswegen auch zeitlich „jüngere“ Schadstoffe einen Einfluss haben könnten. Dominierend sind hierbei die Eintragspfade Boden → Objekt und Luft → Objekt. In beiden Fällen wird dabei der Stofftransport im Besonderen durch die Hygroskopie des Lehms geprägt, die den Eintrag von in Wasser gelösten Schadstoffen unter Umständen erleichtert (s. 1.3.4). Für den Pfad Boden → Objekt könnte beispielsweise durch Industrieeinfluss kontaminiertes Grundwasser bei Nichtvorhandensein einer undurchlässigen Sperrschicht in den Lehm eindringen und Schadstoffe sich im Lehm anreichern. Ähnliches kann beim Eintragspfad Luft → Objekt erfolgen: Durch eine permeable Verputzung können durch Industrie usw. emittierte

Schadstoffe (z.B. an Feinstaub adsorbiert) sich auf Lehmwänden anlagern, durch oberflächliche Feuchte gelöst werden und mit dem Porenwasser in die Wand eindringen [14].

1.3.2 Sorption, Mobilität und Abbau von Schadstoffen in Lehmbauteilen

Hinsichtlich der Mobilität von Schadstoffen gleicht der in historischen Gebäuden verbaute Lehm nur im begrenzten Maße herkömmlichen Baustoffen. Die Formstabilität des Lehms wird nicht wie z. B. beim Zement durch die Ausbildung chemischer Bindungen erreicht, sondern durch Ausbildung von vergleichsweise schwachen Anziehungskräften zwischen den unterschiedlich geladenen Tonmineraloberflächen, die durch an Tonmineralien adsorbiertes Wasser vermittelt werden. Dieser Vorgang wird durch Verdunsten des zum Aufschlämmen verwendeten Wassers in Gang gesetzt, wobei nicht nur dünne Wasserfilme auf den Oberflächen der Tonminerale und eingeschlossenes Wasser innerhalb der Poren zurückbleiben, sondern das entwichene Wasser Hohlräume hinterlässt. Dies hat zur Folge, dass der erhärtete Lehm eine hohe Porosität aufweist und in dessen Poren ein Stoffaustausch durch das schwach gebundene Wasser erfolgen kann. Der Hauptantrieb des Wassertransport wird dabei durch kapillare Kräfte dirigiert, welche für eine gleichmäßige Verteilung von Feuchtigkeit im Baustoff sorgen. Diese Eigenschaften weist Lehm auch im natürlichen Zustand auf, wobei abgesehen von dem höheren Wassergehalt, die Sorption und der Transport von im gebundenen Wasser gelösten und dispergierten Teilchen unter ähnlichen Bedingungen stattfinden sollte wie in verbauten Lehm. Aufgrund der dünnen Quellenlage bzgl. der Schadstoffmobilität von verbautem Lehm wird daher im Folgenden auf das System „Boden“ verwiesen.

Der größtenteils in der wässrigen Phase stattfindende Stofftransport ist weitestgehend von bodenspezifischen Parametern und den Eigenschaften der transportierten Stoffe abhängig. Bei der Bewegung durch das poröse Netzwerk des ausgehärteten Lehms sind die im Wasser verteilten Stoffe ständigen Sorptions- und Desorptionsprozessen unterworfen, die deren Retention und Mobilität bestimmen [15]. Hinsichtlich der bodenspezifischen Eigenschaften sind dabei die Adsorptions- und Ionenaustausch-kapazität der Tonminerale, die Porengröße, der pH-Wert des Porenwassers und der Gehalt an darin dispergierter organischer Substanz (DOC) zu nennen [16]. Hinsichtlich der transportierten Schadstoffe sind hingegen Kenngrößen wie Molekülgröße, Polarität, Wasserlöslichkeit und Dampfdruck von zentraler Bedeutung, was dazu führt,

dass sogar innerhalb einzelner Substanzgruppen die Unterschiede bzgl. der Akkumulation und Verteilung verschiedener Stoffe stark voneinander abweichen können.

Salzbildende Anionen wie Chloride oder Nitrate können aufgrund ihrer hohen Löslichkeit mittels kapillarer Kräfte durch das Porennetzwerk transportiert werden. In Lehmwänden können sie in oberflächennahen Lagen, in denen höhere Verdunstungsraten vorherrschen, durch Bindung mit in Lösung vorliegenden oder baustoffeigenen Kationen auskristallisieren und „Bauschädliche Salze“ ausbilden. Die dann vorliegenden Kristallisationskeime begünstigen die Anbindung weiterer Ionen sowie die Einlagerung von Kristallwasser. Mit der Volumenvergrößerung der Salzstrukturen geht eine Porenvergrößerung einher, die die Porosität des Baulehms erhöht und letztendlich zum Materialzerfall führen kann [2].

Im Vergleich zu den leichtlöslichen Anionen ist die Mobilität von Schwermetallen wie Kupfer oder Blei im Porennetzwerk wiederum stark eingeschränkt. Sorptions- und Komplexierungsvorgänge an der Bodenmatrix sowie dispergierten und gelösten Teilchen im Porenwasser hindern ihre Beweglichkeit und somit ihren kapillaren Transport. Erst unter sauren oder reduktiven Bedingungen (Abwesenheit von Luftsauerstoff) können sie als Ionen in der mobilen wässrigen Phase gelöst und ihre Retention verringert werden. Da in Lehmwänden jedoch meist ein neutraler pH-Wert vorherrscht, sollten im Gegensatz zu den Anionen der bauschädlichen Salze eine Verteilung der Schwermetalle innerhalb der Lehmwand ausgeschlossen werden.

Eine ähnlich gehemmte Mobilität zeigen auch organische Schadstoffe. Die meist relativ unpolaren Verbindungen sind nur im geringen Maße wasserlöslich, wobei wie im Falle der PAK mit zunehmender Größe bzw. Anzahl an aromatischen Ringen die Löslichkeit weiter abnimmt. Ihr Transportverhalten im Porenwasser wird jedoch stärker durch die im Porenwasser enthaltenden organischen Bestandteile bestimmt. Durch Bindung und Adhäsion an Huminstoffe wird ihre Wasserlöslichkeit erhöht und somit ihr kapillarer Transport im Porenwasser begünstigt [15]. Bei verbautem Lehm mit hohen Anteilen von natürlichen Zuschlägen wie z.B. Stroh sollte somit eine erhöhte Mobilität von organischen Schadstoffen beobachtet werden.

Der Gesamtgehalt von bauschädlichen Salzen, Schwermetallen und organischen Schadstoffen in verbauten Lehmbauteilen ist veränderbar durch den An- und Abtrag

der jeweiligen Stoffgruppen. Ein weiterer Faktor ist der Abbau durch Organismen. Bauschädliche Salze und organische Schadstoffe können im Gegensatz zu Schwermetallen metabolisiert und damit eliminiert werden [17]. Neben der Temperatur dem pH-Wert wird dabei die Abbaurate durch die Menge und mikrobielle Aktivität der im Lehm vorhandenen Bioorganismen sowie durch die Persistenz des abzubauenden Stoffes bestimmt. Besonders unpolare organische Schadstoffe sind aufgrund ihrer geringen Löslichkeit in Wasser schwer zugänglich für den mikrobiellen Abbau. Erst durch die Sorption an im Porenwasser dispergierte organische Partikel kann ihre Wasserlöslichkeit und damit ihre Bioverfügbarkeit erhöht werden. Trotz dessen weisen besonders unpolare Schadstoffe wie PAKs unter Normalbedingungen niedrige Metabolisierungsraten auf, für die teilweise Halbwertszeiten von einigen Jahren bestimmt wurden [18].

1.3.3 Mechanismen der Einwirkung von Feuchte auf Lehmbaustoffe

Der Feuchtegehalt eines Baustoffs ist abhängig von seiner Aufnahmefähigkeit gegenüber Wasser und auf folgende Prozesse zurückzuführen:

- kapillare Wassertransportprozesse (Kapillarität),
- eindringendes Wasser eventuell in Verbindung mit hydrostatischen Drücken und Wasserdampf,
- hygroskopische Wasseradsorption (salzbedingt),
- Kondensation und
- Kapillarkondensation.

Lehmbaustoffe können bis zu einem Feuchtegehalt von 0,8 bis maximal 1,5 Masse-% als ausgleichsfeucht betrachtet werden, je nach Art und Menge der im Material enthaltenen Tonminerale [19]. Der Begriff Ausgleichsfeuchte bezieht sich dabei auf den Wassergehalt, den ein poröser Baustoff in Abhängigkeit zur Luftfeuchte enthält, wobei mit steigender Luftfeuchte auch der Wassergehalt zunimmt. Grundlage hierfür ist die Kapillarkondensation, bei der Wasserdampf aus der Luft vom Baustoff aufgenommen wird und aufgrund von sich ändernden Druckverhältnissen in den Kapillarporen kondensiert.

Wesentliche Feuchtequellen für Mauerwerk oder Wandaufbauten an Bestandsobjekten sind üblicherweise:

- Aufsteigende Feuchte aus dem Baugrund,

- Verdunstungsbehinderung von aufsteigender Feuchte durch Wandverkleidung und diffusionsdichtem Außenputz,
- Hygroskopische Feuchte,
- Kondenswasser durch Taupunktunterschreitung von Luft- oder Bauteil-temperatur,
- Eintrag von Feuchte durch undichtes Dach, Rohrbruch oder anderenorts an der Gebäudehülle,
- Bewitterung (Schlagregen, Spritz- und Sickerwässer).

Infolge Materialität, konstruktiver Ausbildung und Bauzustand überlagern sich die Feuchtequellen am Objekt nahezu vollständig.

Das Fehlen einer Horizontalsperre des aufgehenden Mauerwerks ist ursächlich für den Feuchteeintrag durch aufsteigende Feuchte. Infolge aufsteigender Feuchte und den kapillaren Transport innerhalb des porösen Wandbaustoffes werden zudem bauschädliche Salze vom Baugrund in das Mauerwerk eingebracht, die hygroskopisch, d.h. wasseranziehend wirken. Auch wenn kein zusätzliches Wasser von außen eintritt, kann ein Bauteil bei erhöhtem Salzgehalt feucht erscheinen (hygroskopische Feuchte). Allein durch hohe Luftfeuchtigkeit können Salze so genügend Wasser anreichern, dass diese in Lösung gehen. Neben der Feuchteanreicherung führen Salze zu Zerstörungen der Bausubstanz.

1.3.4 Verhalten und Wirkung bauschädlicher Salze in Lehmbaustoffen

Salze sind Minerale, die aus positiv geladenen Kationen und negativ geladenen Anionen ein Kristallgitter aufbauen. Beim Auflösen in Wasser dissoziieren Salze als Elektrolyte in Kationen und Anionen. Salze an Kulturgütern und Bestandsbauwerken sind stets Ionengemische und stammen in der Regel aus der Umgebungsluft eines Gebäudes, aus dem anstehenden Baugrund, aus den Baumaterialien selbst oder aus Schadstoffablagerungen. Das Schadenspotenzial sogenannter „bauschädlicher Salze“, die überwiegend als Sulfat-, Nitrat- und Chlorid-Verbindungen in zum Teil komplexen Zusammensetzungen vorkommen. Typische Kationen sind dabei Magnesium, Calcium, Natrium, Kalium oder Ammonium. Grundvoraussetzung für salzbedingte Schadensprozesse ist, dass Wasser in flüssigem oder gasförmigem Zustand in den Baustoff eindringt und gelöste Salze mittransportiert, oder im Material vorhandene Salze löst und im Querschnitt befördert.

Durch stetige Verdunstung von Wasser, werden die gelösten Salze in Abhängigkeit zur jeweiligen Kapillarität des Baustoffes mit der Feuchtigkeit im Porensystem eines Wandquerschnitte transportiert. Während die Feuchtigkeit an den Bauteiloberflächen abtrocknen kann, bleiben die im Wasser gelösten Salze in den oberflächennahen Bauteilschichten zurück und reichern sich dort an. In Abhängigkeit von Konzentration, Klima, thermodynamischen Bedingungen und den jeweiligen Charakteristika von Salzen können sie in Form von weißen Flecken, Rändern, Krusten, pulverigen Ausblühungen, Flaum oder feinsten Haarkristallen auf den Bauteiloberflächen auskristallisieren und sich aufkonzentrieren. Bei wechselnden klimatischen Bedingungen vollzieht sich eine wiederkehrende Hydratation und Dehydratation. Dieses Kristallisieren und in Lösung gehen beansprucht den Baustoff. Dabei haben Salzausblühungen unter der Oberfläche (Subfloreszenzen) meist ein stärkeres Schadenspotenzial, als jene Ausblühungen, welche an der Oberfläche zu beobachten sind (Effloreszenzen). Sind nun durch weitere Anreicherung sämtliche Poren gefüllt, wird der Kristallisations- bzw. Hydratationsdruck so hoch, dass es zu zahlreichen Absprengungen im Baustoffgefüge kommt. Die Material(-zug)festigkeit des salzbelasteten Baustoffs nimmt ab. Aus kleineren werden großflächige Material-ausbrüche, was über einen gewissen Zeitraum zu einer Reduzierung des Bauteil-querschnittes führen kann, Dadurch kann es je nach Ausmaß auch zu einer Beeinträchtigung der Standsicherheit betroffener Bauteile kommen.

Ein weiterer salzinduzierter Schädigungsprozess ist darauf zurückzuführen, dass im Baustoff befindliche Salze aus der Umgebungsluft, also hygroskopisch, Wasser aufnehmen und binden können. In Abhängigkeit zum Versalzungsgrad und der Salzart bedingt dies in Bezug zur Temperatur und dem Druck einen zusätzlichen Anstieg des Wassergehalts in betroffenen Baustoffen. Zudem wird durch die hygroskopische Feuchteaufnahme die Trocknung des salzhaltigen Materials nachteilig beeinflusst. Feuchte Flecken sind die sichtbare Folge. Insbesondere Nitratverbindungen, wie sie etwa in Fäkalien enthalten sind (bspw. bei ehem. Tierhaltung), sind diesbezüglich aufgrund ihrer hohen Hygroskopizität besonders problematisch.

Durch Verhinderung der Verdunstung infolge von eher diffusionsdichten Wand-verkleidungen wie Gipskartonplatten sowie diffusionsdichtem Kalkzementaußenputz können Bauteile aus Lehmbaustoffen die Feuchte nicht entsprechend an die Raum- sowie die Außenluft abgeben. Die feuchtebedingte Minderung der Festigkeit des

Bauteils, Verrottung der organischen Fasern und Schimmelpilzbildung an der Innenseite der Wandverkleidungsbaustoffe können die Folge sein. Im Falle von Innendämmungen können Salze aus der Bestandswand in das Porensystem des Dämmstoffes einwandern und damit die Dämmwirkung reduzieren.

Die übliche Verteilung von bauschädlichen Salzen im Wandquerschnitt zeigt eine zunehmende Belastung Richtung Wandoberfläche. Sulfate zählen im Gegensatz zu den leicht löslichen Nitraten und Chloriden zu den schwer löslichen Salzen. Die höchste Konzentration von Sulfaten ist demnach im unteren Wandbereich zu erwarten wohingegen Nitrate und Chloride in höheren Wandbereichen die höchste Konzentration vorweisen.

Die Ursachen der Salzbelastung sind meist auf die frühere oder andauernde Nutzung, Bewitterung bzw. Umweltbedingungen oder benutzte Baustoffe zurückzuführen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Quellen von Anionen bauschädlicher Salze.

Calcium (Ca^{2+})	· Baustoffe (Kalkmörtel, Beton, kalkhaltige Natursteine · trockene Deposition (Industriestaub, Baustofflager) · Grundwasser mit hoher Härte, Spritzwasser
Magnesium (Mg^{2+})	· Baustoffe (dolomithaltige Mörtel und Natursteine, Ziegel) · trockene Deposition (Industriestaub, Baustofflager) · Grundwasser mit hoher Härte, Spritzwasser · Düngemittel · Winterdienst mit Magnesialauge auf nahe gelegenen Straßen
Natrium (Na^{+}), Kalium (K^{+})	· Zement- und trasshaltige Baustoffe, Tausalze im Mörtel · Tausalze auf Wegen, Grundwasser, Spritzwasser · Düngemittel · frühere Behandlung mit Natrium- bzw. Kaliumwasserglas oder alkalischen Materialien
Ammonium (NH_4^{+})	· Harnstoffe (Tierhaltung, Toiletten) · Düngemittel
Sulfat (SO_4^{2-})	· Luftverunreinigung durch Verbrennung von Schwefelhaltiger Kohle und Erdöl (Industrie und Hausbrand) · Baustoffe (gebrannte Ziegel, gipshaltige Baustoffe) · Grundwasser, Spritzwasser · saurer Regen aus Zeiten der Industrialisierung Ende 19. bis ca. Mitte 20. Jh. sowie zur DDR-Zeit
Nitrat (NO_3^{-})	· Tierhaltung · Düngung · Verwesungsprodukte (Friedhof) · Fäkalien (Toiletten) · Deposition aus der Luft, Regenwasser (intensive Tierhaltung in der Umgebung) · Grundwasser · Autoabgase und andere Hochtemperaturverbrennungen
Chlorid (Cl^{-})	· Tausalze (auf Wegen, im Mörtel) · Verwendung von Salzsäure (HCl) zum Absäuern (Reinigung) · Luftverschmutzung (z. B. bei der Verbrennung von PVC) · Grundwasser, Spritzwasser · Seaspray (Meerwasser in küstennahen Bereichen) · Streusalz(-lager)

1.4 Bewertungsgrundlagen

Lehm wurde traditionell als Naturbaustoff angesehen, also aus der damals reinen Natur kommend und unterlag deshalb keinen verpflichtenden Untersuchungen hinsichtlich Schadstoffbelastung. Lehm ist normalerweise nicht mit Schadstoffen belastet und als Mineralgemisch selbst nicht gesundheitsschädlich. Mit bauaufsichtlicher Einführung der sogenannten „Lehmbau Regeln“ im Jahr 1998 wurde erstmals grob formuliert, dass Baulehm, also zum Bauen geeigneter Lehm, frei von schädlichen Stoffen sein soll [20].

Schadstoffanreicherungen geogener oder anthropogener Herkunft in Lehm sind regional möglich (vgl. 1.3). Geeignete, gesetzlich geregelte Bewertungsmaßstäbe für die Wiederverwendung von Lehm aus dem Gebäudebestand existieren bisher nicht. Die Deklaration gesundheits- und umweltgefährdender Inhaltsstoffe von Bauprodukten erfolgt auf freiwilliger Basis.

Ökotoxikologisch abgeleitete und für den Schadstofftransfer auf dem Pfad Boden-Grundwasser kalkulierte Grenzwerte für regulierte anorganische und organische liegen mit der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) und der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) unter anderem für Bodenmaterialien vor (s. 3.2.2, 3.4.5) [21]. Diese können hier nur behelfsmäßig herangezogen werden, da die Anwendungsszenarien für Lehmbauten nicht relevant sind. Es sind keine wesentlichen schädlichen Bodenveränderungen durch den Einfluss von Niederschlagswasser in der Nutzungsphase von Lehmbauten zu erwarten. Erst im Falle eines Rückbaus und einer eventuell notwendigen Entsorgung oder Weiterverwertung des Lehms in anderen Bauweisen könnten diese Regularien Anwendung finden.

Für bauschädliche Salze gibt es in den DIN-Normen für neue Lehmbaustoffe eher konservative Festlegungen für maximale Gehalte in Lehmbaustoffen [22-24]. Allerdings gibt es keine verallgemeinerbaren und belastbaren Daten, ab welchen Gehalten tatsächlich Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften von Lehmbaustoffen eintreten können. Die Auswirkung bauschädlicher Salze ist von der Art, deren Konzentration im Mauerwerksquerschnitt und der Verfügbarkeit von Feuchtigkeit abhängig. Der Gehalt an löslichen Salzen ist ein Beurteilungskriterium zur Eignung des Mauerwerkes bzw. zur Materialauswahl für weitere Beschichtungen (Putz/Anstrich) oder für die Wiederverwendbarkeit bzw. die Notwendigkeit der Aufbereitung. Maßgeblich sind in der Regel die Werte der oberflächennahen

Mauerwerks- bzw. Wandbereiche (Mauerstein oder Fugenmörtel) bis in eine Tiefe von etwa 3 cm. Die Beurteilung von Salzbelastungen wird anhand des WTA-Merkblattes „Beurteilung von Mauerwerk- Mauerwerksdiagnostik“ der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA-Merkblatt-1999 [25]) vorgenommen. Die angegebenen Belastungs- und Bewertungsstufen sind in den beiden nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 2: Bewertungsstufen verschiedener schadensverursachenden Anionen nach WTA-Merkblatt [25].

Nach WTA- Merkblatt 4-5-99 „Mauerwerksdiagnostik“			
	[M.-%]		
Nitrate	< 0,1	0,1 - 0,3	> 0,3
Sulfate	< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5
Chloride	< 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Bewertung	Belastung gering	Belastung mittel	Belastung hoch
	Maßnahmen im Ausnahmefall erforderlich	Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbestimmung) erforderlich. Maßnahmen im Einzelfall erforderlich	Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbestimmung) erforderlich. Maßnahmen erforderlich
	Für einfache Rückschlüsse zum Gesamtsalzgehalt ist der ermittelte höchste Gehalt von Salzionen, unabhängig von Chlorid, Nitrat oder Sulfat und die Bewertung o. a. Tabelle maßgebend.		

Tabelle 3: Zulässige Mengen von verschiedenen schadensverursachenden Salzen in Lehmbaustoffen nach DIN 18945 – 47 [22-24].

Nach DIN 18947:2024-03 "Lehmputzmörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung", ebenso DIN 18945:2024-03 (Lehmsteine) und DIN 18946:2024-03 (Lehmmauermörtel)				
	[M.-%]			
Nitrate	≤ 0,02	> 0,02	∑Anionengehalt	
Sulfate	≤ 0,10	> 0,10		
Chloride	≤ 0,08	> 0,08	≤ 0,12	> 0,12
Bewertung	zulässig	nicht zulässig	zulässig	nicht zulässig

Zu weiteren Bewertungsgrundlagen auch bezüglich Emissionen in die Innenraumluft und mikrobiologischen Bewuchses wird, soweit vorhanden, in den entsprechenden Kapiteln der Ergebnisdiskussion näher eingegangen.

2 Objektauswahl

Die Auswahl von Messobjekten erfolgte auf Grundlage eines Pools an freiwilligen Hauseigentümern, die sich im Zuge von Aufrufen des WIR!-Bündnis GOLEHM dazu bereit erklärt haben, invasive Probenahmen an ihrem Eigentum zu gestatten. Ausgehend davon sind alle Objekte Lehmbauten, die in der Region Mitteldeutschland zu lokalisieren sind (Abbildung 2). Der Pool wurde durch die Bedingungen beschränkt, dass es sich bei den zu beprobenden Messobjekten um Lehmwellerbauten handelt und dass diese über längere Zeit einen Schadstoffeintrag erfahren haben, der durch die im Projekt zur Verfügung stehenden analytischen Methoden nachgewiesen werden könnte. Um ein originalgetreues Abbild des Schadstoffeintrages zu erlangen, wurden nur Lehmwände von Objekten beprobt, an denen keine invasiven Sanierungsarbeiten vorgenommen wurden. Weitere Auswahlkriterien wurden fragestellungsspezifisch nach Absprache mit den beteiligten Projektpartnern aufgestellt.

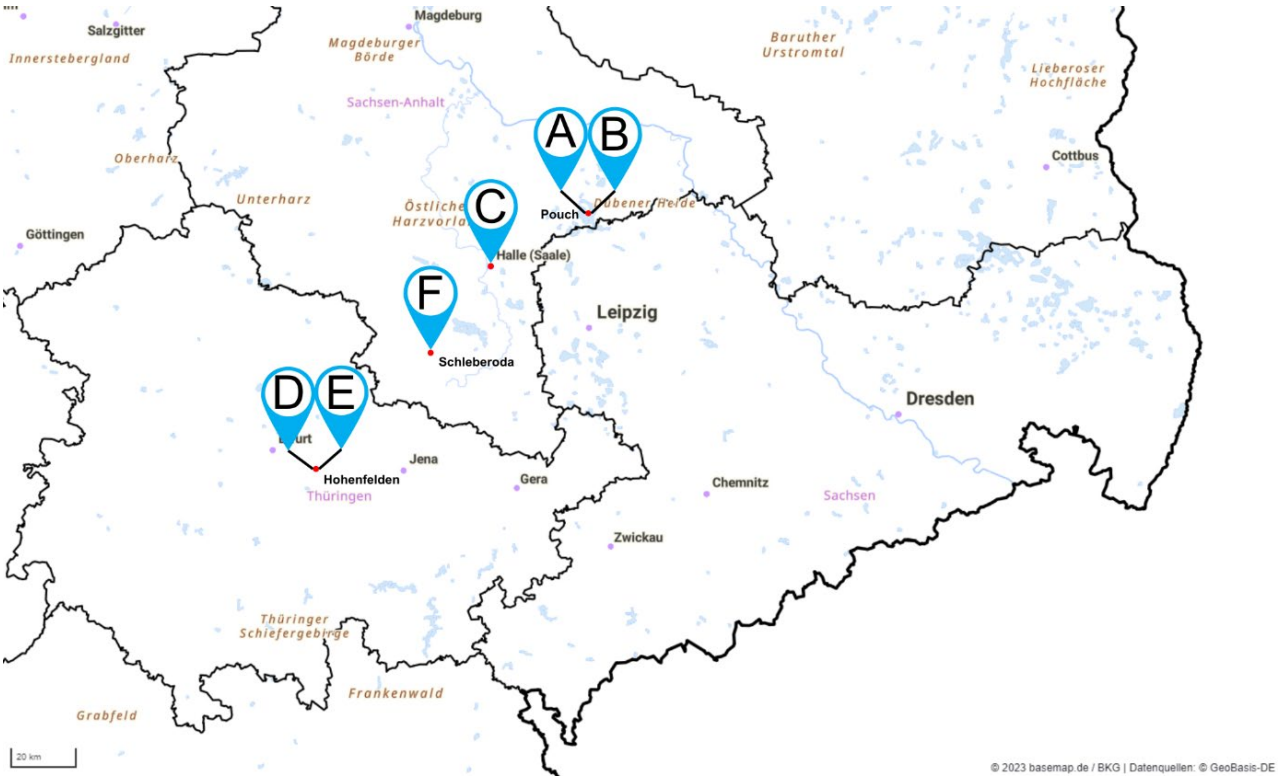


Abbildung 2: Übersichtskarte der beprobten Objekte.

2.1 Probenbeschreibung

Tabelle 4 gibt eine Zusammenfassung der beprobten Objekte unter Angabe von Objekt-Kürzel, Standort, Funktion, Baujahr und möglichen Schadstoffquellen wieder.

Tabelle 4: Übersicht und Informationen zu den beprobten Objekten.

Objektkürzel	Baujahr	Entnahme-objekt	Entnahme-ort	Entnahme-zeitpunkt	Bauzustand z.Z. der Probenahme	Anmerkungen	Mögliche Schadstoffquellen	Probenanzahl	Entnahmeorte (Verputz: +/-)
A	1912	Ehemalige Scheune/ Schuppen	Pouch (N 51.624834 E 12.405303)	04.10.2022	Im Umbau		Industrie, Agrar, Auengebiete Mulde	26	Innenwand (-), Außenwand (+), Bodenprobe
B	1847	Backhaus, Schuppen; zwischen Pfarrhaus und Kirche	Pouch (N 51.62559 E 12.399052)	03.05.2023	Im Umbau		Verbrennungsgase (Backhausbetrieb), Industrie, Agrar, Auengebiete Mulde	26	Innenwand (+), Außenwand (+), Boden
C	1811	Ehemaliger "Kaffeegarten Kurzhals"	Halle (N 51.461856 E 11.949244)	03.05.2023	Seit vielen Jahren verlassen		Urbaner Verkehr, Tabakrauch, Fluss Saale	8	2x Innenwand (+), Bodenprobe
D	1683	ehemaliges Wohnstallhaus "Utzberger Hof"	Freiluftmuseum Hohenfelden (N 50.889654 E 11.165148)	04.07.2023	Transloziert aus Utzberg bei Erfurt und renoviert/ restauriert	Ehemals in Utzberg, begehbares Ausstellungsstück	Agrar, Verbrennungsgase (Schwarzküche)	27	Innen- und Außenwand (+/-), Innenwand (+/-)
E	1550	ehemaliges Wohnstallhaus "Haus aus Abtsbessingen"	Freiluftmuseum Hohenfelden (N 50.888291 E 11.164898)	04.07.2023	Transloziert (2021) wird aktuell restauriert	Ehemals in Abtsbessingen, Kyffhäuser, begehbares Ausstellungsstück	Agrar	5	Innen- und Außenwand (+/-)
F	ca. 1850	Viehstall	Schleberoda (N 51.239154 E 11.802218)	12.10.2023	keine Umbauarbeiten	in aktiver Nutzung	Agrar	9	Innenwand (-), Bodenprobe

Die in diesem Bericht verwendeten Probenbezeichnungen folgen zur Veranschaulichung und zum besseren Verständnis der behandelten Sachverhalte folgender Logik:

O-x-y-z

Objekt Ort Horizont Probe

Zur Bezeichnung der beprobten Objekte wurden die Kürzel „A“ bis „F“ in Großbuchstaben gewählt. Die alphabetische Reihenfolge steht im Einklang mit der zeitlichen Reihenfolge der Probenahmen an den jeweiligen Objekten. Mit der Bezeichnung „x“ wird numerisch der Ort der Probenahme an dem jeweiligen Objekt beschrieben (Wände oder Böden). Mit „y“ wird nummerisch der Horizont beschrieben, in dem die Probenahme erfolgte. Im Falle von Bohrkernen, die von Wänden

entnommen wurden, werden hierdurch verschiedene Entnahmehöhen unterschieden. Mit „z“ wird nummerisch der entsprechende Bohrkern in einer bestimmten Tiefe (für Bodenproben ein bestimmter Tiefenbereich) beschrieben.

Da es einige Abweichungen zu den Bezeichnungen der Proben beim Projektpartner ZRS gibt, sei hier auf die Abschnitte 8.1 und 8.2 verwiesen.

2.2 Objekte A (Scheune) und B (Backhaus) in Pouch

Die Objekte A und B sind beide im Ort Pouch nahe des Industriestandorts Bitterfeld-Wolfen gelegen. Nördlich und südlich des Ortes sind zwei geflutete ehemalige Braunkohletagebaue lokalisiert, wovon der nördliche, der Muldestausee, einen ständigen Wasserzulauf durch die Mulde erfährt, deren Einzugsgebiet u.a. auch vom Erzbergbau der Freiberger Region geprägt ist. Beide Objekte sind aufgrund dieser Gegebenheiten dafür prädestiniert zu überprüfen, ob es durch den kapillaren Eintrag von kontaminiertem Grundwasser in die Bausubstanz zur Akkumulation von z. B. Schwermetallen oder synthetischen Industrieabfällen kommen konnte. Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass durch die naheliegenden Industrieschornsteine ein ausgeprägter Schadstoffeintrag über die Luft erfolgte. Hinsichtlich organischer Schadstoffe wurde beispielsweise im Bitterfelder Raum 1984 die Lindan-Produktion eingestellt. Noch 2005 wurden in Fischen der Mulde erhöhte Konzentrationen an Hexachlorcyclohexan (HCH, ein Rückstand der Lindan-Herstellung) gemessen [26].

Objekt A befand sich während der Probenahme im Umbau (Abbildung 3a). 1912 als Anbau an ein Wohnhaus errichtet, wurde es lange Zeit als Viehstall, Heulager und Garage für landwirtschaftliche Geräte genutzt. Das Gemäuer bestand ursprünglich weitestgehend aus Wellerlehm, wobei im Laufe der Zeit Teile der Wände durch Lehmsteine ersetzt und die Fassade mit Zement verputzt wurde. Neben der Entnahme von Bodenproben (1x3-Horizont) im Garten westlich des Objekts wurde eine Innenwand im Erdgeschoss (4x5-Profil, Abbildung 3b) und die westliche Außenfassade im ersten Stockwerk (YxZ-Horizont) beprobt.

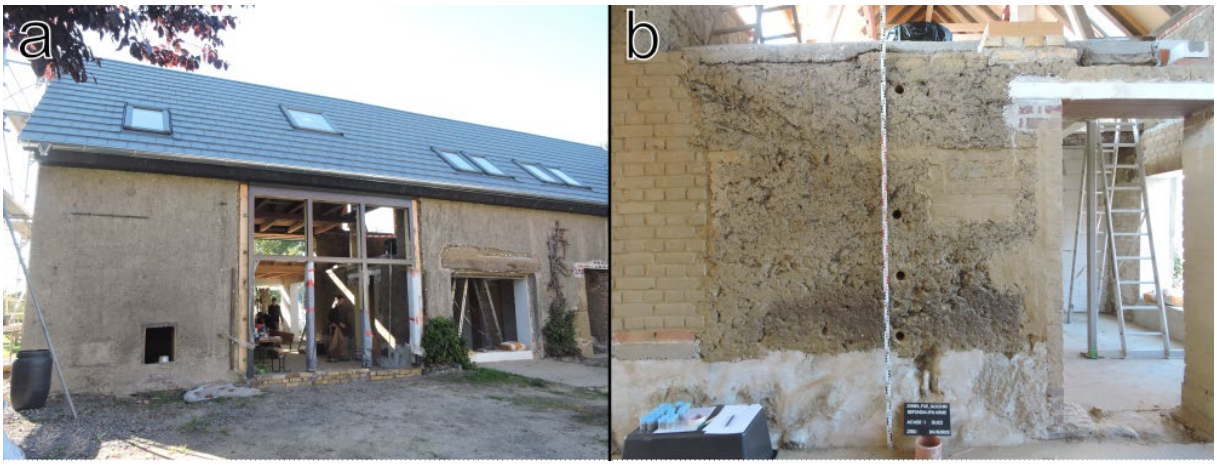


Abbildung 3: Objekt A (Scheune Pouch); (a) Außenansicht der östlichen Fassade, (b) Innenansicht der Wand zu Profil A-1 nach Beprobung.

Objekt B (Abbildung 4a) wurde 1847 auf dem Gelände der evangelischen Kirchengemeinde Pouch errichtet und lange Zeit als Schuppen und Backhaus genutzt. Quelle des verwendeten Lehms soll eine Grube in unmittelbarer Umgebung gewesen sein, die später mit Bauschutt verfüllt wurde. Während das Gemäuer des Erdgeschosses aus Lehmwellerwänden besteht, wurde das Gemäuer des Dachgeschosses aus gebrannten Ziegelsteinen errichtet. Wie Objekt A befand es sich während der Probenahme im Umbau, wobei die Innenwände bereit mit Lehm verputzt wurden. Neben der oben genannten Motivation zur Probenahme bzgl. möglicher externer Kontaminationsquellen wurde dieses Gebäude zum einen beprobt, um eine Referenz zu Objekt A zu haben, zum anderen sollte geprüft werden, inwiefern der Backbetrieb Auswirkungen auf die Akkumulation von PAK in den Lehmwänden hat. Neben einer Innenwand im Erdgeschoss angrenzend an den Backofen (4x5-Profil, Abbildung 4b) wurde die westliche Außenfassade (1x3-Horizont) sowie der Boden (1x3-Horizont) östlich des Objekts beprobt.

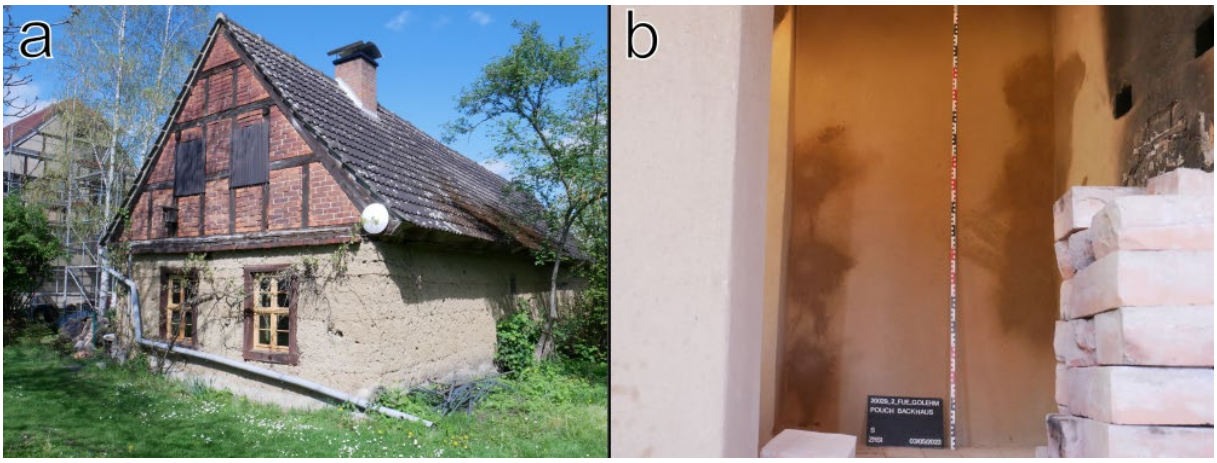


Abbildung 4: Objekt B (Backhaus Pouch); (a) Außenansicht der südlichen Fassade, (b) Innenansicht der Wand zu Profil B-1 nach Beprobung und Verputzung.

2.3 Objekt C (Gaststätte) in Halle

Das nahe der Saale in Halle gelegene Objekt C (Abbildung 5a) wurde 1811 errichtet und ehemals als Tanzlokal und Biergarten betrieben. Es ist seit einigen Jahrzehnten nicht mehr in Benutzung und weist aufgrund von Leerstand und Vandalismus starke Verfallserscheinungen auf. Nach seiner Errichtung wurde es offensichtlich mehrmals umgebaut, wobei besonders der Anbau, welcher den Tanzsaal erweitert, zu erwähnen ist. Das Hauptgebäude verfügt über drei Stockwerke, die teils noch mit Fenstern ausgestattet und teils mit Holzplatten vernagelt sind. Die Außenfassade wie auch die Innenräume sind verputzt, wobei im Innenraum teils Holzvertäfelung bis zu etwa 1 m Höhe die Wände bedecken. Das Gebäude wurde ausgewählt, um neben dem Einfluss von urbanen Luftschadstoffen, den Einfluss von Tabakrauch auf die PAK-Akkumulation in den Lehmwänden zu überprüfen. Im Vorraum des Tanzsaals sowie im Tanzsaal (Abbildung 5b) selbst wurde jeweils eine Wand beprobt (1x3-Horizont). Darüber hinaus wurde eine Mischbodenprobe im Garten nördlich des Hauptgebäudes entnommen.

Abbildung 5: Objekt C (Gasthaus Halle); (a) Außenansicht der süd-westlichen Fassade und Wand zu Profil C-2; (b) Innenansicht der Wand zu Profil C-2 nach Beprobung.

2.4 Objekte D (Utzberger Hof) und E (Haus Abtsbessingen) in Hohenfelden

Die Objekte D und E sind im Freiluftmuseum Hohenfelden nahe Erfurt lokalisiert. Das Museum, 1979 gegründet, umfasst etwa 30 begehbare historisch-ländliche Bauwerke aus dem Raum Thüringen. Wie auch die anderen Gebäude befanden sich D und E ehemals andernorts und wurden unter anderem zur Rettung vor Abriss auf das Museumsgelände umgesetzt. Dabei ist anzumerken, dass im Laufe dieser Umsetzungsprozesse die Gebäude stückweise dekonstruiert, transportiert und modular auf dem Museumsgelände wieder zusammengesetzt wurden. Neben dem teilweisen Austausch von Modulen kann es dabei nach Wiederaufbau während der Renovierungs- und Restaurierungsarbeiten zu invasiven Eingriffen gekommen sein. Es wurden daher darauf geachtet, dass ausschließlich Wände von Gebäuden beprobt wurden, die in ihrer Ursprungsform erhalten sind. Anzumerken ist, dass die anzutreffenden Schadstoffe in den beiden beprobten Objekten aufgrund ihrer Translozierung und ihres Alters vermutlich größtenteils auf ihren Herkunftsort zurückzuführen sind. Auf die Entnahme von Bodenproben wurde daher bei beiden Objekten verzichtet.

Das ehemalige Wohnstallhaus Objekt D (Abbildung 6a) wurde 1683 erbaut und stand ehemals im Ort Utzberg im Grammetal. Vor Ort wurde das Gebäude auf einer Tafel auch mit Wohnstallhaus Hertel, vermutlich nach dem ursprünglichen Besitzer, benannt. Das heute öffentlich zugängliche, 3-stöckige Gebäude verfügt über 50 cm dicke Außenwände, die innen und außen vollständig mit Kalk verputzt sind. Charakteristisch für das Gebäude ist, dass neben einem Wohnstall ein Raum im

Erdgeschoss als „Schwarze Küche“ genutzt wurde: In dieser wurden über einer offenen Feuerstelle Lebensmittel zubereitet und geräuchert. Trotz einer im Raum verbauten Deckenluke, durch die anfallende Rauchgase entweichen konnten, kam es zu einer ersichtlichen Abscheidung von Ruß an den Wänden (Abbildung 6b). Beprobt wurde daher die Westfassade angrenzend an die Schwarzküche (5x5-Profil) zur Prüfung der PAK-Anreicherung im Wellerlehm. Außerdem wurde die Nordwand des Wohnstalls (1x3-Horizont) beprobt, um u.a. eine durch Tierhaltung induzierte Anreicherung von Schimmelpilzen zu überprüfen.

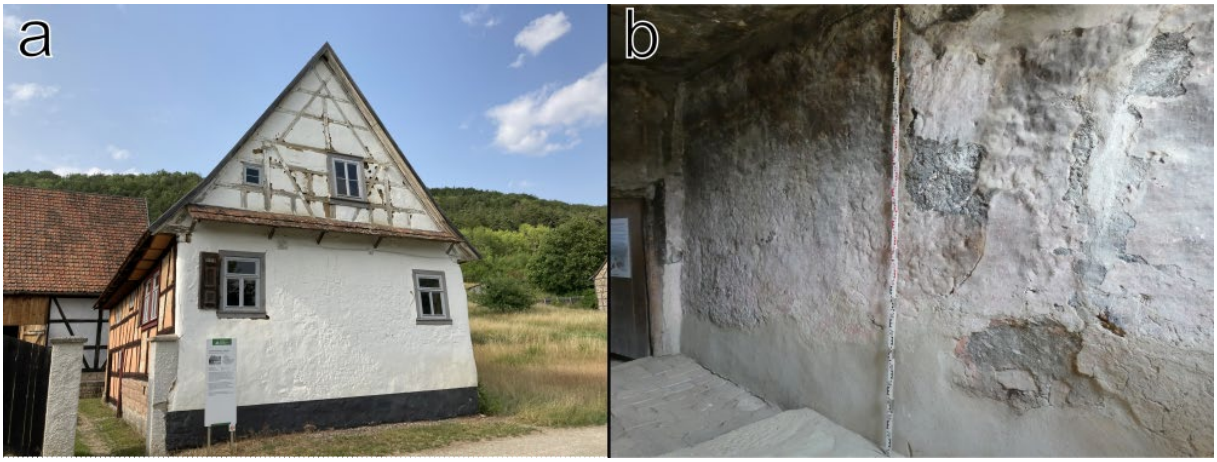


Abbildung 6: Objekt D (Utzberger Haus); (a) Außenansicht der südlichen Fassade, (b) Innenansicht der Wand zu Profil D-1 vor Beprobung.

Das Wohnhaus Objekt E (Abbildung 7a) wurde 1550 in Abtsbessingen (Kyffhäuserkreis) errichtet. Zur Zeit der Beprobung war die Translozierung des Gebäudes noch nicht abgeschlossen und war daher noch nicht für den Besucherverkehr geöffnet. Während das Erdgeschoss größtenteils aus Lehmwellerwänden besteht, sind die beiden Obergeschosse aus Fachwerk erbaut. Das Objekt wurde als Referenz zu Objekt D ausgewählt, wobei die Beprobung des Gebäudes an einer unverputzten Stelle an der Westfassade erfolgte (1x5-Horizont, Abbildung 7a und b).

Abbildung 7: Objekt E (Haus aus Abtsbessingen); (a) Außenansicht der östlichen Fassade und Wand zu Profil E-1, (b) Innenansicht der Wand zu Profil E-1 vor Beprobung.

2.5 Objekt F (Scheune) in Schleberoda

Um neben den in Objekt D entnommenen Proben den Einfluss von Tierhaltung auf die Akkumulierung von Schadstoffen zu überprüfen, wurde Objekt F in Schleberoda (Burgenlandkreis) beprobt (Abbildung 8a). Hierbei handelt es sich um einen Stall, der vermutlich 1850 errichtet wurde und bis heute in Benutzung ist. Die Scheunenfassade selbst besteht teils aus Lehmweller-, teils aus Klinkerwänden, wobei der verbaute Lehm vor Ort entnommen wurde. Neben der Beprobung des Bodens in der Aushubgrube (1x3-Horizont) wurden mehrere Proben unterschiedlicher Tiefen und Höhen der Nordwand entnommen (Abbildung 8b).

Abbildung 8: Objekt F (Bewohnter Stall in Schleberoda); (a) Außenansicht der südlichen Fassade, (b) Innenansicht der Wand zu Profil F-1 vor Beprobung.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Bodenparameter

Bodenkundliche Parameter wie Feuchte, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Glühverlust und die Korndichte (siehe 5.3.1), wurden exemplarisch für die Proben ermittelt, die auch für Schadstoffuntersuchungen ausgewählt wurden. Sie können herangezogen werden, um die Eigenschaften des Lehms zusätzlich in die Bewertung der Auswirkungen der Schadstoffsituation einbeziehen zu können. Mit dem Glühverlust wird der Anteil an organischer Substanz eines Bodens bewertet. Baulehm enthält aber normalerweise wenig Humusanteile, da er weit unterhalb des Humushorizontes entnommen wird. Der Glühverlust kann hier daher Hinweise auf erhöhte Gehalte an organischer Substanz durch Anteile an pflanzlichem Material wie z. B. Stroh geben.

Die Ergebnisse zu den bodenkundlichen Kennwerten der BAM sind in Tabelle 19 dargestellt.

Die Feuchtegehalte wurden darüber hinaus vollständig für alle Proben durch den Projektpartner ZRS mit der in der Baupraxis üblichen Methode ermittelt (s. 5.3.1.1). Die Ergebnisdaten sind unter Abschnitt 8.3 aufgelistet.

3.2 Anorganische Schadstoffe

3.2.1 Zielstellung und Probenumfang

Zur Einschätzung der Belastung von Lehmbauteilen hinsichtlich der Anreicherung anorganischer Schadstoffe wurden alle entnommenen Wand- und Bodenproben mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) [27] auf ihre elementare Zusammensetzung untersucht (Feststoffgehalte Elemente s. Tabelle 20). Zur Absicherung der semiquantitativen Röntgenfluoreszenzergebnisse wurden darüber hinaus an (auf der Basis der RFA-Ergebnisse) ausgewählten Proben Analysen nach Königswasser-Aufschluss und Messungen mittels ICP-OES (induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektroskopie) und bei niedrigen Konzentrationen teilweise ICP-MS (induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie) [28-30] durchgeführt. Hierbei wurde der Fokus auf Elemente gelegt, für die aufgrund ihrer gesundheitlichen Relevanz regulative Grenzwerte für Feststoffe in der sogenannten Mantelverordnung (Artikel Ersatzbaustoffverordnung (EBV) und Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)) festgelegt wurden (s. Tabelle 5) [21]. Diesbezüglich sind verschiedene Feststoffgehalte für die ausgewählten Elemente Arsen (As), Cadmium (Cd), Cobalt

(Co), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni), Blei (Pb), Antimon (Sb), Thallium (Tl) und Zink (Zn) aufgeführt, mit deren Hilfe eine Einordnung der zu erwartenden Schadwirkung abgeschätzt werden soll.

3.2.2 Bewertungsmaßstäbe, regulative und gesundheitsrelevante Einordnung

Die Regularien für Boden, Bodenmaterial und Ersatzbaustoffe in Deutschland sind sehr komplex, die Begrifflichkeiten mitunter für Fachfremde schwer überschaubar und ohnehin nicht generell auf Lehmbaustoffe (vgl. 1.4) übertragbar. Unter Berücksichtigung der speziellen Bau- und Nutzungssituation werden die Bewertungsmaßstäbe hier aber orientierend genutzt.

Als Bewertungsgrundlage für die Ergebnisse können auch die geogenen Hintergrundwerte (Feststoffgehalte) für Böden in Sachsen-Anhalt bzgl. Lösslehm/Löss sowie die Materialwerte für Bodenmaterial und Baggergut für Lehm und Schluff der Qualität BM-0 und die Überwachungswerte für die Güteüberwachung von Recycling-Baustoffen (Qualität RC-1) der EBV zum Vergleich mit den Feststoffgehalten der entnommenen Lehm- und Bodenproben herangezogen werden [21, 31, 32]. Während die Hintergrundwerte und Feststoffgehalte der an den Objekt-Standorten teilweise entnommenen Bodenproben als Referenzwerte verstanden werden können, soll die Überschreitung der Materialwerte als Prüfkriterium für eine eventuelle Beeinträchtigung der Wiederverwendbarkeit bei einem späteren Rückbau gesehen werden. Die Vorsorgewerte der BBodSchV (Anlage 1, Tabelle 1, [21]) sind identisch mit den Materialwerten der Qualität BM-0 in der EBV (Anlage 1, Tabelle 3, [21]).

Tabelle 5: Auflistung von Referenzwerten und Bewertungskriterien in Form von Feststoffgehalten in mg/kg.

Element		As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Tl	Zn
Hintergrundwert	**a**	13	0,19	11	48	20	0,13	28	36	-	0,4	64
Materialwert	**b**	20	1	-	60	40	0,3	50	70	-	1	150
Vorsorgewert	**c**	20	1	-	60	40	0,3	50	70	-	1	150
Überwachungswert	**d**	40	2	-	120	80	0,6	100	140	-	2	300
Prüfwert	**e**	50	20	600	400	-	20	140	400	100	10	-

Erläuterungen:
a *= Hintergrundwerte für Böden in Sachsen-Anhalt bzgl. Lösslehm/Löss Unterboden (90.P.),[31, 32]*
b *= Materialwerte für Bodenmaterial und Baggergut, EBV Qualität BM-0 für Lehm und Schluff,[21]*
c *= Vorsorgewerte für die Bodenart Lehm/Schluff, BBodSchV,[21]*
d *= Überwachungswerte (Feststoffwerte) für die Güteüberwachung von Recycling-Baustoffen, EBV,[21]*
e *= Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch bzgl. Wohngebiete, BBodSchV,[21]*

Elutionsuntersuchungen wurden nicht durchgeführt, da das Nutzungsszenario und die Bauweise von Lehmbauten grundsätzlich die Einwirkung von Niederschlags- oder Sickerwasser minimal halten, so dass ein Transfer von freigesetzten Schadstoffen auf dem Pfad Boden-Grundwasser durch die Einwirkung von Regenwasser auf Lehmbauten in der Nutzungsphase eher nicht zu erwarten ist. Materialwerte für Ersatzbaustoffe der Qualität RC-1 (beste Qualität für Recycling-Baustoffe) gibt es in der EBV nur in Form von Eluatgrenzwerten (EBV, Anlage1, Tabelle1, [21]). Für die Qualität BM-0 (beste Qualität für Bodenmaterial und Baggergut) sind zur Harmonisierung mit der BBodSchV Feststoff – und Eluatgrenzwerte vorgegeben (EBV, Anlage 1, Tabelle 3, [21]). Eluatuntersuchungen sind nach der BBodSchV aber nur dann vorgesehen, wenn die Vorsorgewerte (siehe Zeile c in Tabelle 5) zwar überschritten sind, aber unter dem Feststoffwert (i.d.R. der doppelte Vorsorgewert) bleiben (BBodSchV, Anlage 1, Tabelle 4 [21]). Dann gibt es die Möglichkeit, mit dem Nachweis der Einhaltung der Eluatwerte dennoch eine Verwertungsmöglichkeit nachzuweisen.

Die Prüfwerte der BBodSchV, Anlage 2, Tabelle 4 (Zeile e in Tabelle 5) sind für den Wirkungspfad Boden-Mensch vorgesehen (Einwirkung durch orale, inhalative Einnahme) und entsprechend als sehr streng anzusehen. Sie weisen hier lediglich darauf hin, in welche Größenordnung sich die Grenzwerte bewegen, wenn eine direkte Aufnahme von Boden durch den Menschen erfolgt und es um gesundheitsrelevante Belange geht (bei Kinderspielplätzen sind diese nochmals halbiert). Es ist aber bei Lehmbauten nicht davon auszugehen, dass dies ein relevantes Szenario ist und kommt höchstens bei der Aufbereitung von wiederzuverwendenden Lehmbaustoffen vor. Das betrifft dann aber eher den Anwendungsbereich des Arbeitsschutzes.

Im Folgenden wird überwiegend mit den Überwachungswerten der EBV verglichen, da diese bei einer Überwachung in einer Aufbereitungsanlage maßgeblich wären.

3.2.3 Ergebnisse

Die RFA-Spektroskopie an Feststoffen stellt im Vergleich zum Königswasser-Aufschluss mit anschließender ICP-OES eine einfache und schnelle Methode zur Bestimmung von Feststoffgehalten entsprechender Elemente dar. Jedoch sind die akquirierten Daten nur bedingt mit denen der ICP-OES vergleichbar, da sie einerseits nur eine semi-quantitative Aussagekraft haben (durch Matrixeffekte ist die Kalibrierung schwierig) aber andererseits die Gesamtgehalte aller Elemente wiedergibt, auch derer,

die mit Königswasser nicht extrahiert werden können (z.B. in der Matrix von Silikaten gebundene Elemente). Die RFA-Messergebnisse werden deshalb nur orientierend als Überblickanalyse von anorganischen Schadstoffbelastungen herangezogen. Die Gehalte sind in der Regel höher als die nasschemisch durch Königswasser-Aufschluss ermittelten Werte. Die in der Mantelverordnung festgelegten Werte basieren auf Königswasser-Aufschluss. Nasschemisch können Gesamtgehalte über einen Flusssäure-Aufschluss ermittelt werden, da hierbei auch Silikate aufgelöst werden. Im Regelungsbereich der BBodSchV und EBV wird bewusst auf solche Flusssäure-Aufschlüsse verzichtet, da die in Silikaten gebundenen Elemente unter Einwirkung von Wasser so gut wie nicht mobil sind und die Kenntnis zu ihrem Gehalt keinen Mehrwert für die Bewertung der Schadstofffreisetzung bringt. Dagegen sind Flusssäure-Aufschlüsse aus arbeitssicherheits- und umweltschutztechnischer Sicht nachteilig.

Bei der RFA sind für schwere Elemente wie As, Cd, Cr und Hg Einflüsse durch die leichte (Boden)-Matrix und damit „verfälschte“ (eher höhere) Messwerte zu erwarten [33]. Trotz des erhöhten Zeitaufwands wurden daher bei ausgewählten Proben (z.B. bei Überschreitung des Vorsorgewertes der Elemente Co, Cu, Ni und Zn) die mit der BBodSchV und EBV in Einklang stehenden ICP-OES/ICP-MS-Untersuchungen nach Königswasseraufschluss durchgeführt.

3.2.3.1 Erhöhte Cu- und Co-Konzentrationen in Objekt A

Die in Tabelle 20 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass für die entnommenen Lehmwandproben aller Objekte nur in Einzelfällen Überschreitungen der Grenzwerte für die angegebenen Elemente zu verzeichnen sind. Die häufigsten Überschreitungen rühren von erhöhten Cu-Konzentrationen (z.B. Überwachungswert nach EBV > 80 mg/kg). Im Besonderen ist dabei Objekt A zu nennen, für welches das Wandprofil bzgl. Cu für die Innenwand basierend auf Königswasseraufschluss/ICP-OES-Ergebnissen in Tabelle 6 dargestellt ist. Hierbei zeigten 7 der 20 untersuchten Proben Überschreitungen des Überwachungswertes. Die maximale Konzentration wurde für A-1-3-2 mit 330,5 mg/kg ermittelt, was somit dem ~4-fachen des Überwachungswertes entspricht. Anzumerken ist, dass die erhöhten Gehalte offensichtlich punktuell auftreten und mit dem Verteilungsmuster für erhöhte Co-Werte übereinstimmt, was auf einen ähnlichen Eintragspfad hindeutet.

Ein solcher punktuell erhöhter Wert wurde auch für die Probe B-1-4-2 (Backstube, 150 cm Höhe/ 7-10 cm Tiefe) beobachtet (s. Tabelle 20).

Im Vergleich zum Hintergrundwert von 20 mg/kg und den drei vor Ort entnommenen Bodenproben, welche Feststoffgehalte von <10 mg/kg aufweisen, erscheinen die Gehalte signifikant erhöht. Es kann daher angenommen werden, dass der Baustoff für die Gebäude A und B aus einer mit Cu-kontaminierten Lehmquelle entnommen wurde. Möglich wäre z.B. die Entnahme aus Lehmgruben, die durch die mit der Mulde schon in der Historie verlagerten Belastungen aus dem sächsischen Bergbau kontaminiert wurden (vgl. Abbildung 1) [34].

Tabelle 6: Profildarstellung der Cu-Feststoffgehalte für Profil A-1 in mg/kg. Bestimmt mittels ICP-OES nach Königswasseraufschluss.

A-1-y-z	z=	1	2	3	4	5
y=	cm	0-3	7-10	23,5-26,5	40-43	47-50
4	230	94,1	69,0	29,4	42,0	73,5
3	150	111,5	330,5	103,9	66,5	96,4
2	110	76,7	161,1	27,7	54,7	31,9
1	70	37,4	47,6	38,0	102,9	26,1

3.2.3.2 Erhöhte Cr-, Ni- und Cu-Konzentrationen in Objekt D

Ein Großteil der RFA-Daten für das Objekt D weist relativ zu den Daten der anderen Objekte erhöhte Cr und Ni Gehalte auf. Für die insgesamt 27 aus zwei Wänden entnommenen Proben ergibt sich im Durchschnitt ein Cr-Gehalt von ~70 mg/kg und ein Ni-Gehalt von ~45 mg/kg. Anzumerken ist, dass das Haus transloziert wurde und dessen vorheriger Standort in Utzberg (Thüringen) westlich von Erfurt lokalisiert war. Die Hintergrundwerte für diese Region können bis zu 50 mg/kg (Unterboden, 90.P.) für Cu bzw. Ni betragen. Lokal erhöhte geogene Hintergrundgehalte in der Region des ehemaligen Standorts bzw. der Lehmentnahmestelle könnten somit Ursache für die erhöhten Feststoffgehalte sein [35, 36].

Die Messwerte für die zwei Proben (D-1-1-2 und D-1-1-3) mit den höchsten Gehalten wurden mittels ICP-OES validiert, wobei im Gegensatz zu den RFA-Ergebnissen keine Überschreitung für die Überwachungswerte bzgl. Cr (120 mg/kg) und Ni (100 mg/kg) festgestellt werden konnten. Jedoch zeigt Probe D-1-1-2 mit einem Cu-Gehalt von 164,3 mg/kg eine doppelte Überschreitung des Überwachungswertes. Beim Vergleich der Verteilungsmuster von Cr und Ni (RFA-Daten) im Wandprofil wird erkenntlich, dass die erhöhten Gehalte knapp oberhalb des Wandsockels auftreten (Tabelle 7 und Tabelle 8). Ein Erklärungsansatz hierfür wäre, dass es in Anbetracht des Alters des Hauses (Baujahr ~1550) zur Mobilisierung der erwähnten Elemente in der Wand kam

und diese im Laufe der Zeit allmählich am tiefsten Punkt der Lehmwand akkumulierten [37].

Tabelle 7: Profildarstellung der Cr-Feststoffgehalte für Profil D-1 in mg/kg. Bestimmt mittels RFA.

D-1-y-z	z=	1	2	3	4	5
y=	cm	0-3	6-11	23-27	39-44	47-50
5	213	60,4	88,9	82,9	79,1	61,3
4	133	58,5	66,7	83,3	74,7	52,5
3	93	68	62,9	65,1	71,9	71,5
2	53	69,2	70,1	62,7	62,8	61,7
1	13	21,4	96,9	134,1	n.b.*	47,6

** n.b.= nicht bestimmt*

Tabelle 8: Profildarstellung der Ni-Feststoffgehalte für Profil D-1 in mg/kg. Bestimmt mittels RFA.

D-1-y-z	z=	1	2	3	4	5
y=	cm	0-3	6-11	23-27	39-44	47-50
5	213	43,4	49,6	48,1	43,8	41,3
4	133	38,6	44,7	42,3	42,2	35,7
3	93	44,2	45,9	44,6	46,7	42,2
2	53	37,9	47,9	45	44,1	41,6
1	13	21,9	78,4	86,5	n.b.*	36,1

** n.b.= nicht bestimmt*

3.2.3.3 Einfluss von externen Quellen auf die As, Zn, Pb und Cu Akkumulation

Die RFA- und ICP-OES-Ergebnisse belegen, dass in keiner der analysierten Lehmproben Überschreitungen für die Überwachungswerte von As, Pb und Zn auftraten. Die erhöhten Gehalte für Zn und Pb in den Bodenproben sind vermutlich auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen [38, 39]. Sie geben jedoch Aufschluss darüber, dass derartig erhöhte Gehalte im Ober- und Unterboden offenbar keinen Einfluss auf die Akkumulation kritischer Metalle auf die angrenzenden beprobten Objekte hatten. Ähnliches kann für Probe C-2-1-1 gesagt werden. Hierbei handelt es sich um Putz (vermutlich Kalkputz), der im Inneren auf die Oberflächen der Lehmwände aufgetragen wurde. Die RFA-Ergebnisse zeigen, dass die Gehalte für As (76,3 mg/kg), Cu (105,6 mg/kg) und Zn (539,6 mg/kg) die Überwachungswerte überschreiten. Die erhöhten Gehalte sind womöglich auf Wandfarbe oder Insektizide zurückzuführen [40]. Die direkt unter der Putzschicht entnommene Probe C-2-1-2 zeigt keine erhöhten Gehalte hinsichtlich der genannten Elemente, was unterstreicht, dass keine Migration der Elemente vom Putz in die Lehmwand erfolgte.

3.2.3.4 Bewertung der RFA-Ergebnisse für Sb, Tl, Hg, Cd

Wie bereits eingangs erwähnt, können bei der Quantifizierung mittels RFA für bestimmte Metalle aufgrund niedriger Detektionsgrenzen und anderer Faktoren verfälschte und damit erhöhte Wert für die Elemente Cd, Hg, Sb und Tl auftreten. Die zur Absicherung vorgenommenen ICP-OES Untersuchungen zeigen lediglich für Cd in einigen Lehmproben aus Objekt A Werte über der Bestimmungsgrenze mit einem Maximum für Probe A-1-3-3 von 0,4 mg/kg was etwa dem Doppelten des Hintergrundwertes entspricht. Zurückzuführen sind die leicht erhöhten Feststoffgehalte womöglich wie die von Cu und Co (vgl. Kapitel 3.2.3.1), auf Altlasten, die durch die Mulde aus sächsischen Bergbauregionen eingetragen wurden [11].

3.3 Bauschädliche Salze (ZRS)

3.3.1 Zielstellung und Probenumfang

Mit der in 5.1.1 beschriebenen Vorgehensweise wurden Profilproben aus den ausgewählten Wellerlehmwänden entnommen (s. 6.1.). Somit können Feuchteverlauf und Salzbelastung nicht nur in der vertikalen Achse, sondern auch in horizontaler Richtung abgebildet werden.

Alle Ergebnisse, Darstellungen sowie Details zur Beprobung und Probenbezeichnung der jeweiligen Objekte sind den Anlagen unter Abschnitt 8.3 zu entnehmen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse, Tendenzen und Bewertungen genannt.

3.3.2 Bewertung der Ergebnisse nach WTA-Merkblatt

Im Folgenden wird die durch den Projektpartner ZRS vorgenommene Bewertung der Ergebnisse für die bauschädlichen Salze, geordnet nach den beprobten Objekten, dargestellt.

A – Wellerscheune in Pouch

Achse I, Innenwand, EG: Vorherrschend ist eine Nitrat- und Chlorid-Belastung. Eine Sulfat-Belastung oberhalb der Nachweisgrenze der Analysemethode konnte nicht festgestellt werden.

In allen beprobten Höhen von 70 bis 230 cm ist eine mittlere (Höhe 70-110 cm) bis hohe Belastung (Höhe 110-230 cm) nachgewiesen. Dabei befinden sich

ungewöhnlicherweise höhere Konzentrationen im Inneren der Wand, im Vergleich zur Oberfläche, mit tendenziell höheren Werten Richtung Stallseite der Wand. Die Probe A-4-1 in 230 cm Höhe/0-3 cm Tiefe kann als Referenzprobe/Nullprobe (vergleichsweise gesunde Probe) angenommen werden. Generell wird beobachtet. dass die Belastung nach oben hin abnimmt. Dies wird auch durch die haptische Untersuchung des Bohrmehls und der entnommenen Lehmbröckchen gestützt: in Höhe 70 cm und 110 cm wirkt das Material mürbe. Ab 150 cm wird das Material fester. Die vorhandene mittlere Chlorid-Belastung ist nur in 70 cm Höhe ausgeprägt und nimmt nach oben deutlich und schnell ab. Es gibt hier eine Tendenz zur höheren Belastung in der Mitte der Wand. Es wurden keine Feuchtegehalte ermittelt, aber es kann von einer hygroskopisch erhöhten Eigenfeuchte ausgegangen werden.

Ursächlich für Nitrate ist primär eine frühere Stallnutzung. Die Chloridgehalte sind möglicherweise auf Tausalz oder Lecksteine der Stallnutzung zurückzuführen. Weitere mögliche Quellen werden in Kapitel 3.1 beschrieben. Für eine genauere Bestimmung sind Kationen sowie Bau- und Nutzungsgeschichte zu untersuchen. Ein geprüfter Bauplan von 1912 liegt vor.

Achse II, Außenwand, EG: Die Probe A-5-1 unter dem Traufbereich zeigt eine mittlere Sulfat-Belastung, ausschließlich im zum Außenbereich weisenden Wandbereich. Dies lässt sich einwandfrei auf die frühere Bewitterung von schwefelhaltigem, sauren Regen zurückführen. Eine Reaktion mit dem natürlichen Kalkgehalt im Lehm resultiert in der Bildung von Calciumsulfat (Gips).

B – Backhaus in Pouch

Insgesamt ist zu verzeichnen, dass hier ein Wellerlehmbau (Fertigstellung im Jahr 1847) mit hohem Strohanteil beprobt wurde, welches auch hauptsächlich gesund gelb in Erscheinung trat. Weiterhin wurde beim Beproben eine grundsätzlich eher trockene Bausubstanz wahrgenommen.

Achse I, Innenwand, EG: Die Entnahme-Feuchtegehalte der Innenwand sind allgemein im üblichen Bereich von 0,8-1,5 Masse-%, bzw. gelegentlich nur leicht darüber. In den Höhen 30 und 70 cm in den Tiefen 24–26 cm, 10–7 cm und 3–0 cm Richtung Schuppen, korrespondieren erhöhte hygroskopische Feuchte mit den ermittelten Salzgehalten. Dabei ist die gemessene Nitratbelastung bei 30 cm hoch und

bei 70 cm mittel. Wandaufwärts nimmt sie rapide ab. Generell gibt es eine stärkere Belastung im unteren Wandbereich, der Richtung Schuppen zeigt. Dies ist möglicherweise auf eine frühere Stallnutzung zurückzuführen.

Da kein signifikantes Gefälle von 23°C/ 80 % rLF zur Entnahmefeuchte erkennbar ist, ist auch auf eine geringe Anwesenheit von aufsteigender Feuchte zu schließen. Es ist und war keine künstliche Verdunstungssperre vorhanden. Generell ist keine weites „Hochsteigen“ von Feuchte und Salzen ablesbar. Die Referenzprobe/Nullprobe kann etwa bei 150 cm Höhe und 24-26 cm Tiefe angenommen werden.

Achse II, Außenwand, EG: Die Ergebnisse der Proben der Außenwand unter dem Traufbereich zeigen eine geringe Sulfat-Belastung bei der bewitterten außenliegenden Zone. Dies lässt sich einwandfrei auf die frühere Bewitterung von schwefelhaltigem, sauren Regen zurückführen. Eine Reaktion mit dem natürlichen Kalkgehalt im Lehm resultiert in der Bildung von Calciumsulfat (Gips).

C – Gaststube in Halle

Achse I, Innenwand, EG: Die exemplarisch beprobte Innenwand in der Höhe von 150 cm in drei Tiefen zeigt ein Vorkommen von allen drei Anionen Typen (Chlorid, Nitrat und Sulfat), deren Werte jeweils nach außen hinzunehmen. Die Entnahmefeuchte ist raumseitig etwas erhöht und die hygroskopisch erhöhte Eigenfeuchte tritt bei Probe C-1-1 (0-3 cm) am stärksten in Erscheinung und korrespondiert mit der zunehmenden Anionenkonzentration vom Kern in Richtung raumseitiger Wandoberfläche. Generell ist weniger aufsteigende Feuchte, dafür stärker hygroskopische Feuchte, durch Salzbelastung vorhanden. Es konnte auch relativ bräunliches, also weniger intaktes Stroh beobachtet werden. Eine mittlere Sulfat-Belastung ist oberflächlich vorhanden, und auf eine Belastung aus dem Raum zurückzuführen. Die hohe Nitrat-Belastung ist in allen drei Tiefen messbar und auf sich eventuell in der Nähe befindlichen Toiletten zurückzuführen. Die Chlorid-Belastung ist in 0-3 cm und 7-10 cm hoch und im Kern bei 24-26 cm mittel. Die Herkunft ist unklar, evtl. könnte Reinigung ursächlich sein. Dazu sind Kationen sowie Bau- und Nutzungsgeschichte zu unter-suchen.

Achse II, Außenwand, EG: Niedrigste Feuchtegehalte, korrelieren mit den mit der angewendeten Methode nicht messbaren Salzbelastung. Die Proben und Bohrlöcher

haben Sicht frei, auch gelbes, gesundes Stroh sowie zahlreiche Kaolin-„Spatzen“/Brocken in der Wellerlehm-Mischung.

D-1 – Schwarze Küche im Utzberger Hof in Hohenfelden

Achse I, Außenwand, EG: Die teils stark erhöhten Feuchtegehalte bei 23°C/80 % rLF sind auf eine erhöhte hygroskopische Feuchte zurückzuführen, vor allem bei den Proben D-1-5 bis 2-5 (also v. a. in der Höhe 53 cm in allen Tiefen). Die Nitrate (hohe Belastung) mit Spitzenwerten mittig im Wandinnern sind möglicherweise durch Feuchtetransport im Erdreich vom nahegelegenen Stall zu den Wänden der Küche gelangt. Ursächlich für die mittlere Sulfat-Belastung der Außenwand in 213 cm Höhe und 0-3 cm Tiefe ist evtl. die Nutzung als Küche (Herkunft Name „schwarze Küche“). Im hoch gelegenen Abzug könnten sich Rauchgase konzentriert haben. Die mittlere Sulfat-Belastung auf der anderen Wandseite (außen) in den Höhen 53 cm, 133 cm und 213 cm, ist evtl. auf eine Exposition in belastender Umgebungsluft zurückzuführen. Eine Chlorid-Belastung ist in 53 cm Höhe in allen Tiefen außer oberflächlich innenwändig erkennbar, zunehmend in Richtung Außenbereich. Als Referenz-probe/Nullprobe kann die Probe D-5-3 (Höhe 133-213 cm und 24-26 cm Tiefe) angenommen werden.

Bei diesem Objekt (Baujahr 1683) ist die Verteilungen der bauschädlichen Salze tendenziell willkürlich, ungleichmäßig und meist ohne einen erkennbaren sinnvollen Verlauf, sowohl in senkrechter als auch in waagerechter Richtung. Die Zusammen-hänge zwischen Bauteil, Umgebung und Nutzung sind somit schwer deutbar. Daher sind besonders hier Bau-/Nutzungs- und Standortgeschichte zu recherchieren. Relevant ist hierbei die vermutlich um 1999 durchgeführte Translozierung von Utzberg nach Hohenfelden und ob und wie die bauschädlichen Salze, vor oder während Translozierung in das Gebäude gelangt sind. Möglicherweise können Lücken in der Anionenverteilung auf großflächige Reparaturen zurückzuführen sein.

D-2 – Stall im Utzberger Hof in Hohenfelden

Achse II, Außenwand, EG: Bei der exemplarisch beprobten Höhe von 100 cm ist eine deutlich erhöhte hygroskopische Feuchte und auch aufsteigende Feuchte in der

Außenwand messbar. Die mittlere Chlorid-Belastung verhält sich in allen drei Tiefen relativ gleichmäßig. Tausalze, Lecksteine und sonstige Quellen können Ursache sein. Der Nitratgehalt steigt von der Wandoberfläche in Richtung Kern an und ist nutzungsbedingt (Stallnutzung) hoch.

E – Haus Abtsbessingen in Hohenfelden

Achse I, Außenwand, EG: Die Nitrat-Belastung der Außenwand ist insgesamt mittel bis hoch. Raumseitig ist sie in den Tiefen 0-3 cm, 7-10 cm und 24-26 cm mittel und relativ gleich stark, dann aber Richtung Außenseite der Wand (10-7 cm und 3-0 cm) hoch. Wobei die Belastung dabei an der Oberfläche geringer ist. als im Innern. Dazu gibt es eine mittlere Chlorid-Belastung in eben diesem Bereich, mit relativ gleichen Ergebniswerten. Gleichzeitig konnte dazu eine korrespondierende erhöhte hygroskopische Feuchte ermittelt werden. Generell könnte die stärkere Belastung an der Außenseite (Umgebung) darauf zurückzuführen sein, dass die gelösten Salze aus der Mitte der Wand eher Richtung belüftetet Außenseite transportiert werden. Evtl. ist die Raumluft gesättigter, weswegen die Salze in Richtung der ungesättigten Außenluft „ziehen“, da dort ein günstigerer Verdunstungshorizont gelegen ist.

Das Haus mit einer Bauzeit um das Jahr 1550 könnte evtl. als Stall genutzt worden sein. Die genaue Bau-/Nutzungs- und Standortgeschichte ist zu klären.

F – Stall (aktiv) in Schleberoda

Achse I, Innenwand, EG: Die untersuchten Proben aus den Höhen 100 cm und 200 cm OKS weisen eine übliche/moderate Entnahmefeuchte auf. Es konnten effektiv keine problematischen Salzgehalte festgestellt werden. Die ermittelten Werte liegen an/unter der Nachweisgrenze der hier verwendeten Analysemethode. Insgesamt ist dies ein ungewöhnliches Untersuchungsergebnis für eine aktive Stallnutzung. Evtl. ist eine Horizontalsperre verbaut (worden), die den Eintrag von aufsteigender Feuchte verhindert und damit die Mobilisierung von bauschädlichen Salzen. Da praktisch keine Salzbelastung vorhanden ist, ist auch keine hygroskopische Erhöhung der Eigenfeuchte möglich. Hier ist wieder die Recherche zur Bau- und Nutzungsgeschichte sinnvoll.

3.3.3 Bewertung der Rezyklierbarkeit

Mit der Betrachtung aller Analyseergebnisse (Anionenkonzentration und Feuchtegehalt) und der visuellen Begutachtung von Probematerial zum Zustand von Gefüge und Stroh, wird nachfolgend die Eignung der untersuchten Bauteile für eine Rezyklierung beurteilt.

Interessant ist, dass sich die Salze bei den meisten Probeachsen augenscheinlich im Innern aufkonzentrieren und bei den entsprechenden Klimata bereits dort auskristallisieren (Subfloreszenz, unter der Oberfläche). Den grundsätzlich üblicheren Fall mit Schwerpunkt und sog. Salzausblühungen an der Oberfläche (Effloreszenz) ist in der gegenständlichen Untersuchung die Seltenheit. Damit kann im Rückbau in Hinblick auf eine Wiederaufbereitung aber auch nicht die obere Schicht entfernt und nur der Kern verwendet werden. Letztendlich muss der höchste Anionengehalt pro horizontale Ebene als Bewertungsmaßstab dienen. Bei der Wiederverwendung wird technisch bedingt vermutlich nur satzweise gearbeitet. Das Trennen von Weller-Sätzen im Rückbau ist technisch in aller Regel (zu) aufwändig.

In Ermangelung an Grenzwerten für bauschädliche Salze für Wellerlehm als neuen Baustoff, werden die der anderen Lehmbaustoffe (Lehmputz, Lehmmauermörtel, Lehmsteine, DIN 18945 bis 47 [22-24] als Bewertungsgrundlage herangezogen. Speziell zu Lehmsteinen könnte rückgebauter Wellerlehm rezykliert werden.

In den Ergebnistabellen (siehe Abschnitt 8.3) sind mittlere und hohe Belastungen gelb und orange hervorgehoben. Um die Ergebnisse auch in Hinblick auf eine Wiederverwendung/Rezyklierung einzuordnen, wird zusätzlich die Summe des Anionengehaltes je Probe nach der zulässigen Gesamtmenge nach DIN 18945:2024-03 ebenfalls bewertet und entsprechend farblich hervorgehoben (s. auch Abschnitt 1.4, Tabelle 2 und Tabelle 3).

Kategorien zur Wiederverwendung

Das häufige Auftreten der sogenannten „*hohen Belastung*“ nach WTA-Merkblatt (siehe Tabelle 2) lässt zunächst nicht die Möglichkeit einer Wiederverwendung zu. Jedoch könnte der gute Zustand des beprobten Wellerlehms eine weniger strenge Sortierung zulassen. Grundsätzlich sind Lehmbaustoffe für bauschädliche Salze transportfähig (siehe Kapitel 1.3.4), sodass im Zuge einer Wiederaufbereitung schon durch die Einbaufeuchte eine Aufkonzentration von Salzen an der Oberfläche stattfinden könnte.

Prinzipiell ist dies ein Ausschlusskriterium, jedoch ist es denkbar, dass dieser ästhetische und bauliche Makel für bestimmte Nutzungsmodelle nicht oberste Priorität hat.

Daher werden im Folgenden zwei Nutzungskategorien mit den dafür vorgesehenen Grenzwerten vorgeschlagen:

Kategorie	Beschreibung	Zugeordnete Grenzwerte
„Stall/Scheune“	Nutzung als Stall, Scheune, Garage und sonstige Nebengebäude	Einzelwerte von Nitrat, Sulfat, Chlorid im Bereich „Belastung mittel“, nach WTA siehe Tabelle 1
„Wohnen/wohnähnlich“	Nutzung als Kita/Schule/Büro/Wohnhaus, sonstige Hauptgebäude mit wohnähnlicher Nutzung	Einzelwerte und Summe von Nitra, Sulfat, Chlorid nach DIN 18945 – 47, siehe Tabelle 2

Resultierend aus den gegenständlichen Untersuchungsergebnissen werden die Bewertungen „gering“ und „mittel“ nach WTA für die Nutzungkategorie „*Stall/Scheune*“, im Falle einer Wiederverwendung des Wellerlehms, vorgeschlagen. Bauteile oder Bauteilbereiche mit Belastung „*hoch*“ werden nicht für eine Wiederaufbereitung vorgesehen und der Entsorgung zugeführt bzw. kann bestenfalls in ausreichender Entfernung von Gebäuden für die Bodenverbesserung genutzt werden, jedoch keinesfalls in Gebäuden jedweder Art. Beimischungsquoten – also die Verdünnung des salzbelasteten Materials – könnten nur für die Kategorie *Stall/Scheune* angedacht werden, da die in versalzenem Material oftmals humierten organischen Anteile schon bei geringen Beimischungsquoten für Verfärbungen und damit zu Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit in der Kategorie *Wohnen/wohnähnliche Nutzung* führen könnten.

Nach der beschriebenen Kategorisierung ergeben sich folgende Ergebnisse für die einzelnen Objekte:

A – Wellerscheune in Pouch

Achse	Probenhöhe OKFF	Entscheidende maximale Belastung nach WTA oder DIN	Nutzungskategorie bei Wiederverwendung
I	Höhe 70 und 110 cm (unterster Satz)	WTA, hoch	Keine
I	Höhe 150 und 230 cm	WTA, mittel	Stall/Scheune
II	Höhe 367 cm	WTA, mittel	Stall/Scheune

B – Backhaus in Pouch

Achse	Probenhöhe OKFF	Entscheidende maximale Belastung nach WTA oder DIN	Nutzungskategorie bei Wiederverwendung
I	Höhe 30 cm (unterster Satz)	WTA, hoch	Keine
I	Höhe 70 und 110 cm	WTA, mittel	Stall/Scheune
I	Höhe 150 cm	DIN, zulässig	Wohnen/wohnähnlich
II	Höhe 150 cm	WTA, mittel	Stall/Scheune

Bei Achse II ab Höhe 150 cm ist Wiederverwendung für die Nutzung *Stall/Scheune* möglich, da in dieser Höhe die Grenzwerte der aufgestellten Kategorie eingehalten werden. Darüber wurden keine Proben entnommen aber eine abnehmende Konzentration kann anheimgestellt werden und damit im nächsten Wellersatz *Wohnen/wohnähnliche Nutzung*. Unter 150 cm kann das Material nicht zur Wiederverwendung vorgeschlagen werden.

C – Gaststube in Halle

Achse	Probenhöhe OKFF	Entscheidende maximale Belastung nach WTA oder DIN	Nutzungskategorie bei Wiederverwendung
I	Höhe 150 cm (vermutlich 2. Wellersatz)	WTA, hoch	Keine
II	Höhe 150 cm	DIN, zulässig	Wohnen/wohnähnlich

Bei Achse I ab Höhe 150 cm ist keine Wiederverwendung möglich. für die darüberliegenden Bereiche muss die Verwendungsmöglichkeit für die anderen Kategorien noch geprüft werden. Unter 150 cm kann das Material nicht zur Wiederverwendung vorgeschlagen werden (1. und 2. Wellersatz). Bei Achse II (Saal)

kann davon ausgegangen werden, dass ab der untersuchten Höhe 150 cm eine Wiederverwendung für *Wohnen/wohnähnliche Nutzung* möglich ist, darunterliegende Bereiche sollten evtl. noch überprüft werden.

D-1 – Schwarze Küche im Utzberger Hof in Hohenfelden

Achse	Probenhöhe OKS	Entscheidende maximale Belastung nach WTA oder DIN	Nutzungskategorie bei Wiederverwendung
I	Höhe 13 bis 213 cm	WTA, hoch	Keine
I	Höhe 133 cm	WTA, mittel	Stall/Scheune

Im gesamten Höhenprofil ist punktuell sowie großräumig eine hohe Salzbelastung vorhanden, sodass keine Wiederverwendung vorgeschlagen werden kann. Einzig bei 133 cm Höhe ist evtl. eine partielle Wiederverwendung, falls technisch trennbar, möglich.

D-2 – Stall im Utzberger Hof in Hohenfelden

Achse	Probenhöhe OKS	Entscheidende maximale Belastung nach WTA oder DIN	Nutzungskategorie bei Wiederverwendung
II	Höhe 100 cm	WTA, hoch	Keine

Bei und bis zur untersuchten Höhe 100 cm ist keine Wiederverwendung möglich. Für die darüberliegenden Bereiche muss die Verwendungsmöglichkeit für die anderen Kategorien noch geprüft werden.

E – Haus Abtsbessingen in Hohenfelden

Achse	Probenhöhe OKS	Entscheidende maximale Belastung nach WTA oder DIN	Nutzungskategorie bei Wiederverwendung
I	Höhe 100 cm	WTA, hoch	Keine

Bei und bis zur untersuchten Höhe 100 cm ist keine Wiederverwendung möglich. Für die darüberliegenden Bereiche muss die Verwendungsmöglichkeit für die anderen Kategorien noch geprüft werden.

F – Stall (aktiv) in Schleberoda

Achse	Probenhöhe OKS	Entscheidende maximale Belastung nach WTA oder DIN	Nutzungskategorie bei Wiederverwendung
I	Höhe 100 und 200 cm	DIN, zulässig	Wohnen/wohnähnlich

Ab der Höhe 100 cm ist die Wiederverwendung für *Wohnen/wohnähnliche Nutzung* möglich. Der darunterliegende Bereich ist vermutlich auch für diese Verwendung geeignet.

3.4 Organische Schadstoffe

3.4.1 Zielstellung und Probenumfang

Zur Einschätzung der Kontamination der entnommenen Proben hinsichtlich organischer Schadstoffe wurden zunächst stichpunktartig einzelne Proben einem qualitativen GC-MS-Screening (Non-Target-Analytik, siehe Kapitel 5.3.5.1) unterzogen. Dieses Vorgehen ermöglichte es, eine große Bandbreite der in den entnommenen Proben enthaltenen organischen Verbindungen zu identifizieren. Bei Nachweis einzelner Substanzen, von denen entsprechend der REACH-Verordnung der Europäischen Union eine Schadwirkung ausgehen könnte, sollten diese dann nachträglich mittels externen Standard quantifiziert werden und eventuelle weitere Proben mit der Target-Analytik untersucht werden [41]. Bis auf die Gruppe der Phthalate wurden keine Verbindungen mit einem kritischen Feststoffgehalt identifiziert, die eine weitere Quantifizierung notwendig erscheinen ließen.

Die Objekte B, C und D wurden hingegen im Vorhinein zur Probenahme und Target-Analytik ausgewählt, da hier der Verdacht bestand, dass durch Rauchgaseintrag eine Kontamination von Lehmbauteilen durch PAK stattgefunden hat. Für diese Stoffgruppe ist ein Materialwert für den Gesamtgehalt (Summe aus 16 Leitsubstanzen nach US-EPA, [42]), die sogenannten PAK_{16} (vgl. Tabelle 23), sowie darüber hinaus ein Prüfwert für die Einzelsubstanz Benzo[a]pyren durch die Mantelverordnung festgelegt [21], das als besonders krebserregend gilt. Für die entsprechenden ausgewählten Objekte wurden zunächst stichprobenartig die PAK-Konzentrationen einzelner Proben mithilfe eines internen Standards aus dem Extrakt für das organische Screening bestimmt und dann bei Nachweis erhöhter Konzentrationen weitere neu

aufgeschlossene Proben (siehe Kapitel 5.3.5.2) analysiert. Hierdurch sollte mittels der Erkennung von Verteilungsmustern das Ausmaß der Akkumulation von PAK in Wandprofilen ermittelt und eine mögliche von kontaminierten sekundären Lehmbaustoffen ausgehende Schadwirkung untersucht werden. Für die Einschätzung des Schadstoff-Levels und als Referenz wurden für die Bewertung der Ergebnisse neben den Material- und Prüfwerten aus der Mantelverordnung die entsprechenden Hintergrundwerte in Böden und die PAK-Konzentrationen der vor Ort entnommenen Bodenproben berücksichtigt [21]. Hierbei ist anzumerken, dass der Vergleich mit Hintergrundwerten in Böden, die beispielsweise für das Land Sachsen-Anhalt vorliegen („Acker“: Gesamtgehalt PAK_{16} 0,289 mg/kg und für Benzo[a]pyren 0,016 mg/kg) nur im begrenzten Maße herangezogen werden kann, da diese lediglich für Oberböden mit zumeist abweichenden Eigenschaften vorliegen [31, 32].

3.4.2 Ergebnisse GC-MS Screening

Ein Screening hinsichtlich organischer Schadstoffe mittels GC-MS wurde an insgesamt 51 der entnommenen Proben durchgeführt. Bis auf bestimmte Proben, bei denen PAK und Phthalate (siehe Kapitel 3.4.3 und 3.4.4) nachgewiesen wurden, traten Schadstoffe, die nach der REACH Verordnung als bedenklich einzustufen sind, nur in Spuren auf. Zu erwähnen wäre das Auftreten der gesundheitsschädlichen Verbindung Hexachlorbenzol (HCB) in einer Probe aus Pouch (A-1-1-5), für die eine Grundkontamination in Bitterfeld detektiert wurde [43].

Der Großteil der in den Lehmproben nachgewiesenen organischen Verbindungen ist hingegen natürlichen Ursprungs und geht auf Inhaltsstoffe der verbauten organischen Additive (z.B. Stroh) bzw. Metabolisierungsprodukte von Mikroorganismen zurück. So zeigen die aufgenommenen Chromatogramme häufig ähnliche Muster, die auf Spuren wiederkehrend anzutreffender Verbindungen bzw. Verbindungsklassen zurückzuführen sind. Das in Abbildung 9 exemplarisch dargestellte Chromatogramm ist beispielsweise einer Wandprobe aus dem Haus aus Abtsbessingen (Objekt E) in Hohenfelden zuzuordnen (E-1-15). Neben einem Lösungsmittelblindwert für 2,4-Di-tert-butylphenol, der auf Verunreinigungen des verwendeten Lösungsmittels zurückzuführen ist, sind oft anzutreffende Verbindungen wie z.B. Hexacosanal, Tetracosan und γ-Sitosterol natürliche Bestandteile von Pflanzen (vgl. Tabelle 21).

Von diesem Normalfall abweichende Peak-Muster zeigen die Chromatogramme der Proben, die aus der stark verrußten Wand der Schwarzen Küche im Haus Utzberger

Hof entnommen wurden. Das in Abbildung 10 dargestellte Chromatogramm ist beispielsweise der Probe D-1-5-2 zuzuordnen. Neben Naturstoffen wie Tetracosan wird es vor allem von Peaks dominiert, die auf adsorbierte Rauchgasbestandteile zurückzuführen sind (vgl. Tabelle 9). Ein Großteil dieser Verbindungen sind dabei der Stoffgruppe der PAK mit prominenten Vertretern wie Pyren oder Fluoranthen zuzuordnen. Die Ergebnisse der Quantifizierung dieser Verbindungen werden im folgenden Kapitel erläutert.

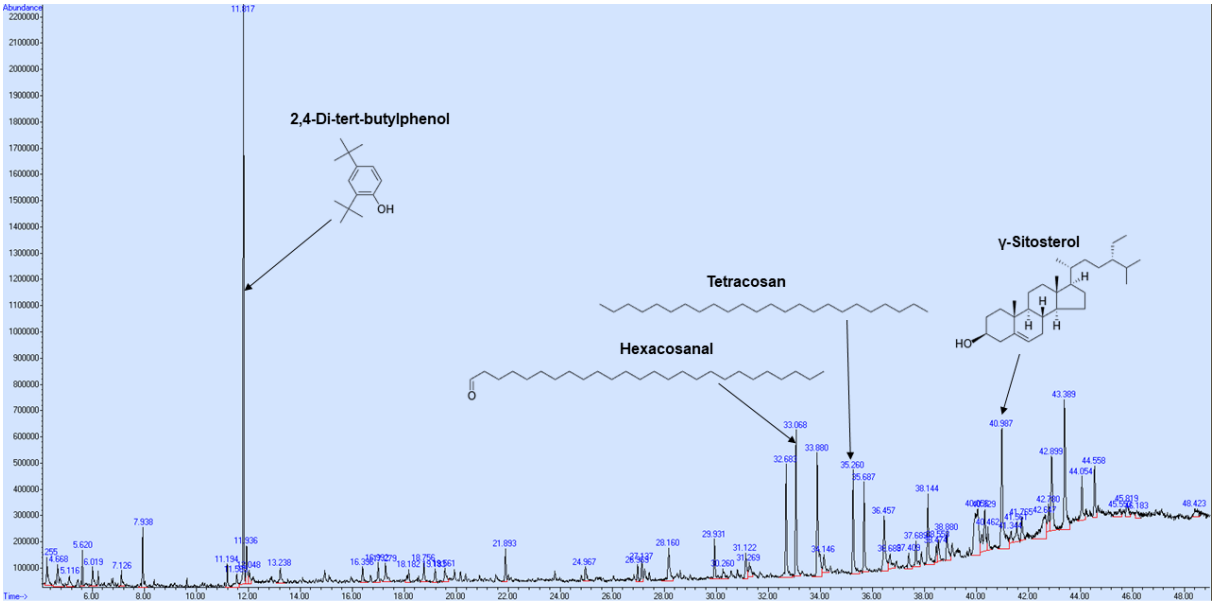


Abbildung 9: GC-MS-Chromatogramm zu Probe E-1-1-5. Die einzelnen Peaks entsprechen den detektierten organischen Substanzen im DCM-Extrakt.
Anmerkung: 2,4-Di-tert-butylphenol ist ein Blindwert. Eine Auflistung mit Zuordnung ist in Tabelle 20 dargestellt.

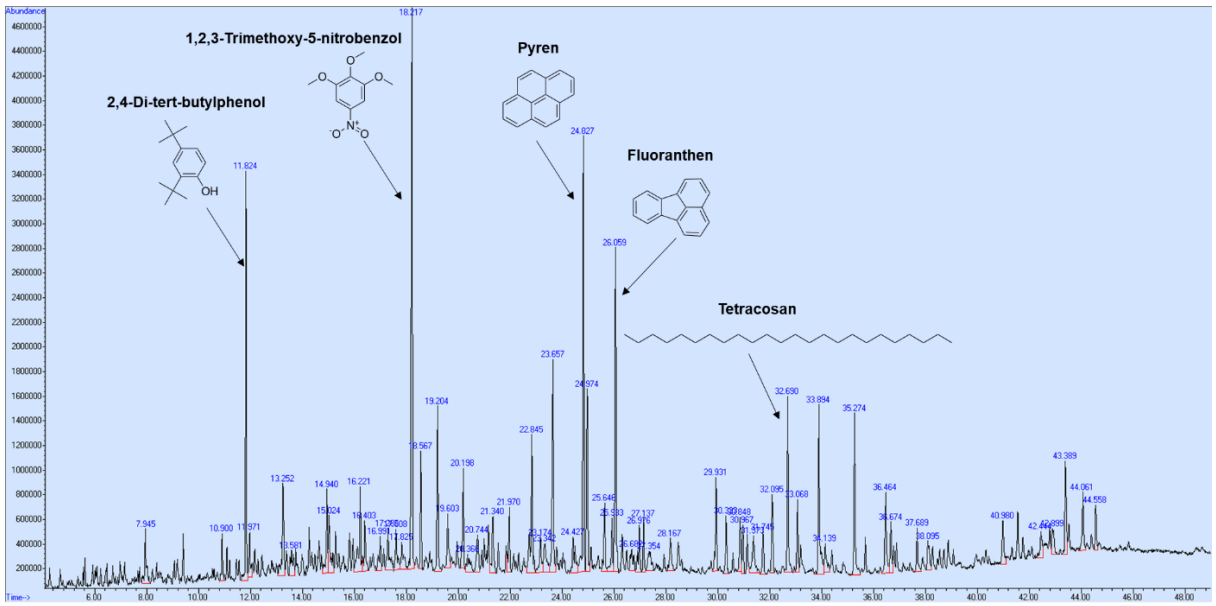


Abbildung 10: GC-MS-Chromatogramm zu Probe D-1-5-2. Die einzelnen Peaks entsprechen den detektierten organischen Substanzen im DCM-Extrakt.
Anmerkung: 2,4-Di-tert-butylphenol ist ein Blindwert. Eine Auflistung mit Zuordnung ist in Tabelle 21 dargestellt.

3.4.3 Ergebnisse der PAK-Quantifizierung mittels GC-MS

Insgesamt wurden die PAK-Feststoffgehalte von 49 Wand- und Bodenproben ermittelt (Tabelle 24). Überschreitungen des Materialwertes (3 mg/kg, Qualität BM-0 der EBV) hinsichtlich des Gesamtgehaltes an PAK_{16} wurden an zwei Proben festgestellt, der Bodenprobe B-3-1-1 bei Objekt B (4,57 mg/kg) und der Wandprobe D-5-1 aus der Schwarzküche von Objekt D (7 mg/kg). Für Benzo[a]pyren wurde für keine der Proben eine Überschreitung des Materialwertes (0,3 mg/kg) sowie des Prüfwertes (1 mg/kg) festgestellt.

In Tabelle 9 ist das Wandprofil der PAK_{16}-Summenkonzentrationen für die Schwarzküche in Objekt D dargestellt. Anzumerken ist, dass trotz des Alters der Wand und der längeren seit der letzten Nutzung der Küche vergangenen Zeit noch relativ hohe PAK_{16}-Konzentrationen für die einzelnen beprobten Wandsegmente nachweisbar sind. In Anbetracht der Halbwertszeiten für höhermolekulare PAK wie z. B. Pyren von bis zu 5 Jahren in lehmigen Böden könnte dies auf eine eingeschränkte mikrobiologische Aktivität hinsichtlich des Abbaus von PAK in den Lehmwänden hindeuten [18], die auch durch die begrenzte Feuchte nicht sehr hoch sein dürfte. Bezüglich des Verteilungsmusters der Gesamtgehalte zeigt sich für die Objekte D und B (Tabelle 10) eine Zunahme mit steigender Wandhöhe und eine Abnahme mit zunehmender Wandtiefe. Die höhenbedingte Zunahme der Gesamtgehalte kann durch die bei offenem Feuer auftretende Akkumulation von Rauchgasen in Deckennähe erklärt werden. In der Schwarzküche von Objekt D wird dies besonders an der vertikalen Zunahme von schwarzen Rußablagerungen an der Wandoberfläche deutlich (Abbildung 6B). Die Abnahme der Gesamtgehalte mit zunehmender Wandtiefe folgt einem weitestgehend linearen Verlauf, wobei der Stofftransport horizontal zu erfolgen scheint. Die sehr niedrigen Gehalte nahe der Außenfassade deuten darauf hin, dass ein externer PAK-Eintrag nicht oder zumindest nur im geringen Maße erfolgte.

Tabelle 9: Profildarstellung der Gesamtkonzentration der PAK_{16}-Feststoffgehalte für Profil D-1 in mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard).

D-1-y-z	z=	1	2	3	4	5
y=	cm	0-3	6-11	23-27	39-44	47-50
5	225	7,00	2,47	0,91	0,60	0,11
4	145	2,09	0,89	0,28	0,12	0,09
3	105	2,32	1,00	0,15	0,06	0,04
2	65	0,78	0,07	0,10	0,07	0,05
1	25	0,06	0,05	0,01	n.b.*	0,05

** n.b.= nicht bestimmt*

Tabelle 10: Profildarstellung der Gesamtkonzentration der PAK_{16}-Feststoffgehalte für Profil B-1 in mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard).

B-1-y-z	z=	0	1	2	3	4	5
y=	cm	0 (Putz)	0-3	7-10	23,5-26,5	40-43	47-50
4	150		0,573	-	-	-	-
3	110	-	0,246	0,134	-	-	-
2	70		0,251	0,161	-	-	-
1	30		0,141	-	-	0,149	-

Das Verhältnis der einzelnen PAK in den Lehmproben zueinander zeigt, dass leichter flüchtige und wasserlösliche PAK mit einem niedrigeren Molekulargewicht (kleinere Anzahl an aromatischen Ringen) wie Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen und Fluoren nur einen sehr geringen Anteil des PAK-Gesamtgehalts ausmachen, wohingegen PAK mit mittleren Molekulargewichten wie Phenanthren, Fluoranthen und Pyren dominierend auftreten (Abbildung 11, Tabelle 23). Weitergehend sind weit toxischere PAK mit höheren Molekulargewichten wie das hoch kanzerogene Benzo[a]pyren nur zu einem geringen Anteil in den Lehmwandproben vertreten [44].

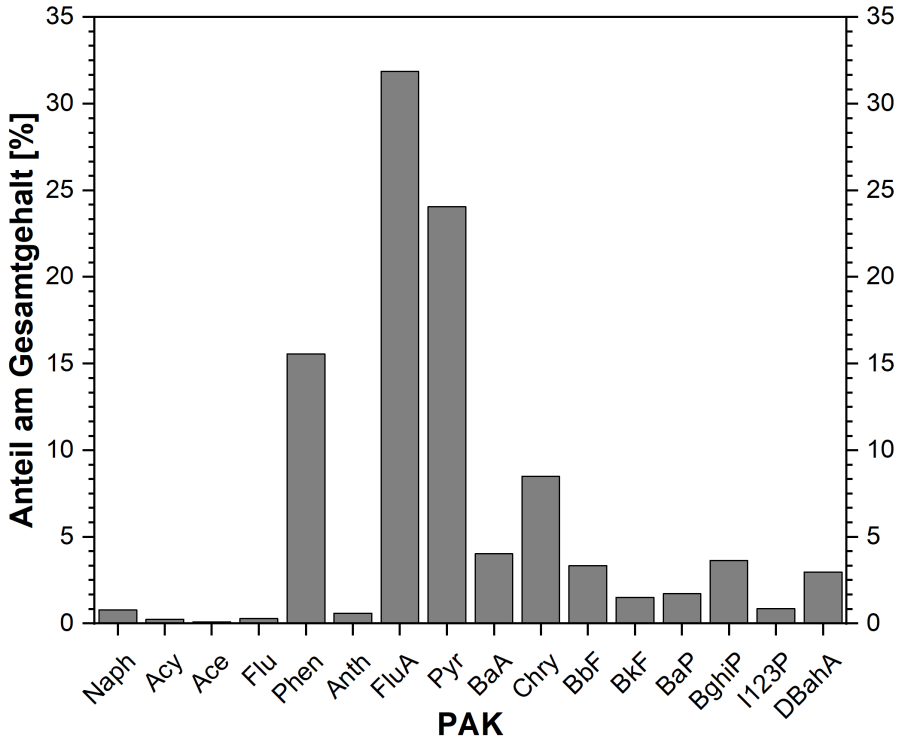


Abbildung 11: Gemittelte Feststoffanteile der PAK_{16} für Profil D-1 (Abkürzungen s. Tabelle 23).
Anmerkung: Beruhend auf Proben mit Gesamtfeststoffgehalten >0,5 mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard).

In Abbildung 12 sind die relativen Gewichtsanteile der niedrig- und höhermolekularen PAK_{16} beruhend auf den Mittelwerten für Wandproben aus Objekt D, Bodenproben der Objekte A, B und F sowie den Hintergrundwerten dargestellt. Beim Vergleich der Verteilung wird deutlich, dass die Bodenproben eine vergleichsweise stärkere Tendenz zur Adsorption von höhermolekularen PAK aufweisen. Die Gründe für das größendiskriminierende Adsorptionsverhalten des verbauten Lehms hinsichtlich höhermolekularer PAK sind mannigfaltig und können, mitunter auf dessen geringeren Anteil organischer Bodensubstanz, geringen Wassergehalt, aber auch die bevorzugte Adsorption an nicht porengängige Rußpartikel zurückzuführen sein (vgl. Kapitel 1.3) [45, 46]. Letzteres könnte auch erklären, dass für das Wandprofil der ehemaligen Schwarzküche in Objekt D mit steigender Wandtiefe eine Zunahme des Anteils an niedermolekularen PAK wie Phenanthren zugunsten einer Abnahme der höhermolekularen PAK zu verzeichnen ist (Abbildung 13). Höhermolekulare PAK neigen zu einer höheren Affinität der Bindung an organische Matrix wie Rußpartikel und weisen eine niedrigere Wasserlöslichkeit auf, so dass sie weniger mit dem Porenwasser ins Wand-

innere transportiert werden können. Insgesamt ist durch die Nutzung als Schwarzküche der Anteil der mehr kanzerogenen PAK in den Lehmproben der Wand D-1 höher im Vergleich zur Bodenprobe D und den Hintergrundwerten (s. Abbildung 14).

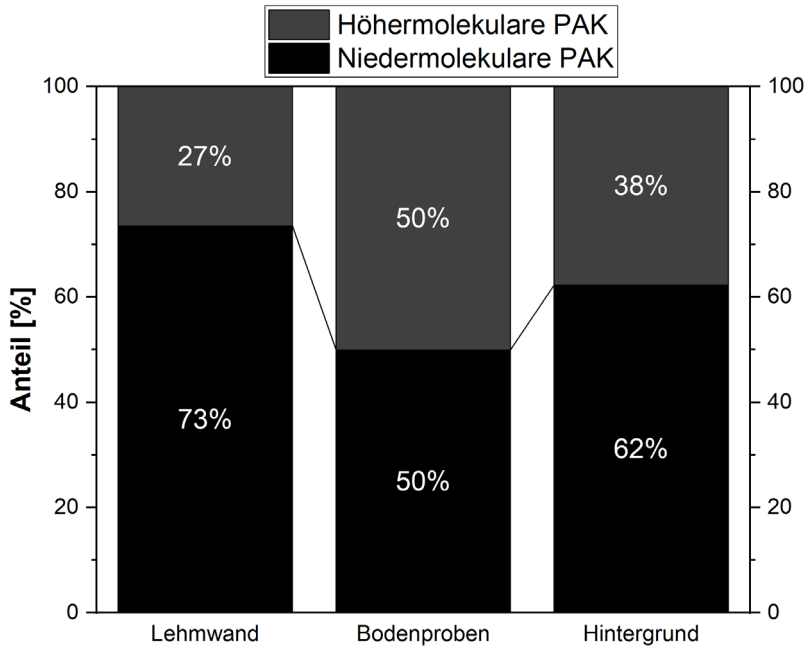


Abbildung 12: Vergleich der gemittelten Feststoffanteile nieder- und höhermolekularer PAK_{16} für Lehmproben Profil D-1, Bodenproben Objekt D und Hintergrundwerte für Oberböden in Sachsen-Anhalt [31].
Anmerkung: Beruhend auf Proben mit Gesamtfeststoffgehalten >0,5 mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard).

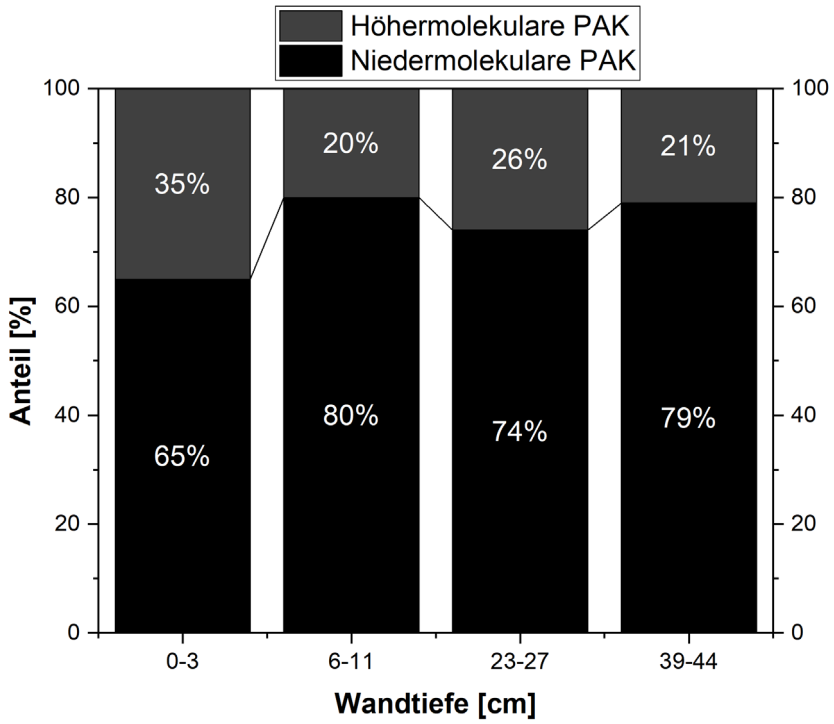


Abbildung 13: Vergleich der gemittelten Feststoffanteile niedrig- und höhermolekularer PAK_{16} mit zunehmender Wandtiefe für Horizont D-1-5.
Anmerkung: Beruhend auf Proben mit Gesamtfeststoffgehalten >0,5 mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard).

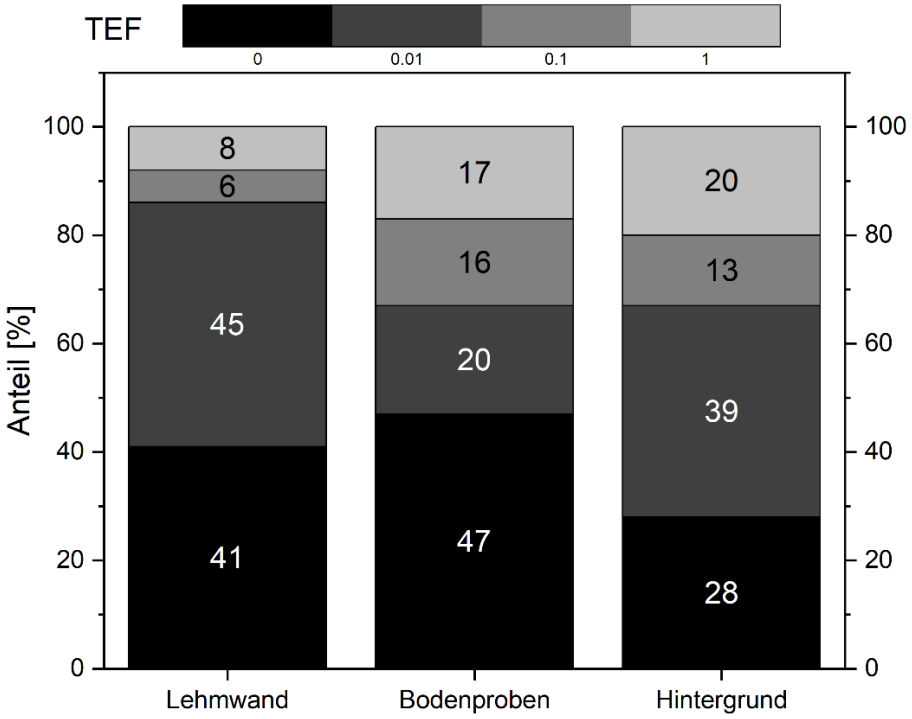


Abbildung 14: Vergleich der gemittelten Feststoffanteile der PAK_{16} eingeteilt nach Toxizitätsäquivalentfaktor (TEF, s. Tabelle 23) für Lehmproben Profil D-1, Bodenproben Objekt D und Hintergrundwerte für Oberböden in Sachsen-Anhalt [31, 44].
Anmerkung: Beruhend auf Proben mit Gesamtfeststoffgehalten >0,5 mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard).

3.4.4 Ergebnisse Phthalatquantifizierung

In einem Großteil der mittels GC-MS Screening untersuchten Boden- und Lehmproben wurden mittels externem Standard Phthalatkonzentrationen <0,2 mg/kg ermittelt. Die Bestimmungsgrenzen betrugen je nach Verbindung zwischen 0,005 und 0,01 mg/kg. Derartige Konzentrationen können durch Hintergrundbelastungen oder durch Eintrag von Kontaminationen während der Extraktion zurückzuführen sein [47]. Zu Phthalaten gibt es keine offiziell veröffentlichten Hintergrundwerte und auch in der Mantelverordnung sind keine Verbindungen der Stoffklasse reglementiert. Einzelne Studien belegen jedoch, dass sich für die relativ persistente Stoffklasse mittlerweile Hintergrundkonzentrationen in der Umwelt eingestellt haben. So wurden z.B. für Großteil der Proben von Oberböden in Fichtenforsten in Niedersachsen Feststoffgehalte von bis zu 1 mg/kg nachgewiesen oder für Schwebstoffe in der Saar Konzentrationen von ~4 mg/kg ermittelt [48, 49].

In Objekt C wurde in drei Proben eine erhöhte Konzentration von Di-iso-butylphthalat (DIBP) nachgewiesen (Tabelle 11). DIBP unterliegt einer Beschränkung nach REACH, da es als reproduktionstoxisch eingestuft wurde. Es wurde vor allem als Weichmacher in vielen synthetischen Polymeren wie PVC oder Acrylaten eingesetzt. Diesbezüglich

weist die Putzprobe C-2-1-0 aus der Wand im Ballsaal einen maximalen Feststoffgehalt von 27,34 mg/kg auf. Wie bereits in Abschnitt 3.2.3.3 beschrieben handelt es sich bei der Probe vermutlich um einen Kalkputz der sich hinsichtlich seiner elementaren Zusammensetzung von den restlichen Lehmproben unterscheidet und erhöhte Feststoffgehalte für As, Cu und Zn aufweist. Anzunehmen ist, dass Additive in Bauprodukten für die erhöhten Gehalte verantwortlich sind. Eine derartige Größenordnung ist z.B. mit der von Hausstäuben zu vergleichen. In diesen werden durch Abrieb von z.B. Innenbelägen Phthalate akkumuliert (für PVC Beläge kann der Phthalatanteil bis zu 30 M% betragen), wobei ein Hintergrundwert für Di-iso-butylphthalat von 20 mg/kg ermittelt wurde [50]. Eine mittels Thermoextraktions-Desorptions-Gaschromatographie-Massenspektrometrie (TED-GC-MS) durchgeführte Untersuchung der Probe C-2-1-0 hat jedoch keine Anhaltspunkte für das Auftreten von synthetischen organischen Polymeren wie PVC ergeben.

Anzumerken ist, dass die direkt unter dem Putz entnommene Lehmprobe C-2-1-1 einen Feststoffgehalt von 10,6 mg/kg und die ebenfalls an der Oberfläche jedoch im Vorraum entnommene Lehmprobe C-1-1-1 einen Feststoffgehalt von 1,74 mg/kg an Phthalat aufweist (Tabelle 11). Im Gegensatz zu den oben genannten anorganischen Schadstoffen sind somit sowohl die Lehm- als auch die Putzprobe kontaminiert. Dies könnte z.B. darauf zurückzuführen sein, dass ein phthalathaltiges Adhesiv zur Fixierung des Putzes an der Lehmwand verwendet wurde; das Konzentrationsgefälle zwischen den beiden Proben sowie die Abwesenheit von Adhesiven in den GC-MS Chromatogrammen deuten jedoch darauf hin, dass das Phthalat aus dem Putz in die Oberfläche der Lehmwand diffundiert ist. Ein Weitertransport und damit tieferes Eindringen des Di-iso-butylphthaltes in die Lehmwand, wie es für einige der erwähnten PAK beobachtet wurde (vgl. Kapitel 3.4.3), scheint hier jedoch nicht stattgefunden zu haben.

Tabelle 11: Auflistung der ermittelten Phthalat-Feststoffgehalte für die Horizonte C-1 und C-2 in mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (DCM-Extrakt, externer Standard).

Probename	Probenentnahmeort	Entnameobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	Diethylphthalt (DEP)	Di-n-butylphthalat (DBP)	Di-iso-butylphthalat (DIBP)	Bis-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)	Bis-(2-ethylhexyl)-terephthalat (DEHTP)	Summe Phthalate
C-1-1-1	Halle-Gasthaus	Außenwand-Vorraum	150	0-3	0,01	0,03	1,74	0,02	0,07	1,87
C-1-1-2			150	7	0,04	0,01	0,10	0,02	0,08	0,25
C-1-1-3			150	24-26	0,01	0,01	0,14	0,05	0,25	0,45
C-2-1-0		Außenwand-Ballsaal	150	0	0,21	0,24	27,34	0,09	<BG	27,88
C-2-1-1			150	0-3	0,19	0,08	10,60	<BG	0,04	10,91
C-2-1-2			150	7-10	0,04	0,01	0,14	0,02	0,02	0,23
C-2-1-3			150	24-26	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,07
C-3-1-1		Boden	-	0-30	<BG	<BG	0,04	0,15	<BG	0,19

3.4.5 Regulative und gesundheitsrelevante Einordnung

Beim Wirkungspfad Boden-Mensch wird für die Beurteilung der Gefahren durch orale und dermale Aufnahme mit der novellierten BBodSchV [21] nur noch ein Prüfwert für Benzo-a-pyren als Vertreter der PAK überwacht. Für Boden in Wohngebieten beträgt dieser 1 mg/kg. Bei Überschreitung der Prüfwerte wäre zur Bewertung der inhalativen Wirkung die Feinkornfraktion bis 63 µm ebenfalls zu untersuchen. Dieser Prüfwert wurde in keiner der untersuchten Lehmproben überschritten (siehe Tabelle 24), auch nicht in den Proben der Schwarzküche im Objekt D. Auch der Prüfwert für Kinderspielplätze von 0,5 mg/kg wurde immer eingehalten. In den meisten Proben liegen die Messwerte weit darunter. Damit ist auch ein Übergang von kritischen PAK in die Innenraumluft nicht zu erwarten und durch die Untersuchungen zur Innenraumluft auch bestätigt (s. Abschnitt 3.5).

Phthalate können auf Grund der vielfältigen Eigenschaften der verschiedenen Vertreter nicht als Stoffgruppe pauschal bewertet werden. Am weitesten verbreitet in der Umwelt ist das DEHP und gilt als reproduktionstoxisch. Es ist nach der EU-Chemikalienverordnung REACH nicht mehr ohne Zulassung für die Herstellung nicht essenzieller Verbraucherprodukte erlaubt. DEHP ist schwer wasserlöslich und kaum flüchtig, so dass eine gesundheitliche Gefährdung in Lehmbauten aus Recyclinglehm nicht zu erwarten ist. DEHP wurde in einem Profil der hier untersuchten Lehmproben

auch in nur sehr geringen Gehalten nachgewiesen. Die erhöhten Werte von DIBP in wenigen Proben des Profils C-2 stammen sehr wahrscheinlich aus dem verwendeten Putz, der bei einem Rückbau zu separieren wäre. Auch DIBP ist nicht flüchtig und wasserlöslich, so dass auch hier keine Gefährdungssituation von den gemessenen Gehalten ausgeht, die über die Gefährdung durch Hausstaub oder die Aufnahme aus der Nahrung hinausgeht.

3.5 Luftschadstoffe

3.5.1 Zielstellung und Probenumfang

Den größten Teil des Tages halten wir uns in geschlossenen Räumen auf. Davon verbringen wir die meiste Zeit in den eigenen vier Wänden. Die Qualität der Innenraumluft in unserer Wohnung hat daher eine große Bedeutung für Gesundheit und Wohlbefinden. Einen hohen Einfluss auf eine gute Luftqualität können dabei großflächige Bauprodukte haben. Daraus können flüchtige organische Verbindungen bei Zimmertemperatur ausgasen und in der Innenraumluft verbleiben und dadurch ihre Qualität beeinträchtigen. Bekannt ist aber auch, dass Tonminerale – das Bindemittel der Lehmbaustoffe – durch Ihre Ladung und extrem große innere Oberfläche – Stoffe binden können [51]. Dies wirkt sich für Bauwerke positiv auf die Innenraum-Schadstoffkonzentration aus, bedeutet aber zugleich, dass sich durch Einwirkung von Luftschadstoffen aus der Umwelt und aus der Nutzung relevante Schadstoffkonzentrationen im Bauteil anreichern [52]. Diese können einer Wiederverwendung entgegenstehen, zumal das Klientel der Anwender höchste Ansprüche an die Schadstofffreiheit der Produkte stellt oder Einfluss auf die Art der Entsorgung haben können [20, 53], Gerade auf dem Gebiet von Sachsen-Anhalt haben jahrzehntelang Einwirkungen erheblicher Schadstoffkonzentration aus der Chemie- und Braunkohleindustrie bestanden.

In dieser Vorstudie soll nun an bestehenden Lehmbauwerken geprüft werden, ob sich in dem Material bedingt durch VOC-Exposition in der Nutzungsphase diese VOC anreichern konnten und nun bei einer Nachverwendung potenziell aus dem Material wieder ausgasen können. Die ausgewählten Proben aus dem Wandaufbau (siehe Abschnitt 5.1 und Tabelle 19) wurden durch Emissionsuntersuchungen in Kammern oder Mikrokammern auf VOC-Ausgasungen überprüft. Hierfür wurden Probenmengen

von ca. 5 g in Glaspetrischalen eingewogen und in die Kammern eingebracht. Die Probenahme erfolgt über Adsorberrohre für VOC.

Grundsätzlich sollten im Vorhaben auch noch Innenräume von Lehmbauten auf das Vorhandensein von VOC beprobt werden. Dafür kommen die gleichen Adsorberrohre wie bei den Kammermessungen zum Einsatz. Leider konnten trotz intensiven Bemühungen keine geeigneten Objekte gefunden und untersucht werden.

3.5.2 Ergebnisse

In der Tabelle 12 und der Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Lehmwandproben aus der Probenahme in Pouch (Oktober 2022, s. Tabelle 4 und Tabelle 19) gelistet. Gefunden wurden im Wesentlichen zyklische Dimethylsiloxane mit der höchsten Konzentration 24 Stunden nach Beladung der Mikrokammern. In den Klammern dargestellt sind jeweils die Ergebnisse der 60°C Messungen. Diese Ergebnisse belegen, dass in den Proben keine nennenswerte Speicherung der Komponenten über die Nutzungsdauer stattfinden wird.

Tabelle 12: Messergebnisse in µg/m³ der Lehmprobenuntersuchung auf Decamethylcyclopentasiloxan (CAS-RN: 541-02-6) der Probenahme in Pouch.
Dargestellt sind jeweils die Ergebnisse nach 24 Stunden und in Klammern die Konzentrationen bei 60 °C.

A-1-y-z	z=	1	2	3	4	5
y=	cm	0-3	7-10	23,5-26,5	40-43	47-50
3	150	35 (<5)	20 (<5)	7 (<5)	<5 (<5)	90 (6)
2	110	132 (9)	21 (<5)	<5 (<5)	104 (19)	42 (<5)
1	70	68 (<5)	23 (<5)	19 (<5)	9 (<5)	12 (<5)

Tabelle 13: Messergebnisse in µg/m³ der Lehmprobenuntersuchung auf Octamethylcyclotetrasiloxan (CAS-RN: 556-67-2) der Probenahme in Pouch.
Dargestellt sind jeweils die Ergebnisse nach 24 Stunden und in Klammern die Konzentrationen bei 60 °C.

A-1-y-z	z=	1	2	3	4	5
y=	cm	0-3	7-10	23,5-26,5	40-43	47-50
4	230	7 (<5)	<5 (<5)	<5 (<5)	<5 (<5)	<5 (<5)
3	150	122 (<5)	70 (<5)	28 (<5)	21 (5)	<5 (<5)

Die grundsätzliche Annahme dass es in der Profilansicht durch die Wand eher höhere Konzentrationen in der äußeren Schicht und die eher geringeren Konzentrationen in den inneren Wandbereichen gibt, kann mit den Ergebnissen verifiziert werden. Zahlreiche Proben von den Objekten D (Utzberger Hof, Schwarzküche, innen und

außen sowie Stall) und E (Haus Abtsbessingen) wurden mit der Mikrokammer untersucht. Diese zeigen keine messbaren Emissionen an allen Positionen in der Wand, soweit mit den Stichproben untersucht. Das gleiche gilt auch für die Messung im ehemaligen Gasthof Altböllberg, Objekt C. Auf weitergehende Untersuchungen wurde verzichtet, da sich aus dem GC-MS Screening (s. 3.4.2) keine Anhaltspunkte für eine Schadstoffanreicherung an anderen Probenahmeorten ergeben hatten.

3.5.3 Regulative und gesundheitsrelevante Einordnung

Die einzigen Emissionen, die nachgewiesen wurden, sind die zyklischen Dimethylsiloxane in den Proben aus Pouch. Diese Komponenten treten üblicherweise im Innenraum aus Materialien auf, die Silikonöle oder Silikonpolymere (Dichtstoffe) enthalten. Weiterhin enthalten Kosmetik-Produkte auch zahlreiche zyklische Dimethylsiloxane Für diese Komponenten gibt es einen gesundheitsrelevanten Innenraumrichtwert RW I von 4 mg/m³ (Summenwert der üblichen Komponenten D4-D7), der nicht überschritten werden darf. Der RW II ist der Zielwert (sollte möglichst unterschritten werden) und beträgt 0,4 mg/m³ [54]. Diese Werte gelten für längere Expositionen. Bei den hier gefundenen Konzentrationen waren lediglich am 1. Tag Werte um 0,1 mg/m³ zu finden. Bei der Untersuchung unter verschärften Bedingungen (60 °C) wurde kein erhöhtes Potential auf längerfristiges Ausgasen gefunden.

3.6 Mikrobiologische Untersuchungen ausgewählter Proben auf die Besiedelung mit Pilzen

3.6.1 Zielstellung und Probenumfang

Ziel der Untersuchungen für das Vorhandensein einer mikrobiellen Belastung in Lehm-Bestandsbauten war die beispielhafte Untersuchung ausgewählter Proben zum Befall mit Schimmelpilzen und die Kennzeichnung von bekanntermaßen gesundheitsrelevanten Schimmelpilzarten.

An zwei ausgewählten Gebäuden (Objekte D und F) wurden jeweils vier Lehmproben in verschiedenen Höhen und Tiefen der Wand entnommen (Tabelle 14). Die Proben wurden im bodennahen Bereich der Wand oberhalb des Sockels entnommen, da bei den Viehställen die Vermutung naheliegt, dass hier organische Verschmutzung und bodennahe Feuchte aufgrund der Tierhaltung Pilzbefall begünstigten. Zusätzlich wurden Referenzproben in einer Höhe von 225 cm (D-1-5-2) und 250 cm (F-1-3-2)

entnommen, um einen Hinweis zu erhalten, ob die Viehhaltung einen Einfluss auf die Zusammensetzung und Quantität der pilzlichen Genkopien haben könnte.

3.6.1.1 Bestimmung der Pilzgattung durch molekularbiologische Analysen

Es war beabsichtigt, durch die Isolierung von genomischer DNA und deren anschließender Sequenzierung Gattung und Art der Pilze durch Abgleich mit öffentlich zugänglichen Sequenzdatenbibliotheken zu bestimmen. Während der Untersuchung zeigte sich jedoch, dass die geringe Menge an DNA sich bereits in eine große Anzahl von Gattungen auftrennte. Eine weitere Aufgliederung der Gattungen in Arten durch den Nachweis ihrer DNA war aufgrund der zu erwartenden geringen Genkopien im vorhandenen Probenmaterial nicht möglich.

3.6.1.2 Gesundheitsrelevante Einstufung der Sequenzierergebnisse

Die Gesundheitsrelevanz der nachgewiesenen Pilzgattungen wurde nach den Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA 460) eingestuft [55]. Diese zeigen den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene hinsichtlich der Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen und wurden zuletzt am 11. Dezember 2023 aktualisiert. Die Risikogruppen sind gemäß der Richtlinie 2000/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Arbeit definiert und werden in Abschnitt 5.5.5 und als Zitat wiedergegeben [55]. Entsprechend erfolgt eine Zuordnung zu den Risikogruppen 2 bis 4. Die Listen enthalten auch Pilze, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit verursachen und die deshalb der Risikogruppe 1 zuzuordnen sind. Für die Einstufung ist das von den Pilzen ausgehende Infektionsrisiko für den gesunden Beschäftigten maßgebend.

Im Sinne eines Worst-Case-Szenarios wurde in Tabelle 16 eine Gattung mit „Risikogruppe 2“ wiedergegeben, auch wenn nur eine Art der Gattung dieser Risikostufe zuzuordnen ist.

3.6.2 Ergebnisse

3.6.2.1 Anzahl an Genkopien

In der Tabelle 14 sind den Probenummern Standorte und Entnahmestellen in der Wand zugeordnet. Als Summenfaktor wurden die Mengen an Genkopien/g ermittelt.

*Tabelle 14: Anzahl der nachgewiesenen Genkopien *(Mittelwert aus vier Einzelmessungen).*

Probename	Entnahmeort	Beschreibung bei Entnahme	Entnahmehöhe (OKFF)/ Entnahmetiefe [cm]	Ergebnis in Genkopien/g*
D-1-5-2	Schwarzküche	Wellerlehm, trocken, wenig Stroh	225/6-11	3,76E+04
D-2-1-1	Stall	Wellerlehm, Lehmputz, viel Flachs, trocken	140/0-3	1,50E+06
D-2-1-2	Stall	Wellerlehm, Tendenz klamm, viel Stroh	140/7-10	3,53E+05
D-2-1-3	Stall	Wellerlehm, trocken	140/24-26	2,78E+05
F-1-1-1	Viehstall	wenig Stroh	110/ 0-3	2,74E+05
F-1-2-1	Viehstall	viel Stroh	150/ 0-3	6,59E+03
F-1-2-2	Viehstall	mäßig Stroh	150/ 6-11	6,56E+04
F-1-2-3	Viehstall	mäßig Stroh	150/ 23-27	4,00E+03
F-1-3-2	Viehstall	wenig Stroh	250/ 6-11	3,68E+04

Für den Standort D zeigte sich, dass mit 37.600 die geringste Anzahl Genkopien/g in einer Entnahmehöhe von 225 cm und einer Tiefe von 6-11 cm nachgewiesen wurde (D-1-5-2). Um circa ein Hundertfaches erhöht war dagegen die Anzahl der Genkopien im oberflächennahen Bereich auf 140 cm Höhe mit 1.500.000 Genkopien/g.

Zwei tiefer in der Wand entnommene Proben (D-2-1-2 und D-2-1-3) hatten eine zehnfach erhöhte Anzahl von 278000-353000 Genkopien/g im Vergleich zu der höheren Entnahmestelle.

Für den Standort F zeigte sich, dass in 100 und in 200 cm Wandhöhe OKS (bzw. 150 und 250 cm OKFF) bei gleicher Entnahmetiefe (6-11 cm) die Größenordnung der Anzahl Genkopien/g mit 36.800 und 65.600 dieselbe war (vgl. F-1-2-2 und F-1-3-2). Nur etwa ein Zehntel dessen (Anzahl der Genkopien 4000) wurde nachgewiesen, wenn die Entnahmestelle tiefer in der Wand lag.

Für beide Standorte zeigte sich, dass die meisten Genkopien/g bei geringer Wandhöhe und auf der Wandoberfläche nachgewiesen wurden. Allerdings fällt die Probe F-1-2-1 nicht in dieses Erklärungsmuster, da die Oberfläche hier nur 6590 Genkopien/g aufweist.

Es ist nicht außer Acht zu lassen, dass durch die Verwendung von Stroh und Flachs Pilz-DNA in den Lehm eingetragen werden kann. Am Entnahmeort F wurde jedoch keine Abhängigkeit der Genkopien/g vom Strohgehalt nachgewiesen. Dies wird

besonders beim Vergleich der Proben F-1-1-1 und F-1-2-1 deutlich, die beide oberflächennah (0-3 cm) von der Wand entnommen wurden und beide in ähnlicher Höhe (60 cm bzw. 100 cm OKS) den organischen Verschmutzungen bei der Tierhaltung ausgesetzt waren. Weitere in den Lehm eingetragene Stoffe, wie z.B. Spuren von Schwermetallen und Salzen (z.B. Harnstoff), können inhibierend auf die PCR wirken und sollten in nachfolgenden Analysen evaluiert werden.

Bei allen hier gezeigten Ergebnissen handelt es sich nur um erste Eindrücke, die durch umfangreichere Probennahmen ergänzt werden müssen, wenn es erforderlich sein sollte, diese exemplarischen Aussagen statistisch abzusichern.

3.6.2.2 Zuordnung bestimmter Pilzgattungen zu einer Risikogruppe

Die Gesundheitsrelevanz der nachgewiesenen Pilzgattungen wurde nach den Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA 460) erfasst [55].

Die Angaben in den Tabellen sind die OTUs. Sie geben die taxonomische Diversität einer Probe wieder. Sie dienen daher dazu, Gruppen von eng verwandten Taxa zu differenzieren und um Unterscheidungen zwischen Organismen zu treffen. Die Anzahl der OTUs ermöglicht eine grobe Abschätzung der Anzahl an einzelnen pilzlichen Taxa. Die taxonomische Zuordnung ist auf unterschiedlichen taxonomischen Ebenen und deckt zumeist die Gattungseben und selten die Artebenen ab. Exakte quantitative Aussagen für einzelne Pilzgattungen können aufgrund der Amplikon-Sequenzierungsergebnisse nicht abgeleitet werden, da nicht jedes Sequenzmotiv in identischer Weise in diesem Ansatz amplifiziert wird.

Die Gruppe der Ascomyceten, gemeinhin als Schimmelpilze bezeichnet, war mit 542 OTUs am häufigsten in den Lehmproben vertreten, gefolgt von der Gruppe der Basidiomyceten (Ständerpilze, 88 OTUs) (s. Tabelle 15).

Tabelle 16 zeigt die Gattungen, die mindestens eine Art der Risikogruppe 2 beinhalten. Die Gattungen, die Arten der Risikogruppe 2 (siehe Abschnitt 5.5.5) enthalten, treten in jeder der Lehmproben auf. Es sind bis auf eine Ausnahme (*Cutaneotrichosporon*) alles Schimmelpilze (Ascomyceten).

Tabelle 15: Taxonomische Zuordnung aller detektierten ITS basierten Sequenzierungsergebnisse nach Abundanz der OTU counts.

Taxonomische Zuordnung	OTU counts
Fungi; Ascomycota	542
Fungi; Basidiomycota	88
Fungi; Chytridiomycota	1
Fungi; Mortierellomycota	8
Fungi; unclassified	2
Heterolobosa_phy_Incertae_sedis	1
Heterolobosa; unclassified	1
Ichthyosporia_phy_Incertae_sedis	1
Viridiplantae; Anthophyta	1
Viridiplantae; Chlorophyta	8
unknown_unclassified	29

Tabelle 16: Ermittelte Gattungen, die eine Art der Risikogruppe 2 nach TRBA 460 [55] beinhalten.

	OTUs je Probennummer										
-	D-1-5-2	D-2-1-1	D-2-1-2	D-2-1-3	F-1-1-1	F-1-2-1 (a)	F-1-2-1 (b)	F-1-2-2 (a)	F-1-2-2 (b)	F-1-2-3	F-1-3-2
Arthrographis	1,35E-03	-	1,62E-04	5,58E-04	-	-	-	-	-	-	-
Leptosphaeriaceae	4,45E-04	-	4,00E-04	-	-	-	-	-	-	-	-
Leptosphaeria	4,75E-04	4,16E-04	5,11E-04	2,02E-03	-	-	-	-	-	-	-
Exophiala	1,53E-02	1,56E-04	1,63E-03	2,55E-03	2,57E-04	-	-	1,19E-03	1,64E-03	6,02E-03	-
Phialophora	8,51E-04	1,17E-04	2,66E-03	1,74E-02	3,40E-03	-	-	4,22E-03	6,75E-02	8,82E-02	8,76E-02
Aspergillaceae	4,07E-01	3,20E-04	7,13E-02	5,04E-02	4,34E-02	5,62E-03	3,94E-02	7,01E-03	3,16E-02	1,12E-02	1,27E-02
Aspergillus	7,54E-02	2,14E-03	2,94E-03	1,53E-03	2,88E-02	-	6,13E-03	6,67E-04	9,64E-03	-	8,87E-04
Talaromyces	4,60E-04	2,99E-04	4,94E-04	7,99E-04	-	-	-	-	2,34E-03	1,25E-02	-
Chrysosporium	3,93E-03	1,47E-03	2,03E-03	3,05E-03	8,88E-04	-	-	-	-	1,29E-02	-
Candida	2,75E-03	2,09E-03	4,08E-03	3,84E-03	3,95E-02	-	-	-	-	-	-
Trichoderma	-	8,22E-05	5,19E-04	4,36E-04	-	-	-	-	1,99E-03	-	-
Sarocladium	-	2,38E-04	6,64E-04	2,01E-04	2,32E-03	-	-	-	-	-	-
Fusarium	5,98E-04	4,79E-03	2,54E-03	4,65E-03	5,23E-04	-	-	1,05E-03	-	-	1,13E-02
Nectria	4,68E-04	2,77E-04	4,34E-04	7,82E-04	-	-	-	2,06E-01	1,04E-02	-	-
Myrmecridium	-	-	-	-	7,25E-04	-	-		-	-	-
Phialemonium	-	1,64E-04	1,19E-04	3,46E-04	-	-	-	-	-	-	-
Cutaneotrichosporon	-	5,16E-03	3,49E-04	-	-	-	-	8,26E-03	-	-	-
Summe OTUs je Probe	**0,51**	**0,02**	**0,09**	**0,09**	**0,12**	**0,01**	**0,05**	**0,23**	**0,13**	**0,13**	**0,11**
Ranking nach OTUs je Probe	**1**	**8**	**6**	**6**	**4**	**9**	**7**	**2**	**3**	**3**	**5**

Tabelle 17: Belastung (Summe OTUs) mit Pilzgattungen, die Arten der Risikogruppe 2 enthalten können, in Gegenüberstellung mit anderen Probenparametern.

Probename	Entnahmeort	Beschreibung bei Entnahme	Entnahmehöhe (OKFF)/ Entnahmetiefe [cm]	Ergebnis in Genkopien/g*	Summe OTU
D-1-5-2	Schwarzküche	Wellerlehm, trocken, wenig Stroh	225/6-11	3,76E+04	0,51
D-2-1-1	Stall	Wellerlehm, Lehmputz, viel Flachs, trocken	140/0-3	1,50E+06	0,02
D-2-1-2	Stall	Wellerlehm, Tendenz klamm, viel Stroh	140/7-10	3,53E+05	0,09
D-2-1-3	Stall	Wellerlehm, trocken	140/24-26	2,78E+05	0,09
F-1-1-1	Viehstall	wenig Stroh	110/ 0-3	2,74E+05	0,12
F-1-2-1 (a)	Viehstall	viel Stroh	150/ 0-3	6,59E+03	0,01
F-1-2-1 (b)	Wiederholung	"	"	"	0,05
F-1-2-2 (a)	Viehstall	mäßig Stroh	150/ 6-11	6,56E+04	0,23
F-1-2-2 (b)	Wiederholung	"	"	"	0,13
F-1-2-3	Viehstall	mäßig Stroh	150/ 23-27	4,00E+03	0,13
F-1-3-2	Viehstall	wenig Stroh	250/ 6-11	3,68E+04	0,11

3.6.3 Hinweise zu gesundheitsschutzrelevanten Aspekten und Forschungsbedarf

In den Lehmproben wurde DNA nachgewiesen, die aller Wahrscheinlichkeit nach aus Pilzsporen oder -myzelien stammten. Diese Pilze hatten entweder das verbaute Pflanzenmaterial (Stroh, Flachs) schon vor der Verarbeitung im Lehm besiedelt oder sind bei hinreichender Feuchtigkeit und organischen Verschmutzungen (z. B. Tierstall) oberflächlich auf der Wand gewachsen, ohne aber in die Wand einzuwachsen.

In den untersuchten Proben wurden eindeutig Schimmelpilzgattungen nachgewiesen, die auch Arten der Risikogruppe 2 einschließen. Der Nachweis der Pilz-DNA ist allerdings in erster Linie qualitativ zu interpretieren und weist auf eine potenzielle Gesundheitsgefährdung hin, die aber durch den geringen Umfang dieser Vorstudie nicht belegt werden kann. Es bleibt offen, ob die gefundene Menge an DNA auf eine Anzahl an Pilzsporen schließen lässt, die gesundheitsgefährdend ist.

Es ist anzunehmen, dass vor allem bei der Zerkleinerung von trockenem Lehm mit der Aufnahme von Feinstaub und damit Bioaerosolen über die Atemwege pilzliche DNA aufgenommen werden kann.

Feldstudien zur Erfassung der Belastung durch Biostoffe unmittelbar am Arbeitsplatz von Beschäftigten wurden bereits bei der Textil-, Kunststoff- und Papierwiederverwertung durchgeführt [56]. Es wird angeregt, dies auch bei der Wiederverwertung von Lehmbauten zu tun.

Eine Abschätzung der Expositionsart und -dauer, besonders bei staubigen Lehmarbeiten mit großer Gefahr der Inhalation, ist sinnvoll, um die Pilz-Belastung in der Luft, während der Lehmarbeiten abschätzen zu können. Bei der Aufarbeitung alter Lehmbauten zum Zweck der Wiederverwendung des Lehms sollten die Vorgaben des Bundesamtes für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) in Betracht gezogen werden, im Besonderen die Biostoffverordnung. Dort heißt es: „Kontakt zu Biostoffen haben vor allem Beschäftigte in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft, im Gesundheitswesen, beim Umgang mit infizierten Personen sowie im Veterinärwesen und in der Tierhaltung“ [57].

Spezifische Arbeitsschutzmaßnahmen in der Bearbeitung und Wiederverwendung von Lehm sind bisher nicht erstellt worden, so dass man sich an naheliegende Maßnahmen, wie z.B. der TRBA 230 (Schutzmaßnahmen mit biologischen Arbeitsstoffen in der Land- und Forstwirtschaft) orientieren sollte [58]. Weiterhin sollte die TRBA 400 zur Gefährdungsbeurteilung für die Unterrichtung der Beschäftigten für diese Tätigkeiten erweitert werden. Besonders relevant sind hier die Bioaerosolemissionen zu nennen [59].

Beim Ausbau, und Umschlag von trocknem Lehm aus Gefachen besteht die Möglichkeit der Freisetzung von biologisch kontaminierten Stäuben. Für Menschen, die sich im Nahbereich von Ausbau- und Umschlagarbeiten aufhalten, kann eine Gesundheitsgefährdung gegeben sein, insbesondere wenn relevante Staubmengen von Lehm freigesetzt werden. Das Gesundheitsrisiko hängt von der Verarbeitungsweise des Lehms, der Feinheit der Staubpartikel (einatembare Partikelfraktion), der Staubkonzentration und der Expositionsdauer ab. Lehmstaub kann abhängig von der Partikelgröße (aerodynamischer Partikeldurchmesser) auf die Haut und Schleimhäute (z. B. der Nasennebenhöhlen und der Lunge) gelangen und dort in erster Linie Reizerscheinungen und Allergien hervorrufen.

Der Stand der Technik bei Holzstäuben gilt bei allen Tätigkeiten, bei denen Holzstaub freigesetzt wird, als eingehalten, wenn die Konzentration von einatembarem Staub

(einatembare Partikelfraktion) in der Luft 2 mg/m³ nicht überschreitet (siehe TRGS 900) [60]. Eine Übertragbarkeit sollte allerdings im Detail geprüft werden. Bei staubreichen Arbeiten mit trockenem Lehm in geschlossenen Räumen eines Hauses könnte für entsprechend exponierte Beschäftigte eine Gefährdung ihrer Gesundheit vorhanden sein.

Mögliche Gefährdungen der Beschäftigten bei der Arbeit in geschlossenen Räumen müssen grundsätzlich nach §3 Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) beurteilt werden, und diese Beurteilung ist ebenfalls nicht von anderen Arbeitsbereichen übertragbar [61]. Bei möglicher Exposition der Beschäftigten mit Lehmstäuben ist dabei die Beurteilung der Exposition und ggf. Bestimmung der Konzentration an einatembaren Lehmstäuben erforderlich.

Ergibt sich aus der Gefährdungsbeurteilung, dass die Tätigkeiten das Tragen von Atemschutzgeräten erfordern, ist laut der Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV), den Trägern von FFP-Masken eine arbeitsmedizinische Vorsorge anzubieten. Wenn z. B. körperlich schwer gearbeitet wird, sich ein Maskenfilter beim Tragen durch Stäube zusetzt, d. h. sich der Einatemwiderstand erhöht oder wenn ungünstige klimatische Verhältnisse vorliegen, ist die arbeitsmedizinische Vorsorge Pflicht [62]. Hinweise zur Nutzung von Atemschutzgeräten enthalten die Schriften der Unfallversicherungsträger zur „Benutzung von Atemschutzgeräten“. Die Beurteilung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen erfolgt nach TRGS 402 [63].

Auf der Grundlage der hier durchgeführten Studie konnte nicht beurteilt werden, ob die gefundene Menge an pilzlicher DNA gesundheitsgefährdend ist. Die Untersuchungen ermöglichen es aber, besonders hervortretende Gattungen in nachfolgenden Projekten auf drei Wegen gezielt zu betrachten. Man kann nun mit geeigneten Medien mittels Anreicherungskulturen die Ausbeute an DNA erhöhen, um anschließend eine detaillierte Sequenzierung realisieren zu können. Weiterhin können die im Lehm enthaltenen Sporen und Pilze mit spezifischen Medien in die Lage versetzt werden, in eine vegetative Form überzugehen. Dadurch können die Anzahl und Art der lebensfähigen Pilze und deren Sporen quantifiziert und somit das Erkrankungspotential dieser Pilze besser abgeschätzt werden. Zudem kann nach einer Isolation der Pilze das jeweilige Pathogenitätsprofil phäno- und genotypisch z.B. durch Genomsequenzierungen im Detail charakterisiert werden.

4 Schlussfolgerungen und Transfer der Ergebnisse

4.1 Schlussfolgerungen

Diese Vorstudie befasst sich mit der Identifizierung und Quantifizierung von Schadstoffen in Lehmbauteilen von Bestandsbauten, die in der Region Mitteldeutschland lokalisiert sind. Die Probenbeschaffung umfasste Kernbohrungen an Lehmwellerwänden verbunden mit referenziellen ortsgebundenen Bodenbeprobungen an denen Feststoffuntersuchungen vorgenommen wurden. Neben spektroskopischen Methoden (RFA, ICP-OES, Photometrie) zur Ermittlung der anorganischen Bestandteile kamen spektrometrische Methoden (IC-MS) zur Ermittlung der organischen Bestandteile (PAK, Screening) zum Einsatz. Darüber hinaus wurden Bodenparameter vom Lehm, VOC im Lehm und mikrobiologische Untersuchungen am Lehm vorgenommen, um dadurch ein breites Spektrum an möglichen Schadstoffen abzudecken. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurden Wandprofile erstellt, um dadurch nicht nur in der Lage zu sein, eine Risikoabschätzung bzgl. Stärke von Kontaminationen vorzunehmen, sondern auch einen Einblick in Verteilungsmuster von bestimmten Schadstoffen zu erhalten und dadurch eine Ursachenrückverfolgung vorzunehmen.

Schwermetalle

Messergebnisse (Gesamtgehalte) auf der Basis von Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFA) wurden als halbquantitative Überblickanalyse zur Beurteilung von anorganischen Schadstoffbelastungen herangezogen. Danach wurden Proben für zusätzliche nasschemische Analysen nach Königswasser-Aufschluss ausgewählt, da die zur Verfügung stehenden Vergleichs- und Grenzwerte ebenfalls darauf basieren. Unter Berücksichtigung der speziellen Bau- und Nutzungssituation wurden als Bewertungsmaßstäbe orientierend vor allem geogene Hintergrundwerte und Materialwerte für Bodenmaterial der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) zum Vergleich mit den Feststoffgehalten der entnommenen Lehm- und Bodenproben herangezogen. Des Weiteren wurde mit den Überwachungswerten in der EBV regulierter Metalle verglichen, da diese bei einer Überwachung der Verarbeitung in einer Aufbereitungsanlage maßgeblich wären.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die entnommenen Lehmwandproben aller Objekte nur in Einzelfällen Überschreitungen der Grenzwerte für die untersuchten Elemente zu

verzeichnen sind. Die häufigsten, aber punktuellen Überschreitungen werden durch Cu im Objekt A verursacht. Es kann angenommen werden, dass der Baustoff für dieses Gebäude aus einer bereits anthropogen kontaminierten Lehmquelle entnommen wurde (Verlagerung von Schwermetallen aus dem sächsischen Bergbau mit der Mulde). Die Herkunft höherer Gehalte für As, Pb und Zn in den entnommenen Referenz-Bodenproben ist vermutlich ebenso zu erklären. Jedoch traten in keiner der untersuchten Lehmproben solche erhöhten Werte für As, Pb und Zn auf.

Ein Großteil der RFA-Daten für das Objekt D weist relativ zu den Daten der anderen Objekte erhöhte Cr -und Ni-Gehalte auf. Die Ursache kann hier vermutlich auf geogene Hintergrundwerte zurückgeführt werden, die für die Ursprungsregion der Gebäude aus Utzberg belegt sind. Messwerte aus Königswasseraufschlüssen mit den am höchsten belasteten Proben ergeben aber keine Grenzwertüberschreitungen der Überwachungswerte nach EBV.

Bauschädliche Salze

An den beprobten Wellerlehmwänden konnten keine wesentlichen sichtbaren Bauschäden ausgemacht werden. Dennoch wurden bauschädliche Salze in signifikanten (kritischen) Gehalten gefunden, die sich im Inneren der Wände aufkonzentriert hatten. Die Situation wurde zum einen anhand des WTA-Merkblattes „Beurteilung von Mauerwerk- Mauerwerksdiagnostik“ der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. [WTA-Merkblatt-1999] bewertet. Da Grenzwerte für Wellerlehm nicht existieren, wurden zum anderen die Festlegungen aus den Normen DIN 18945 bis 18947 für andere Lehmbaustoffe herangezogen. Schlussfolgerungen und praktische Empfehlungen für die Wiederverwertung wurden nach zukünftigen Nutzungskategorien in Zusammenhang mit der Bewertung nach WTA-Merkblatt abgeleitet. Hoch belastetes Material muss ggf. ausgeschleust werden. Resultierend aus den gegenständlichen Untersuchungsergebnissen werden die Bewertungen „gering“ und „mittel“ nach WTA für die Nutzungskategorie „Stall/Scheune“ im Falle einer Wiederverwendung des Wellerlehms vorgeschlagen. Bauteile oder Bauteilbereiche mit Belastung hoch werden nicht für eine Wiederaufbereitung vorgesehen und der Entsorgung zugeführt bzw. kann bestenfalls in ausreichender Entfernung von Gebäuden für die Bodenverbesserung genutzt werden, jedoch keinesfalls in Gebäuden jedweder Art. Beimischungsquoten – also die Verdünnung

des salzbelasteten Materials – könnten nur für die Kategorie Stall/Scheune angedacht werden, da die in versalzenem Material oftmals humierten organischen Anteile schon bei geringen Beimischungsquoten für Verfärbungen und damit zu Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit in der Kategorie Wohnen/wohnähnliche Nutzung führen könnten. Lediglich bauschädliche Salze wurden in Gehalten über üblichen Grenzwerten gefunden, die aber an den beprobten Gebäuden zu keinen gravierenden Bauschäden geführt hatten. Bei der Wiederverwertung kann entsprechendes Material behandelt oder vermischt werden, um die Zielwerte für Salze einzuhalten.

Abgeleitete Empfehlungen zur Untersuchung von Bestandsbauten hinsichtlich bauschädlicher Salze:

Für eine einfach Bewertung (ohne Analytik) von Lehmwellerbauten (und auch anderen Lehmbauteilen) und Einschätzung über deren Wiederverwendbarkeit, werden die in Tabelle 18 gelisteten Bewertungsmethoden und -kriterien empfohlen.

Tabelle 18: Einfache Bewertungskriterien für die Wiederverwendbarkeit von Wellerlehm

Methode/Merkmal	Kritisches Merkmal bzw. Ausschlusskriterium
Bauforschung	Gebäude ohne Horizontalsperre
Riechprobe am Bauteil	Muffiger Geruch
Visuelle und haptische Wahrnehmung am Bauwerk	Muffiger Geruch des Strohs, dunkel verfärbtes, braunes Stroh (statt gelb/goldgelbes gesundes Stroh), brüchige Fasern, keine Festigkeit
Visuell längere Zeit als feucht beobachtete Bauteile	Aufsteigende Feuchte oder hygroskopisch erhöhte Eigenfeuchte

Konnten Zustand und die Möglichkeit der Wiederverwendung nach diesen Merkmalen und einer großräumigen Beurteilung nicht sicher eingeschätzt werden, wird eine anknüpfende bzw. vergleichende Analytik zu Feuchtegehalt und Salzbelastung empfohlen.

Eine praktische Empfehlung beim Verfahren zur Wiederverwertung, ist zuerst das Abschaben/Abfegen/Abblasen der Wand, um vorhandene Salzausblühungen und andere Verschmutzungen am Bauteil direkt zu entfernen.

Organische Schadstoffe

Durch qualitative Non-Target-Analytik wurden die Extrakte von 51 ausgewählten Proben zunächst auf das Vorhandensein einer großen Bandbreite organischer Verbindungen geprüft, von denen eine Schadwirkung ausgehen könnte.

Die Objekte B, C und D wurden im Vorhinein zur Probenahme und Target-Analytik auf PAK ausgewählt, da hier der Verdacht bestand, dass durch Rauchgaseintrag eine Kontamination von Lehmbauteilen stattgefunden haben könnte. Für die Bewertung der PAK-Ergebnisse wurden neben den Material- und Prüfwerten aus der EBV auch Hintergrundwerte in Böden und die PAK-Gehalte der vor Ort entnommenen Bodenproben berücksichtigt.

Bis auf die Gruppe der Phthalate wurden keine Verbindungen mit einem kritischen Feststoffgehalt identifiziert, die eine weitere Quantifizierung notwendig erscheinen ließen.

Phthalate kommen ubiquitär in der Umwelt vor und werden durch unzählige Produkte, in denen sie als Weichmacher verwendet werden (z.B. PVC), vor allem durch Staub in die Atmosphäre sowie die aquatische und terrestrische Umwelt eingetragen.

Die Befunde zu den Phthalaten in den Proben der Lehmwände liegen größtenteils unter den bekannten Hintergrundwerten. Durch den heutzutage sorgfältigeren Umgang mit dieser Stoffgruppe in der Industrie und der verbesserten Reinigung von Abwasser ist eher ein weiterer Rückgang von Hintergrundwerten auch in Böden zu erwarten. In der Innenraumluft von Lehmgebäuden sind keine relevanten Konzentrationen von Phthalaten durch die Emission aus rezykliertem Lehm zu erwarten.

Ein Auftreten von Hexachlorbenzol (HCB), das als Kontaminante im Raum Bitterfeld bekannt ist, wurde in einer einzelnen Lehmprobe aus Pouch festgestellt, aber nicht näher quantifiziert.

Von 49 ausgewählten Lehm- und Bodenproben wurden die PAK-Feststoffgehalte ermittelt. Eher geringe Überschreitungen des Materialwertes (3 mg/kg, Qualität BM-0 der EBV) hinsichtlich der Summe der PAK_{16} wurden nur in einer Referenz-Bodenprobe aus Pouch und in einer Lehmprobe im deckennahen und oberflächlichen Bereich über der ehemaligen Kochstelle der Schwarzküche des Utzberger Hofes festgestellt. In der

Schwarzküche hat hier eine Akummulation von PAK in der Wand stattgefunden, die aber mit der Wandtiefe abnimmt. Für die kanzerogene Verbindung Benzo[a]pyren wurde für keine der Lehmproben eine Überschreitung des Materialwertes gefunden.

Innenraumluft

Ausgewählte Proben aus dem Wandaufbau der beprobten Lehmwände wurden durch Emissionsuntersuchungen in Kammern oder Mikrokammern auf VOC-Ausgasungen überprüft. Es wurden lediglich zyklische Dimethysiloxane in den Proben aus Pouch nachgewiesen. Solche Verbindungen treten üblicherweise bei Verwendung von Baumaterialien auf, die Silikonöle oder Silikonpolymere (Dichtstoffe) enthalten. Der gesundheitsrelevante Innenraumrichtwert für diese Verbindungen wurde nicht überschritten. Es ergaben sich auch keine Hinweise auf potenziell längerfristiges Ausgasen unter verschärften Bedingungen (60 °C).

Mikrobiologische Untersuchungen

An zwei ausgewählten Gebäuden wurden jeweils vier Lehmproben im bodennahen Bereich der Wand oberhalb des Sockels entnommen, da hier Pilzbefall durch Verschmutzung aufgrund der Tierhaltung potenziell begünstigt wird. In den untersuchten Proben wurden elf Schimmelpilzgattungen nachgewiesen, die auch Arten der Risikogruppe 2 einschließen, wobei die Gruppe der Ascomyceten und Basidiomyceten am häufigsten vertreten waren. Der Nachweis der Pilz-DNA ist allerdings in erster Linie qualitativ zu interpretieren und weist auf eine potenzielle Gesundheitsgefährdung hin, die aber durch Limitationen dieser Vorstudie nicht belegt werden kann. Es bleibt offen, ob die gefundene Menge an DNA auf eine Anzahl an Pilzsporen schließen lässt, die gesundheitsgefährdend ist.

Spezifische Arbeitsschutzmaßnahmen für den Rückbau von Lehmbauten wurden aufgezeigt.

4.2 Ergebnistransfer

Die Zwischenergebnisse der Vorstudie wurden regelmäßig auf internen und externen Treffen des Netzwerkes der WIR!-Initiative GOLEHM vorgetragen und diskutiert. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse auf zwei internationalen Tagungen vorgestellt:

- WASCON 2023 conference “Innovative valorization of alternative materials and waste towards circular construction”, 13.-16. Dezember 2023, Hongkong
- Tagung LEHM 2024 – International Conference on Building with Earth, 27./28. Oktober 2024 in Weimar

Eine weitere Veröffentlichung in einer referenzierten, internationalen Zeitschrift ist geplant.

Die Ergebnisse können in die Entwicklung von Sanierungsrichtlinien und -methoden, in die Aus- und Weiterbildung von Handwerkern eingebracht sowie zur Information von Bauherren genutzt werden. In weiteren Forschungsvorhaben sind die Ergebnisse auch bei der Entwicklung neuer Lehmbauteile und -stoffe nutzbar. Darüber hinaus können Kriterien für die Klassifizierung/Zertifizierung alter und neuer Lehmbaustoffe hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit abgeleitet und Erkenntnisse in die Normungsarbeit transferiert werden.

4.3 Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen der GOLEHM-Initiative soll möglicherweise ein Projekt gefördert werden, bei dem ein Textentwurf für ein WTA-Merkblatt Massivlehmsanierung erarbeitet werden soll. Anhand der vorgenommenen Untersuchungen kann geschlussfolgert werden, dass der bewusste Umgang mit salzbelasteten Wandquerschnitten nicht nur für die Sanierung von Massivlehmgebäuden von Bedeutung, sondern auch für die eventuelle Wiederverwendung von Massivlehmbaustoffen notwendig ist.

Gegebenenfalls haben sich die oben beschriebenen Kategorien zur Einteilung der Materialien zur Wiederverwendung bis dahin auch schon in der Praxis bewährt.

Die mikrobiologischen Voruntersuchungen haben weiteren Forschungsbedarf und gezielte Wege für weitere Arbeiten aufgezeigt.

5 Material und Methoden

5.1 Probenahme

5.1.1 Lehmwellerwände

Die Entnahme der Proben erfolgte in verschiedenen Höhen und Tiefen, wohingegen die verschiedenen Bohrprofile je nach Situation umfangreicher oder ausgewählt erstellt wurden. In den jeweiligen Höhen wurden meist bis zu fünf Proben in unterschiedlichen Wandtiefen entnommen, nämlich jedes Mal von der einen Wandseite bei 0-3 cm, 7-10 cm und 24-26 cm und auf gleicher Höhe von der anderen Wandseite wiederum 0-3 cm und 7-11 cm. Durch ortsbedinge, bauliche Besonderheiten können teils geringfügige veränderte Tiefen bestimmt worden sein. Damit sind die übliche Wandstärke von etwa 50 cm und Satzstärken (Lagendicken) von etwa 40 bis 60 cm der untersuchten Lehmwellerbauten gleichmäßig beprobt.

Im Rahmen der Befunderhebung vor Ort wurden nachfolgend aufgelistete Untersuchungsmethoden und -geräte angewendet:

- visuelle Begutachtung unter Zuhilfenahme von Gliedermaßstab, Rissbreitenmaßstab und digitaler Fotokamera Nikon Coolpix P 600 zur Dokumentation,
- Bohrungen zur Probennahme an Massivbauteilen mit Schlagbohrmaschine MAKITA DHR 242 und Bohrkronen 50mm
- diversen Kleingeräte und Werkzeuge zur Bauteilöffnung und Probennahme.

5.1.2 Bodenproben

Ungestörte Bodenproben wurden als Referenz unter Zuhilfenahme eines Split-Tube-Samplers (geteiltes Edelstahlrohr, Durchmesser 6 cm, Länge 30 cm) entnommen. Der Sampler wurde mit einem Schonhammer in den Boden eingetrieben und nach Abscheren wieder herausgezogen. Eine Hälfte des Rohres kann dann abgenommen werden, um den Bohrkern horizontweise zu beproben. Die Proben wurden in Braungläser mit Alufolie als Einlage im Deckel abgefüllt und nach Transport ins Labor gekühlt bei 4°C bis zur Analyse aufbewahrt.

5.2 Probenaufbereitung Lehmproben

Direkt bei der Probenahme (Kernbohrung) wurde die erhaltene Probe auf einer Edelstahlschaufel gemischt und in zwei Hälften geteilt und in Braungläser (BAM) bzw. Kunststoffbecher aus Polyethylen (ZRS) abgefüllt. Eine zusätzliche Trocknung der

Proben war für die weiteren Aufbereitungsschritte nicht erforderlich. Die Proben homogenisiert und verjüngt bzw. repräsentativ in Teilprobemengen für die einzelnen Analysen aufgeteilt. Für letzteren Schritt wurden abhängig von der vorliegenden Probenmenge, Riffelteiler und Teilkreuze unterschiedlicher Größen verwendet. Nach der Teilung wurden die Proben in einem dunklen Klimaraum bei 4°C bis zum Beginn der Untersuchungen aufbewahrt.

5.3 Feststoffanalytik

5.3.1 Bodenparameter

5.3.1.1 Feuchte

BAM

Zur Bestimmung des Wassergehalts nach DIN EN 12880 [64] und DIN EN 14346 [65] in den Proben wurde ein Feuchtemessgerät (MA 40, Sartorius) verwendet. Die Bestimmung erfolgte, indem jeweils 5 g Probenmenge auf ein Aluminiumschälchen eingewogen und im Gerät positioniert werden. Nach dem Aufheizen auf Endtemperatur und dem Eintreten der Massenkonstanz wird aus der Massendifferenz die Feuchte berechnet. Für jede Probe wurde eine Dreifachbestimmung durchgeführt.

ZRS

Bei der gravimetrischen Feuchtegehaltsbestimmung, sog. „Darr-Methode“, werden die betreffenden Proben dem Bauteil entnommen, in einen luftdichten Behälter verpackt, gewogen und sodann bei 40°C getrocknet, um so die Massedifferenz zwischen getrockneter und ungetrockneter Probe zu bestimmen. Durch die punktuelle Bestimmung des Wassergehaltes sowohl bei 23°C und 50 % relativer Luftfeuchte (kurz: r. LF), als auch bei 23°C und 80 % r. LF sollte zudem der hygroskopische Einfluss möglicherweise enthaltener bauschädlicher Salze erfasst werden.

Die Wechselwirkungen zwischen Feuchte- und Salzbelastungen lassen sich an folgenden Tendenzen erkennen:

- Ist der Feuchtegehalt von 23°C/80 % r. LF höher als der von 23°C/80 % r. LF, kann auf erhöhte hygroskopische Feuchte geschlossen werden. Der Einfluss hygroskopisch wirkender Salze zeigt sich durch übermäßige Feuchtezunahmen infolge der angehobenen Luftfeuchte.

- Ist der Feuchtegehalt von 23°C/80 % r. LF höher als der Entnahmefeuchtegehalt, ist davon auszugehen, dass weniger aufsteigende Feuchte vorhanden ist als vielmehr hygroskopische Feuchte.

Die Konditionierung der Proben auf 23°C und 50 % r. LF entspricht dem Normklima nach DIN 18945 bzw. DIN EN 13279-2 [22, 66].

5.3.1.2 pH-Wert und Leitfähigkeit

Für die Bestimmung des pH-Wertes nach DIN ISO 10390 [67] wurden 5 ml lufttrockneter Boden mit 25 ml destilliertem Wasser durch Schütteln suspendiert und nach 2 h Standzeit dekantiert. Für die Messung wurde ein pH-Meter pH 526 mit SenTix 41 Elektrode (WTW GmbH, Weilheim) verwendet, das bei zwei Punkten (pH= 4.01 und 7.00, Certipur Pufferlösungen, Merk, Darmstadt) kalibriert wurde. Die elektrische Leitfähigkeit wurde in der gleichen Lösung in Anlehnung an DIN EN 27888 [68] gemessen (LF 537, TetraCON 96 Elektrode, WTW GmbH, Weilheim, Leitfähigkeitsstandards 147 µS, 1410 µS und 12,8 mS, Certipur, Merck, Darmstadt)

5.3.1.3 Korndichte

Die Bestimmung der Korndichte fester Stoffe erfolgte in Anlehnung an DIN 66137-3 [69] mittels Heliumpyknometrie (vollautomatisches Gasverdrängungs-Pyknometer mit automatischer Messdatenerfassung und Ergebnisberechnung, Ultrapyc 5000, Anton Paar GmbH, Ostfildern) und jeweils 5-facher Wiederholungsmessung.

5.3.1.4 Glühverlust

Die Bestimmung des Glühverlustes als Maß für den Anteil an organischer Substanz wurde gravimetrisch nach Verbrennung der Proben (gemahlen und bei 105 °C getrocknet) im Muffelofen bei 550 °C nach DIN EN 17685-1 [70] (Muffelofen M110, Heraeus).

5.3.2 Chemische Elemente: Röntgenfluoreszenzanalyse

Zur Erlangung der semiquantitativen Elementkonzentrationen wurden Röntgenfluoreszenz-Messungen durchgeführt (DIN EN 15309 [27]). Dazu wurden je 5 g getrocknetes Probenmaterial für 4 min bei 60 % der maximalen Amplitude mittels einer Kugelmühle MM2000 (Retsch, DE) gemahlen. Die gemahlene Probe wurde daraufhin in spezielle Probenküvetten von 24 mm Durchmesser mit 0,4 µm Prolen-Folie überführt. Zur Übersichtsanalyse wurde ein energiedispersives RFA-Messgerät

(XEPOS III mit Software X-LabPro 5.1, TurboQuant Auswertemethode, Spectro Analytical Instruments GmbH, Kleve) verwendet. Das Gerät, ausgerüstet mit einer binären Pd/Co Anode, liefert eine maximale Energie von 50 W bei einer maximalen Stromstärke von 50 kV. Als Detektor wird ein Silizium-Drift-Detektor (SDD) mit einer erreichbaren spektralen Auflösung von 130 eV (Mn K_α-Linie) verwendet. Es wurden Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Sr, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, Hg, Tl, Pb und Bi simultan gemessen.

5.3.3 Kationen: Königswasseraufschluss zur anschließenden Messung mittels ICP

Die Gehalte eine Reihe von Kationen wurden nach Mikrowellen-Druckaufschluss (MLS) von je ca. 0,5 g gemahlenen Proben mit Königswasser (DIN EN ISO 54321 [71]) in PTFE-Bechern mittels ICP-OES (DIN EN ISO 11885 [30], iCAP 7000 + ASX-260 Autosampler Thermo Fisher Scientific GmbH, Dreieich) oder bei Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenzen der ICP-OES mittels ICP-MS, DIN EN ISO 17294-2 [29], iCAP Q,Thermo Fisher Scientific GmbH, Dreieich) gemessen.

In den Königswasserextrakten wurden je nach Konzentration folgende Elemente mittels ICP-OES oder ICP-MS gemessen: B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Tl, Ba, Hg und Pb. Da es sich beim Königswasseraufschluss nicht um einen Vollaufschluss handelt und die Werte der RFA-Analysen zwar als Gesamtgehalte aber als halbquantitativ zu betrachten sind, können die Ergebnisse nicht unmittelbar verglichen werden.

5.3.4 Anionen: Photometrie (ZRS)

Wie in der qualifizierten Bauwerksdiagnostik üblich, wird bei den entnommenen Materialproben der Gehalt an bauschädlichen Anionen (Nitrat, Sulfat und Chlorid) bestimmt. Dazu werden die Proben nach der Trocknung zunächst aufgemörsert und homogenisiert, anschließend jeweils 5 g pro Probe in 200 ml demineralisiertes Wasser gegeben und für 24 Stunden gerührt. Das Wasser-Feststoffgemisch wird abfiltriert und anschließend die Anionen der gelösten Salze quantitativ mit Hilfe photometrischer Verfahren (System Macherey und Nagel, Nanocolor 500 D) ermittelt.

5.3.5 Organische Substanzen

5.3.5.1 Screening mittels GC-MS

Für die qualitative Bestimmung organischer Bestandteile in den Proben wurden zunächst 10 g Probe in 50 ml Dichlormethan (Th. Geyer GmbH & Co. KG, DE)

suspendiert und anschließend für 1 h im Ultraschallbad belassen. Nach Filtration wurde der Extrakt für 30 min über Na_2SO_4 getrocknet und anschließend mittels Rotationsverdampfer (Genevac, UK) eingeengt. Von dem eingeengten Extrakt wurden daraufhin ~1 ml zur GC-MS Messung in ein Vial überführt.

Die Extrakte wurden anschließend an einem Gaschromatographen gekoppelt mit einem Massenspektrometer (GC-MS; GC 6890 mit 5973 MS, Agilent) analysiert. Dazu wurde 1 µL Probe bei 65 °C im „pulsed splitless mode“ injiziert. Nach einer Wartezeit von 0,02 min wurde der PTV-Injektor mit 720 °C/min bis auf 280 °C aufgeheizt. Die verdampfte Probe wurde mittels einer HP-5MS-Säule (30,0 m · 250 µm · 0,25 µm; Agilent) mit Helium (5.0) als Trägergas mit dem folgenden Temperaturprogramm getrennt: Anfangstemperatur 60 °C, Haltezeit 2 min; Aufheizen mit 30 °C/min bis 120 °C, mit 5 °C/min bis 320 °C mit einer Haltezeit von 5 min. Die Transferline zum Massenspektrometer hatte eine Temperatur von 280 °C. Massenspektren wurden im Bereich vom m/z = 30 bis m/z = 650 mit einer SCAN-Rate von 2,38 Scans/s aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Massenspektren wurden nach einer Untergrundkorrektur mit Spektren in der NIST-Bibliothek verglichen. Die Plausibilität dieser Treffer wurde durch einen Abgleich mit bei der ECHA registrierten Substanzen und Hinweise auf ihre Verwendung geprüft.

5.3.5.2 Quantifizierung von PAK mittels GC-MS

Für die Quantifizierung von PAK mittels GC-MS nach DIN EN 16181 [72] war zunächst eine Probenextraktion notwendig. Hierfür wurden 5 g Probe in 50 ml Aceton (Th. Geyer GmbH & Co. KG, DE) suspendiert und 100 µl interner Standard (PAK-Mix 31 deuteriert von Ehrenstorfer, verdünnt auf c= 1 mg/l in ACN) hinzugegeben. Nach 30 min schütteln (Horizontalschüttler, liegend, 125 Bewegungen/min) wurden 50 ml n-Hexan (Supelco Deutschland GmbH, DE) zur Suspension gegeben und die Probe für weitere 12 h geschüttelt. Nach dem Abdekantieren der überstehenden Flüssigkeit wurde der zurückgebliebene Feststoff nochmals in 50 ml n-Hexan suspendiert, für 20 min geschüttelt, der flüssige Überstand dekantiert und mit dem ersten Extrakt vereint. Zum Extrakt wurden nun 1 g NaCl gegeben und dieser anschließend zwei Mal mit je 400 ml bidest. Wasser ausgeschüttelt wurde. Nach Trocknung über Na_2SO_4 und Zugabe von 50 µl Isooctan wurde der Extrakt mittels Rotationsverdampfer (Genevac, UK) auf ca. 1 ml eingeengt. 200 µl des eingeengten Extraktes wurden zur GC-MS Messung in ein Vial überführt und der Rest als Rückstellprobe im Kühlschrank bei 4°C gelagert.

Die quantitative Bestimmung der PAK mit GC-MS von ausgewählten Proben erfolgte mit der hochauflösenden Kapillargaschromatographie und der online gekoppelten niederauflösenden Massenspektrometrie (GC-MS; GC 6890 mit 5973 MS, Agilent) im SIM-Modus (selected ion monitoring). Dazu wurde 1 µL Probe bei 50 °C im „pulsed splitless mode“ injiziert. Nach einer Wartezeit von 0,02 min wurde der PTV-Injektor mit 720 °/min bis auf 280 °C aufgeheizt. Die verdampfte Probe wurde mittels einer ZB-PAH-EU -Säule (30,0 m · 250 µm · 0,25 µm; Phenomenex) mit Helium (5.0) als Trägergas mit dem folgenden Temperaturprogramm getrennt: Anfangstemperatur 50 °C, Haltezeit 2 min; Aufheizen mit 30 °/min bis 120 °C, mit 5 °/min bis 320 °C mit einer Haltezeit von 5 min. Die Transferline zum Massenspektrometer hatte eine Temperatur von 280 °C. Die Elektronenstoßionisierung wurde mit 70 eV vorgenommen. Die Quantifizierung erfolgte über eine interne Standardkalibrierung (Mehrpunkt) über das Gesamtverfahren. Die Substanzen wurden durch ihre gaschromatographische Retentionszeit, durch drei charakteristische Massen und die entsprechend vorliegenden Intensitätsverhältnisse der Massensignale identifiziert.

5.3.5.3 Quantifizierung der Phthalate mittels GC-MS

Für die Quantifizierung der Phthalate wurden die Extrakte vom GC-MS-Screening verwendet (s. 5.3.5.1). Die quantitative Bestimmung der Phthalate mit GC-MS von ausgewählten Proben erfolgte mit der hochauflösenden Kapillargaschromatographie und der online gekoppelten niederauflösenden Massenspektrometrie (GC-MS; GC 6890 mit 5973 MS, Agilent) im SIM-Modus (selected ion monitoring). Dazu wurde 1 µL Probe bei 50 °C im „pulsed splitless mode“ injiziert. Nach einer Wartezeit von 0,02 min wurde der PTV-Injektor mit 720 °/min bis auf 280 °C aufgeheizt. Die Analyten in der verdampften Probe wurde mittels einer HP-5MS-Säule (30,0 m · 250 µm · 0,25 µm; Agilent) mit Helium (5.0) als Trägergas mit dem folgenden Temperaturprogramm getrennt: Anfangstemperatur 50 °C, Haltezeit 2 min; Aufheizen mit 30 °/min bis 120 °C, mit 5 °/min bis 320 °C mit einer Haltezeit von 5 min. Die Transferline zum Massenspektrometer hatte eine Temperatur von 280 °C. Die Elektronenstoßionisierung erfolgte mit 70 eV. Die Substanzen wurden durch ihre gaschromatographische Retentionszeit, durch drei charakteristische Massen und die entsprechend vorliegenden Intensitätsverhältnisse der Massensignale identifiziert. Die Quantifizierung erfolgte über eine externe Standardkalibrierung (Mehrpunkt).

5.4 Luftschadstoffe

5.4.1 Emissionsprüfkammer

Die Emissionsbestimmung für die Proben aus verschiedenen Wandtiefen (Tabelle 19) wurde in Mikrokammern (µ-CTE, Fa. Markes) durchgeführt. Ein wesentlicher Parameter für Emissionsprüfungen ist die flächenspezifische Luftdurchflussrate (q), die das Verhältnis von Luftwechsel (n) zu Raumbeladung (L) angibt (q = n/l). Hierbei besteht der Parameter Raumbeladung aus der Fläche der Probe und dem Volumen des Raumes oder der Prüfkammer (L=A/V). Dimensionen und Messparameter für die Untersuchungen sind folgende Werte: Volumen der Prüfkammer 0,044 l, Luftdurchsatz je Kammer ca. 28 ml/min (= 1,7 l/h); Luftaustauschrate (n; Luftwechsel pro Stunde) 38 1/h. Die Untersuchungen finden bei Temperaturen von 23 °C ± 2 K und ca. 50 % relativer Luftfeuchtigkeit statt. Mit diesen Parametern wurden je 5 g der Lehmproben in kleine Glas-Petrischalen eingewogen und anschließend in die µ-CTE eingebracht (Abbildung 15, Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18).

Abbildung 15: Lehmwandproben in Glaspetrischalen.

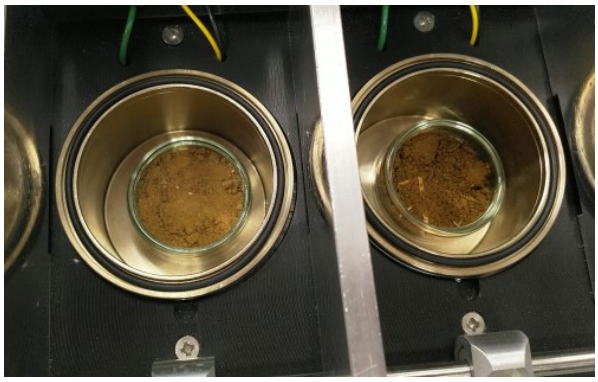


Abbildung 16: Mikrokammer bestückt mit zwei Lehmwandproben.

Abbildung 17: Mikrokammer mit 6 parallelen Kammern.

Abbildung 18: Probenahme an der Mikrokammer mit Tenax® TA-Rohren.

Nach der Beladung der Mikrokammer mit den zu untersuchenden Proben, wurden am 1., 7. Tag, evtl. alternativ am 6. Tag Probenahmen mit Tenax® TA für VOCs gemäß ISO 16000-6 vorgenommen [73]. Zusätzlich zu der Untersuchung bei 23 °C wurde am 6. oder 7. Tag nach der Probenahme die Kammer auf 60 °C geheizt und nach 1 Stunde erneut auf einem Tenax® TA-Rohr eine Luftprobe genommen. Mit diesen bei 60 °C gezogenen Proben ließ sich das Emissionspotential der Probe abschätzen, die bei einer Erhöhung der Werte das Potential besitzt, längerfristig VOC abzugeben.

5.4.2 GC-MS Untersuchungen

Die Quantifizierung wird mit einer GC-MS-Kombination durchgeführt. Die Auswertung der Einzelpeaks erfolgt über das Totalionenchromatogramm, die Komponenten werden dann weitgehend substanzspezifisch quantifiziert. Sofern keine Vergleichs-substanz vorlag, erfolgte die Quantifizierung über eine Toluolkalibrierung (Toluoläquivalente). Zur Qualitätssicherung wird vor der Probenahme ein interner Standard auf das Tenaxrohr gegeben.

5.5 Mikrobiologische Untersuchungen

5.5.1 Aufschluss und Nukleinsäure-Extraktion der Proben

Als Extraktionsmethode wurde eine Phenol-Chloroform-Extraktion gewählt, deren Protokoll für die Extraktion von Nukleinsäuren aus Boden spezialisiert war [74]. Das Protokoll wurde geringfügig modifiziert: Zirkoniumbeads (bis zur 400 µl Markierung), 400 µl kalter (4 °C) TPM-Puffer, 200 µl $NaPO_4^-$ Puffer und 600 µl vorgewärmtes (65 °C)

SDS-Aquaphenol-Gemisch wurden zusammen mit der Probe in ein 2,0 ml Schraubröhrchen gegeben. Anschließend wurden die Proben gemischt und bei 65 °C für 10 min im Thermomixer (Thermomixer comfort von Eppendorf AG) inkubiert. Danach erfolgte der Probenaufschluss im FastPrep™-24 (von MP Biomedicals™) für 60 s bei 6,0 m/s mit anschließender Inkubation bei -80 °C für 5 min. Nach der Zentrifugation (21500 g, 4 °C, 15 min) wurden 800 µL des Überstandes mit demselben Volumen TPM-Puffer in ein neues Schraubröhrchen gegeben, gemischt und wieder zentrifugiert (21500 g, 4 °C, 15 min). Erneut wurden 800 µl Überstand abgenommen und in einem neuen Schraubröhrchen mit 800 µl kaltem Phenol-Chloroform-Isoamylalkohol pipettiert und zentrifugiert (21500 g, 4 °C, 15 min). Zu 650 µl des Überstands wurden 1300 µl PEG-Puffer und 2 µl Glykogen zugegeben und gemischt. Nach dem Zentrifugieren (21500 g, 4 °C, 45 min) wurde der Überstand verworfen, das Pellet zweimal mit 500 µl Ethanol gewaschen und anschließend im Trockenschrank bei 37 °C getrocknet. Schließlich wurde das Pellet in 50 µl TE-Puffer resuspendiert. Die durch dieses Extraktionsverfahren gewonnenen Nukleinsäuren wurden anschließend bei -20 °C bis zum weiteren Einsatz gelagert.

5.5.2 Analyse der Probenextrakte mittels ITS basierter qPCR

Zum Ansetzen einer qPCR wurden Mikrotiterplatten (96 PCR Plate nonskirted, von VWR; Art.-Nr.: 732-2386) verwendet, welche mit „Microseal® ‘B‘ seal“-Folien (von Brand, Art.-Nr.: MSB1001) versiegelt wurden. Zur Quantifizierung wurden jedem qPCR-Durchlauf drei Negativkontrollen und drei unabhängig voneinander und dekadisch verdünnte Probenreihen mit fünf Verdünnungsstufen eingesetzt, um die sterile Arbeitsweise zu kontrollieren. Zur Überprüfung der Reinheit wurden nach einer Amplifizierung die Schmelzkurven von Proben, Standard-Verdünnungen und Negativkontrollen analysiert. Bei Zweifeln an der Reinheit des Amplicons wurden Proben in einer Nachquantifizierung wiederholt getestet. Die Amplifizierungsreaktion fand in einem CFX Opus 96 Real-Time PCR System (BIO RAD) statt. Die entsprechende Auswertung erfolgte mittels der CFX Maestro Software (BIO RAD).

5.5.3 Quantifizierung der pilzlichen Genkopienanzahl mittels qPCR und mit einem *Fusarium solani* Standard

Zur Quantifizierung von Genkopien der ITS Gen-Zielsequenz (internal transcribed spacer) innerhalb einer qPCR wurde ein Standard aus *Fusarium solani* (Stammnummer DSM 10696) verwendet. *F. solani* wurde auf einer Nährbodenplatte mit Kartoffelextrakt-Glucose-Bouillon-Medium (von Carl Roth GmbH + Co. KG, Art.-

Nr.: CP74.1) für 120 h kultiviert und anschließend mit 5 ml 0,9 %iger, steril filtrierter Kochsalzlösung und einem sterilen Teststäbchen vom Boden abgelöst. Die Suspension wurde über einen 40 µm Cell Strainer (Greiner Bio-One GmbH, Art.-Nr.: 542 040) gefiltert und die Sporenanzahl mit einer Neubauer Zählkammer ermittelt (Neubauer, von Paul Marienfeld GmbH & Co. KG, Art.-Nr.: 0642010). Die Sporensuspension wurde anschließend in 2 ml Aliquote überführt und bei 10000g zentrifugiert. Der Überstand wurde verworfen, das Sporenpellet in 200 µl PBS gelöst und anschließend eine Phenol-Chloroform-Extraktion durchgeführt [74].

Zur Quantifizierung der pilzlichen Genkopienanzahl wurden die Umweltnukleinsäureextrakte in einer ITS Gen-basierten qPCR gemessen. Bei einer solchen ITS Gen qPCR mit ITS4- und ITS7-Primern [75] wird die Zielsequenz der enthaltenen Pilze amplifiziert. Das Temperaturprofil war wie folgt: 96 °C für 2 min, dann 35 Zyklen: 96 °C für 15 sec, 53,4 °C für 30 sec, 72 °C für 1 min und nach 6 Minuten bei 72 °C wurde die Temperatur bei 4 °C gehalten. Die Amplifizierung fand in einem Reaktionsvolumen von 20 µl statt mit folgender Zusammensetzung: 10 µl SYBR® Green Supermix (von Bio-Rad Laboratories, Inc.; Art.-Nr. 172-5121; aus Frankfurt in Deutschland), je 1,2 µl der Primer (5 µM), 2,6 µl DEPC-Wasser (von Carl Roth GmbH & Co. KG; Art.-Nr. T143.1), 6,6 µl DEPC-Wasser und 1 µl Template des Umweltnukleinsäureextraktes.

5.5.4 ITS Gen basierte Sequenzierung und Auswertung der Sequenzrohdaten

Die Sequenzierung wurde von der Firma LGC Genomics GmbH durchgeführt. Die Sequenzierung wurde mit den gleichen Primern wie zuvor quantifiziert und es wurden im Durchschnitt 60000 Reads pro Probe angestrebt.

Für die Bibliotheksvorbereitung wurde die PCR mit 20 µl Reaktionsvolumen und 5x HOT FIRE Pol Blend Master Mix (Solis BioDyne, Tartu, Estland) auf ABI Veriti Thermocyclern (Applied Biosystems, Carlsbad, CA, USA) durchgeführt. Die PCR-Bedingungen waren 95 °C für 15 min, gefolgt von 30 Zyklen von 95 °C für 20 s, 54 °C für 40 s und 72 °C für 1 min, gefolgt von einem Verlängerungszyklus bei 72 °C für 10 min und einer Pause von 4 °C. Die amplifizierten Produkte wurden mittels Gelelektrophorese in der Quantität und Molekulargewicht geprüft. Die Amplifikationsprodukte (drei Wiederholungsreaktionen pro Probe) wurden in äquimolaren Mengen gepoolt und mit einem Agencourt AMPure XP Kit (Beckman Coulter, Krefeld, Deutschland) aufgereinigt. Illumina Nextera XT Indizes wurden an beiden Enden der Pilzamplikons hinzugefügt, um Bibliotheken zu erstellen. Danach wurden

die Bibliotheken multiplexiert auf der Illumina Miseq Sequenzierplattform mit gepaarten Enden (2x 300 bp) sequenziert.

Die von LGC übermittelten Sequenzrohdaten wurden in einer LGC eigenen Software Pipeline analysiert. Rohdaten Vorverarbeitung einschließlich Demultiplexing, Sortierung, Adapter Trimming und Merging Lesungen wurden mit Illumina bcl2fastq2 Konvertierung Software v2.20 und BBMerge v34.48 durchgeführt [76]. Die Sequenzqualität der Reads wurde mit der FastQC-Software, Version 0.11.8 kontrolliert [77]. Anschließend wurde die Sequenzvorverarbeitung und die Auswahl der Operational Taxonomic Units (OTUs) aus den Amplikons mit mothur 1.35.1 durchgeführt [78]. Für diese Auswahl der OTUs wurden Sequenzen mit mehrdeutigen Basen (Ns), mit Homopolymerabschnitten von mehr als 8 Basen oder mit einer durchschnittlichen Phred-Qualitätsbewertung unter 33 entfernt [79]. Es erfolgte ein Abgleich mit dem 16S Mothur-Silva SEED r138 Referenzalignment mit einer Filterung von kurzen Alignments (abgeschnittene oder unspezifische PCR-Produkte), einer Reduzierung von Sequenzierungsfehlern durch Vorclustern (bis zu 1 abweichende Base pro 100 Basen in einem Cluster zulässig), und einer Eliminierung von Chimären mit dem UChime-Algorithmus [80]. Die taxonomische Klassifizierung der Sequenzen wurde anhand der Silva-Referenzklassifizierung durchgeführt und Sequenzklassifikationen aus anderen Lebensbereichen wurden entfernt. Die Auswahl von OTUs wurde durch Clustering auf 99 % Identitätsniveau (unter Verwendung der Methode des durchschnittlichen Neighbour mit cluster.split) ausgeführt. Anschließend wurde Singleton-Sequenzen (einmalig vorkommende OTUs) entfernt, um die Bildung falscher OTUs zu reduzieren. Eine taxonomische OTU-Konsensbestimmung unter Einbeziehung der taxonomischen Klassifizierung der Sequenzen der Clustermitglieder wurde durchgeführt, und eine Erstellung eines *de novo* phylogenetischen Baumes mit der FastTree v2.1.7 Methode durchgeführt. Zuletzt wurde eine OTU-Tabelle für jede Probenahmestelle (im BIOM-Format) erstellt.

5.5.5 Einstufung von Pilzen in Risikogruppen

Auszug aus TRBA 460 [55]:

„Risikogruppe 1: biologische Arbeitsstoffe der Gruppe 1 sind Stoffe, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit verursachen;

Risikogruppe 2: biologische Arbeitsstoffe der Gruppe 2 sind Stoffe, die eine Krankheit beim Menschen hervorrufen können und eine Gefahr für Arbeitnehmer darstellen

könnten; eine Verbreitung des Stoffes in der Bevölkerung ist unwahrscheinlich; eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung ist normalerweise möglich;

Risikogruppe 3: biologische Arbeitsstoffe der Gruppe 3 sind Stoffe, die eine schwere Krankheit beim Menschen hervorrufen und eine ernste Gefahr für Arbeitnehmer darstellen können; die Gefahr einer Verbreitung in der Bevölkerung kann bestehen, doch ist normalerweise eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung möglich;

Risikogruppe 4: biologische Arbeitsstoffe der Gruppe 4 sind Stoffe, die eine schwere Krankheit beim Menschen hervorrufen und eine ernste Gefahr für Arbeitnehmer darstellen; die Gefahr einer Verbreitung in der Bevölkerung ist unter Umständen groß; normalerweise ist eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung nicht möglich."

6 Tabellarische Übersichten der Messergebnisse

6.1 Probenübersicht und Untersuchungsumfang

Tabelle 19: Auflistung aller entnommenen Lehmproben und durchgeführten Untersuchungen. Für Bodenparameter sind die Messergebnisse aufgelistet. „x“ = Messung durchgeführt, „a“ = keine Messung durchgeführt.

Probe-Nr. (lfd)	Probename	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	Feuchte [Gew.-%]	Korndichte [g/cm3]	Leitfähigkeit [µS/cm]	pH-Wert	Glühverlust [Gew.-%]	RFA	ICP-OES	Photometrie	Screening (GC-MS)	PAK (GC-MS)	Doppelbest. PAK (GC-MS)	VOC (GC-MS)	Sequenzierung
1	A-1-1-1	Pouch-Scheune	Innenwand	70	0-3	2,03	2,58	3700	6,61	2,18	x	x	x	x	x	-	x	-
2	A-1-1-2			70	7-10	2,30	2,57	4550	6,00	2,96	x	x	x	x	-	-	x	-
3	A-1-1-3			70	23,5-26,5	3,89	2,58	4250	6,14	2,71	x	x	x	x	-	-	x	-
4	A-1-1-4			70	40-43	1,89	2,60	4150	7,57	2,14	x	x	x	x	x	-	x	-
5	A-1-1-5			70	47-50	1,94	2,60	3750	7,47	8,73	x	x	x	x	x	-	x	-
6	A-1-2-1			110	0-3	2,01	2,61	2180	7,25	2,38	x	x	x	x	-	-	x	-
7	A-1-2-2			110	7-10	1,78	2,55	2230	6,92	2,17	x	x	x	x	-	-	x	-
8	A-1-2-3			110	23,5-26,5	2,40	2,58	2690	4,99	2,70	x	x	x	x	-	-	x	-
9	A-1-2-4			110	40-43	1,83	2,60	2290	7,14	2,29	x	x	x	x	-	-	x	-
10	A-1-2-5			110	47-50	2,12	2,60	2160	7,93	1,87	x	x	x	x	-	-	x	-
11	A-1-3-1			150	0-3	2,05	2,57	1157	7,35	3,84	x	x	x	x	-	-	x	-
12	A-1-3-2			150	7-10	2,36	2,60	728	7,80	2,45	x	x	x	x	-	-	x	-
13	A-1-3-3			150	23,5-26,5	2,09	2,59	823	7,23	2,67	x	x	x	x	-	-	x	-
14	A-1-3-4			150	40-43	1,88	2,62	833	7,69	1,83	x	x	x	x	-	-	x	-
15	A-1-3-5			150	47-50	1,79	2,60	718	7,92	2,09	x	x	x	x	-	-	x	-
16	A-1-4-1			230	0-3	1,90	2,60	928	6,90	1,85	x	x	x	x	-	-	x	-
17	A-1-4-2			230	7-10	1,62	2,59	563	6,74	2,79	x	x	x	x	-	-	x	-
18	A-1-4-3			230	23,5-26,5	2,44	2,58	544	6,72	2,59	x	x	x	x	-	-	x	-
19	A-1-4-4			230	40-43	1,86	2,61	470	7,00	2,10	x	x	x	x	-	-	x	-
20	A-1-4-5			230	47-50	1,33	2,60	397	7,20	0,88	x	x	x	x	-	-	x	-
21	A-2-1-1		Außen-wand	360	0-3	2,41	2,58	1735	5,44	2,18	x	x	x	x	x	-	x	-
22	A-2-1-2			360	7-10	5,26	2,46	89	6,40	1,90	x	x	x	x	x	-	x	-
23	A-2-1-3			360	24-26	3,89	2,53	204	6,44	2,27	x	x	x	x	-	-	x	-
24	A-3-1-1		Boden		0-10	7,52	2,36	126	7,37	-	x	x	x	x	x	-	-	-
25	A-3-1-2				10-21	3,58	2,54	52	6,50	0,81	x	x	x	-	-	-	-	-
26	A-3-1-3				21-33	3,04	2,57	35	6,39	0,57	x	x	x	-	-	-	-	-
27	B-1-1-1	Pouch-Backstube	Innenwand	30	0-3 (Putz)	2,35	-	-	-	-	x	-	x	-	x	-	-	-
28	B-1-1-2			30	7-10	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	-	-	-
29	B-1-1-3			30	23,5-26,5	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
30	B-1-1-4			30	40-43	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	-	-	-
31	B-1-1-5			30	47-50	-	2,59	2050	8,02	-	x	-	x	x	-	-	-	-
32	B-1-2-1			70	0-3	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	-	-	-
33	B-1-2-2			70	7-10	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	-	-	-
34	B-1-2-3			70	23,5-26,5	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
35	B-1-2-4			70	40-43	2,25	2,58	1280	8,15	-	x	-	x	x	-	-	-	-
36	B-1-2-5			70	47-50	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
37	B-1-3-1			110	0	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-
38	B-1-3-2			110	0-3	1,48	2,60	370	8,43	-	x	-	x	x	x	-	-	-
39	B-1-3-3			110	7-10	2,66	2,58	397	8,44	-	x	-	x	x	x	-	-	-
40	B-1-3-4			110	23,5-26,5	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
41	B-1-3-5			110	40-43	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
42	B-1-3-6			110	47-50	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-
43	B-1-4-1			150	0-3	2,28	2,61	561	8,19	-	x	-	x	x	x	-	-	-
44	B-1-4-2			150	7-10	-	-	-	-	-	x	x	x	-	x	-	-	-
45	B-1-4-3			150	23,5-26,5	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
46	B-1-4-4			150	40-43	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
47	B-1-4-5			150	47-50	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-

Probe-Nr. (lfd)	Probename	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	Feuchte [Gew.-%]	Korndichte [g/cm3]	Leitfähigkeit [µS/cm]	pH-Wert	Glühverlust [Gew.-%]	RFA	ICP-OES	Photometrie	Screening (GC-MS)	PAK (GC-MS)	Doppelbest. PAK (GC-MS)	VOC (GC-MS)	Sequenzierung
48	B-2-1-1		Außen wand	150	0-3	2,35	-	1000	8,03	-	x	-	x	x	x	-	-	-
49	B-2-1-2			150	7-10	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
50	B-3-1-1		Boden		0-10	18,25	1,97	33	7,60	-	x	-	-	x	x	-	-	-
51	B-3-1-2				10-24	14,47	2,56	68	7,37	-	x	-	-	-	-	-	-	-
52	B-3-1-3				24-40	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-
53	C-1-1-1	Halle-Gasthaus	Außenwand-Vorraum	150	0-3	4,64	2,47	5170	7,85	-	x	-	x	x	x	-	x	-
54	C-1-1-2			150	7	3,50	2,51	8675	7,86	5,22	x	x	x	x	x	-	x	-
55	C-1-1-3			150	24-26	-	-	-	-	-	x	x	x	x	-	-	x	-
56	C-2-1-1		Außenwand-Ballsaal	150	0	0,74	2,61	-	-	-	x	-	-	x	x	-	x	-
57	C-2-1-2			150	0-3	1,56	2,61	-	-	-	x	-	x	x	x	-	x	-
58	C-2-1-3			150	7-10	-	-	-	-	-	x	-	x	x	x	-	x	-
59	C-2-1-4			150	24-26	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-
60	C-3-1-1		Boden		0-10	7,47	2,31	-	-	-	x	-	x	x	x	-	-	-
61	D-1-1-1	Hohenfelden-Utzberger Hof	Außenwand-Schwarzküche	25	0-3	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-
62	D-1-1-2			25	6-11	-	-	-	-	-	x	x	x	-	x	x	-	-
63	D-1-1-3			25	23-27	-	-	-	-	-	x	x	x	-	x	x	-	-
-	nicht entnehmbar																	
64	D-1-1-5			25	47-50	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-
65	D-1-2-1			65	0-3	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-
66	D-1-2-2			65	6-11	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-
67	D-1-2-3			65	23-27	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
68	D-1-2-4			65	39-44	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
69	D-1-2-5			65	47-50	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-
70	D-1-3-1			105	0-3	2,53	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-
71	D-1-3-2			105	6-11	2,54	2,55	1241	8,08	5,29	x	-	x	-	x	x	-	-
72	D-1-3-3			105	23-27	2,54	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
73	D-1-3-4			105	39-44	2,54	-	-	-	-	x	-	x	x	x	x	-	-
74	D-1-3-5			105	47-50	2,51	-	-	-	-	x	-	x	x	x	x	x	-
75	D-1-4-1			145	0-3	2,55	-	-	-	-	x	-	x	x	x	x	x	-
76	D-1-4-2			145	6-11	2,55	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
77	D-1-4-3			145	23-27	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
78	D-1-4-4			145	39-44	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
79	D-1-4-5			145	47-50	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
80	D-1-5-1			225	0-3	2,46	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-
81	D-1-5-2			225	6-11	2,54	-	-	-	-	x	-	x	x	x	x	-	x
82	D-1-5-3			225	23-27	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
83	D-1-5-4			225	39-44	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-
84	D-1-5-5			225	47-50	-	-	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-
85	D-2-1-1		Außenwand-Stall	140	0-3	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	x	x
86	D-2-1-2			140	7-10	3,49	2,52	6765	7,65	6,70	x	-	x	-	-	-	-	x
87	D-2-1-3			140	24-26	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	x
88	E-1-1-1	Hohenfelden-Haus aus Abtsbessingen	Außenwand	140	0-3	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
89	E-1-1-2			140	7-10	3,17	2,49	1890	7,81	7,52	x	-	x	-	-	-	-	-
90	E-1-1-3			140	24-26	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
91	E-1-1-4			140	39-44	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
92	E-1-1-5			140	47-50	2,51	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-
93	F-1-0-1	Schleberoda-Viehstall	Innenwand-Stall	110	0-3	2,09	-	2360	8,11	-	x	-	-	x	-	-	-	x
94	F-1-1-1			150	0-3	1,76	-	340	8,55	-	x	-	x	x	-	-	-	x
95	F-1-1-2			150	6-11	2,44	2,61	226	8,43	-	x	-	x	-	x	-	-	x
96	F-1-1-3			150	23-27	2,38	-	112	8,69	-	x	-	x	-	-	-	-	x
97	F-1-2-1			250	0-3	2,09	-	246	8,69	-	x	-	x	x	-	-	-	-
98	F-1-2-2			250	6-11	3,14	-	171	8,55	-	x	-	x	-	-	-	-	x
99	F-2-1-1		Boden		0-10	25,78	-	69	7,81	-	x	-	-	x	x	x	-	-
100	F-2-1-2				10-45	19,02	-	56	7,69	-	x	-	-	-	-	-	-	-
101	F-2-1-3				33-45	16,76	-	60	8,14	-	x	-	-	x	-	-	-	-

6.2 Feststoffgehalte Elemente

Tabelle 20: Auflistung aller Feststoffgehalte in der Mantelverordnung geregelter Elemente mit Gefährdungspotenzial in mg/kg.
Weiß unterlegt = RFA, grau unterlegt = ICP-OES nach Königswasseraufschluss.

Probe-Nr.	Probename	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Tl	Zn
1	A-1-1-1	Pouch-Scheune	Innenwand	70	0-3	4,7	26,6	68,8	22,2	45,7	2,3	20,1	12,7	45,9	1,6	38,4
"	"			"	"	5,8	<BG	39,7	20,8	37,4	<BG	12,9	6,8	<BG	<BG	34,5
2	A-1-1-2			70	7-10	4,6	25,4	85,3	25,8	56,2	2,4	21,8	11,7	43,4	1,6	34,4
"	"			"	"	4,2	<BG	46,3	20,0	47,6	<BG	10,4	3,9	<BG	<BG	25,1
3	A-1-1-3			70	23,5-26,5	5,0	24,5	33,8	32,4	40,3	1,8	23,3	12,0	41,1	1,4	32,0
"	"			"	"	5,4	<BG	6,9	24,2	38,0	<BG	13,9	5,2	<BG	<BG	27,0
4	A-1-1-4			70	40-43	4,9	22,4	132,0	21,8	105,6	1,9	21,1	12,8	41,7	2,1	43,0
"	"			"	"	4,6	<BG	92,6	21,4	102,9	<BG	12,3	5,7	<BG	<BG	33,4
5	A-1-1-5			70	47-50	4,8	19,6	57,4	20,6	31,9	1,7	19,3	12,8	41,1	2,0	34,8
"	"			"	"	5,2	<BG	24,0	21,6	26,1	<BG	10,9	4,9	<BG	<BG	26,3
6	A-1-2-1			110	0-3	3,9	25,4	82,6	20,9	63,0	0,8	21,0	11,8	48,5	1,7	34,4
"	"			"	"	5,7	<BG	83,2	19,5	76,7	<BG	13,9	5,1	<BG	<BG	31,2
7	A-1-2-2			110	7-10	4,4	25,4	176,7	25,8	137,7	1,5	22,5	12,5	46,7	1,7	37,3
"	"			"	"	6,2	<BG	164,5	20,3	161,1	<BG	14,6	5,8	<BG	<BG	35,2
8	A-1-2-3			110	23,5-26,5	5,4	25,1	31,4	29,9	34,5	1,2	23,2	13,3	45,1	1,6	34,8
"	"			"	"	6,8	<BG	7,5	30,5	27,7	<BG	14,8	6,4	<BG	<BG	40,3
9	A-1-2-4			110	40-43	4,6	27,1	80,3	23,5	55,2	1,5	22,6	13,1	48,1	1,8	35,6
"	"			"	"	7,2	<BG	56,6	23,8	54,7	<BG	16,2	5,9	<BG	<BG	34,5
10	A-1-2-5			110	47-50	4,4	23,5	59,4	18,8	33,4	1,5	20,4	12,8	41,6	1,9	32,0
"	"			"	"	6,7	<BG	33,1	21,6	31,9	<BG	12,5	5,7	<BG	<BG	35,2
11	A-1-3-1			150	0-3	4,8	22,9	122,8	31,5	93,6	1,6	22,1	14,2	42,8	1,8	37,6
"	"			"	"	7,2	<BG	134,9	21,7	111,5	<BG	14,2	7,9	<BG	<BG	33,3
12	A-1-3-2			150	7-10	4,3	25,3	164,6	17,0	116,3	1,7	21,3	12,3	42,5	2,1	35,3
"	"			"	"	5,7	<BG	349,8	20,4	330,5	<BG	13,7	6,6	<BG	<BG	33,3
13	A-1-3-3			150	23,5-26,5	4,6	22,7	30,3	23,5	53,2	1,0	24,8	13,2	40,7	1,6	33,2
"	"			"	"	7,0	0,4	8,8	26,0	103,9	<BG	24,1	8,4	<BG	<BG	30,1
14	A-1-3-4			150	40-43	4,8	19,2	71,4	28,3	53,5	1,2	21,4	13,9	38,4	1,2	34,0
"	"			"	"	6,6	0,2	63,9	25,6	66,5	<BG	14,4	7,9	<BG	<BG	32,6
15	A-1-3-5			150	47-50	4,9	22,8	90,1	30,2	61,9	1,3	21,9	20,8	41,1	1,9	35,4
"	"			"	"	7,1	0,1	93,4	30,9	96,4	<BG	16,9	10,5	<BG	<BG	34,7
16	A-1-4-1			230	0-3	4,1	23,9	83,5	18,4	54,2	1,8	18,4	13,3	40,0	1,7	34,5
"	"			"	"	6,1	0,1	94,5	23,3	94,1	<BG	12,4	7,9	<BG	<BG	32,9
17	A-1-4-2			230	7-10	3,8	42,2	68,5	12,8	42,9	1,7	16,1	13,1	67,8	2,0	29,9
"	"			"	"	6,2	0,2	68,8	23,7	69,0	<BG	13,0	7,5	<BG	<BG	31,2
18	A-1-4-3			230	23,5-26,5	3,9	25,5	36,5	17,4	25,1	1,8	17,1	12,1	42,8	1,8	29,8
"	"			"	"	5,9	0,4	6,6	22,2	29,4	<BG	13,7	7,0	<BG	<BG	33,2
19	A-1-4-4			230	40-43	4,1	22,3	59,9	18,3	36,2	2,0	17,8	13,2	43,5	1,8	31,7
"	"			"	"	6,5	0,3	41,4	24,0	42,0	<BG	11,9	7,9	<BG	<BG	32,1
20	A-1-4-5			230	47-50	4,2	24,8	82,3	19,7	53,2	1,0	17,7	13,3	40,8	1,2	31,7
"	"			"	"	6,1	0,1	72,2	24,8	73,5	<BG	13,3	7,6	<BG	<BG	33,0
21	A-2-1-1		Außenwand	360	0-3	4,9	23,8	85,9	19,5	66,4	1,1	20,3	13,3	40,4	1,8	37,1
"	"			"	"	7,5	0,2	61,1	25,9	63,1	<BG	14,0	8,2	<BG	<BG	33,0
22	A-2-1-2			360	7-10	5,5	22,4	44,9	22,2	28,6	1,5	29,9	14,6	42,5	1,1	37,7
"	"			"	"	8,4	0,3	21,6	28,8	23,3	<BG	23,3	9,2	<BG	<BG	37,4
23	A-2-1-3			360	24-26	6,0	25,4	38,6	32,0	89,1	1,6	28,4	14,3	47,8	1,6	39,7
"	"			"	"	8,4	0,4	8,2	30,0	89,1	<BG	23,1	9,2	<BG	<BG	38,6
24	A-3-1-1		Boden		0-10	5,2	32,6	39,5	8,9	14,5	1,3	19,3	43,1	55,6	1,9	74,2
"	"			"	"	7,0	0,2	4,7	12,7	8,4	<BG	11,3	40,3	<BG	<BG	65,4

Probe-Nr.	Probename	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Tl	Zn
25	A-3-1-2				10-21	2,6	37,9	33,3	<BG	9,5	1,4	11,7	16,4	71,4	1,8	29,7
"	"			"	"	3,7	<BG	3,4	9,8	2,9	<BG	6,4	12,4	<BG	<BG	26,0
26	A-3-1-3				31-33	2,3	26,4	36,7	<BG	12,1	1,4	10,2	17,8	48,5	1,5	23,1
"	"					2,6	<BG	3,2	9,2	4,5	<BG	12,3	15,3	<BG	<BG	20,1
27	B-1-1-1	Pouch-Backstube	Innenwand	30	0-3 (Putz)	3,4	35,8	50,3	32,4	22,7	1,6	27,1	12,1	67,1	2,2	34,0
28	B-1-1-2			30	7-10	5,0	24,3	36,2	32,2	70,6	1,6	30,1	12,8	43,2	1,9	40,3
29	B-1-1-3			30	23,5-26,5	6,2	29,7	30,8	33,6	29,1	1,4	26,2	14,1	51,8	1,7	37,8
30	B-1-1-4			30	40-43	6,3	22,4	37,6	32,3	28,1	1,5	24,7	12,9	41,1	1,6	37,6
31	B-1-1-5			30	47-50	6,5	21,6	64,7	46,5	40,4	0,9	25,2	13,9	39,4	1,5	43,5
32	B-1-2-1			70	0-3	5,3	25,8	35,8	52,6	16,9	1,0	21,3	12,4	43,6	1,6	34,4
33	B-1-2-2			70	7-10	5,3	21,2	35,8	34,7	35,4	1,4	24,9	13,9	41,7	1,6	37,9
34	B-1-2-3			70	23,5-26,5	5,1	26,0	29,1	36,9	47,3	1,4	25,8	12,8	50,7	1,6	36,7
35	B-1-2-4			70	40-43	6,2	22,3	36,4	42,3	32,9	1,1	26,5	13,6	38,4	1,4	42,6
36	B-1-2-5			70	47-50	5,3	26,1	47,1	36,6	24,2	1,1	27,6	12,1	40,4	1,7	33,5
37	B-1-3-1			110	0	3,2	43,5	31,9	18,5	9,6	1,8	15,9	10,7	76,9	1,9	25,1
38	B-1-3-2			110	0-3	5,8	24,7	52,3	38,5	27,0	0,9	24,2	15,7	41,0	1,6	38,5
39	B-1-3-3			110	7-10	5,9	22,1	31,5	48,1	62,6	1,4	31,4	14,9	39,8	1,4	46,4
40	B-1-3-4			110	23,5-26,5	5,6	28,5	32,7	34,2	48,7	1,2	26,1	14,4	49,0	1,6	40,0
41	B-1-3-5			110	40-43	5,4	26,1	33,3	44,2	45,1	1,4	25,6	13,9	49,5	1,8	38,6
42	B-1-3-6			110	47-50	5,8	28,5	41,8	41,1	21,6	1,0	24,3	14,8	50,7	1,8	40,3
43	B-1-4-1			150	0-3	5,1	21,4	50,9	41,8	30,3	1,6	26,6	14,1	36,2	1,5	41,5
44	B-1-4-2			150	7-10	5,9	21,8	39,1	46,1	132,7	1,3	36,6	15,1	36,1	1,7	44,9
"	"			"	"	8,5	<BG	13,8	30,4	355,4	<BG	54,4	7,5	<BG	<BG	36,9
45	B-1-4-3			150	23,5-26,5	5,6	18,5	32,6	41,2	41,1	1,1	27,5	14,5	38,5	1,6	41,6
46	B-1-4-4			150	40-43	5,5	20,7	29,9	73,5	69,9	1,0	55,8	14,4	35,9	1,6	42,1
47	B-1-4-5			150	47-50	5,7	21,0	60,1	40,0	45,3	1,1	24,0	14,8	36,5	1,4	41,7
48	B-2-1-1		Außen wand	150	0-3	6,1	23,5	79,0	48,1	63,1	1,4	30,6	13,9	40,6	1,6	48,6
49	B-2-1-2			150	7-10	5,4	20,2	33,9	50,4	68,2	1,2	39,8	14,8	37,9	1,5	43,7
50	B-3-1-1		Boden		0-10	12,0	20,5	38,4	48,5	36,7	1,8	23,4	71,9	37,8	1,6	195,4
51	B-3-1-2				10-24	9,9	25,4	39,3	35,0	32,5	2,5	21,9	60,3	45,9	1,8	156,7
52	B-3-1-3				24-40	6,4	42,2	54,0	356,2	18,4	1,5	282,2	22,5	79,0	1,8	84,4
53	C-1-1-1	Halle-Gasthaus	Außenwand-Vorraum	150	0-3	4,5	35,4	39,5	21,5	21,6	2,3	18,9	23,5	60,9	1,7	32,9
54	C-1-1-2			150	7	5,0	18,6	42,8	19,6	98,3	2,5	24,7	23,4	39,3	2,0	35,1
"	"			"	"	6,0	<BG	9,1	18,7	87,8	<BG	19,4	15,4	<BG	<BG	30,4
55	C-1-1-3			150	24-26	4,4	24,6	41,1	47,7	152,0	2,6	50,6	22,9	41,4	1,8	40,7
"	"			"	"	6,3	<BG	7,3	18,9	137,4	<BG	23,6	15,2	<BG	<BG	40,2
56	C-2-1-1		Außenwand-Ballsaal	150	0 (Putz)	76,3	22,6	33,4	<BG	105,6	2,3	12,2	25,9	37,2	1,1	539,6
57	C-2-1-2			150	0-3	3,5	31,5	56,4	12,0	31,5	1,6	17,0	18,8	51,0	2,0	28,7
58	C-2-1-3			150	7-10	3,1	34,4	38,5	6,3	25,7	1,7	17,5	18,9	59,3	2,3	28,8
59	C-2-1-4			150	24-26	2,4	26,8	29,3	5,1	35,6	2,1	15,7	32,5	44,6	2,2	25,1
60	C-3-1-1		Boden		0-10	11,6	24,0	38,0	26,7	25,6	1,1	22,0	118,3	45,2	2,1	175,1
61	D-1-1-1	Hohenfelden-Utzberger Hof	Außenwand-Schwarzküche	25	0-3	4,8	22,0	44,9	21,4	35,6	1,8	21,9	15,4	44,9	2,4	35,2
62	D-1-1-2			25	6-11	2,6	20,6	45,7	96,9	152,1	1,8	78,4	10,8	39,1	1,9	44,4
"	"			"	"	4,6	<BG	15,8	75,3	164,3	<BG	80,6	1,0	<BG	<BG	42,1
63	D-1-1-3			25	23-27	2,3	29,3	35,0	134,1	56,5	1,5	86,5	11,6	45,2	2,0	49,8
"	"			"	"	4,2	<BG	19,9	90,0	49,9	<BG	84,7	1,0	<BG	<BG	46,6
64	D-1-1-5			25	47-50	4,5	28,2	41,9	47,6	25,7	2,0	36,1	16,3	41,1	1,8	52,2
65	D-1-2-1			65	0-3	5,6	24,2	45,0	69,2	24,8	1,7	37,9	20,4	41,0	2,0	63,6
66	D-1-2-2			65	6-11	5,5	24,4	42,9	70,1	35,8	1,5	47,9	20,2	41,3	1,9	68,9
67	D-1-2-3			65	23-27	5,3	22,0	46,4	62,7	74,9	1,9	45,0	19,7	41,3	1,8	88,9
68	D-1-2-4			65	39-44	4,7	23,2	41,0	62,8	51,9	1,4	44,1	18,3	39,1	1,7	61,3
69	D-1-2-5			65	47-50	5,5	21,7	70,0	61,7	43,1	1,7	41,6	17,8	43,4	2,0	63,8
70	D-1-3-1			105	0-3	6,1	20,1	46,2	68,0	31,3	1,6	44,2	25,2	34,7	1,9	72,5
71	D-1-3-2			105	6-11	4,9	20,9	49,0	62,9	42,6	2,5	45,9	48,6	36,4	2,0	75,4
72	D-1-3-3			105	23-27	5,6	23,5	44,3	65,1	37,7	2,1	44,6	19,3	39,9	2,0	67,3

Probe-Nr.	Probename	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Tl	Zn
73	D-1-3-4			105	39-44	5,2	21,2	52,9	71,9	35,6	1,6	46,7	31,5	38,0	1,9	63,2
74	D-1-3-5			105	47-50	5,8	22,5	56,1	71,5	33,4	1,8	42,2	18,1	39,8	2,0	59,1
75	D-1-4-1			145	0-3	4,4	23,4	39,8	58,5	34,2	1,6	38,6	66,5	37,2	1,6	58,7
76	D-1-4-2			145	6-11	5,3	20,3	45,5	66,7	31,3	1,9	44,7	19,4	37,8	1,9	64,3
77	D-1-4-3			145	23-27	4,9	23,1	41,3	83,3	28,2	1,8	42,3	18,4	37,8	1,9	58,9
78	D-1-4-4			145	39-44	5,4	20,4	54,2	74,7	34,2	2,3	42,2	20,0	39,9	1,9	63,4
79	D-1-4-5			145	47-50	4,5	22,9	49,9	52,5	27,9	2,2	35,7	17,4	40,2	1,7	52,2
80	D-1-5-1			225	0-3	7,1	24,6	57,1	60,4	36,3	1,5	43,4	23,5	38,4	1,5	76,4
81	D-1-5-2			225	6-11	5,5	20,6	48,5	88,9	40,2	1,6	49,6	20,6	39,2	1,7	71,0
82	D-1-5-3			225	23-27	5,1	20,2	47,4	82,9	49,4	2,0	48,1	20,7	36,9	2,0	76,9
83	D-1-5-4			225	39-44	5,4	22,6	48,0	79,1	28,4	1,8	43,8	20,2	37,1	2,3	70,8
84	D-1-5-5			225	47-50	5,5	22,9	45,3	61,3	24,9	1,2	41,3	18,4	39,8	1,6	63,3
85	D-2-1-1		Außenwand -Stall	140	0-3	6,5	21,5	60,6	75,8	32,4	1,4	43,3	18,3	38,6	1,9	54,1
86	D-2-1-2			140	7-10	4,9	24,0	73,2	88,2	52,7	3,1	44,9	20,8	41,9	2,1	70,3
87	D-2-1-3			140	24-26	4,9	23,1	48,9	80,8	38,3	1,4	53,3	19,6	40,9	2,0	65,2
88	E-1-1-1	Hohenfelden-Haus aus Abtsbessingen	Außenwand	140	0-3	6,1	20,6	45,8	47,9	42,2	1,6	31,4	18,0	37,0	2,0	66,8
89	E-1-1-2			140	7-10	5,7	28,7	36,7	54,9	32,6	1,1	29,3	18,1	46,6	2,0	58,1
90	E-1-1-3			140	24-26	5,5	21,6	41,1	55,1	32,0	1,7	34,0	18,9	35,1	1,8	58,3
91	E-1-1-4			140	39-44	6,1	20,2	40,7	55,5	32,5	1,7	31,2	18,9	35,1	1,9	58,3
92	E-1-1-5			140	47-50	5,6	19,5	39,0	41,6	27,5	2,7	29,2	19,3	39,4	1,9	57,4
93	F-1-0-1	Schleberoda-Viehstall	Innenwand-Stall	110	0-3	5,9	20,6	55,3	56,3	29,7	1,6	26,0	20,5	42,3	2,0	43,6
94	F-1-1-1			150	0-3	6,0	22,3	57,7	41,6	32,3	1,7	26,5	17,7	38,3	1,9	45,6
95	F-1-1-2			150	6-11	5,9	19,7	44,7	47,2	27,4	2,0	28,0	17,7	36,5	1,8	43,7
96	F-1-1-3			150	23-27	5,9	19,7	40,4	43,4	27,5	1,7	29,0	16,7	34,8	1,9	41,9
97	F-1-2-1			250	0-3	6,0	22,4	48,5	48,9	24,4	1,2	26,6	16,8	35,4	1,8	41,2
98	F-1-2-2			250	6-11	6,9	21,6	52,2	50,3	28,2	2,3	28,5	18,7	38,9	2,0	47,1
99	F-2-1-1		Boden		0-10	4,8	42,3	49,3	66,5	27,9	2,9	33,7	42,3	66,1	2,8	157,0
100	F-2-1-2				10-45	6,4	33,8	48,2	51,0	25,6	2,6	28,7	42,9	58,4	2,5	142,3
101	F-2-1-3				33-45	6,0	38,8	47,3	47,0	20,6	2,9	27,2	33,1	63,0	2,5	96,8

6.3 Ergebnisse organisches Screening mit GC-MS

*Tabelle 21: Auflistung der mittels GC-MS-Screening identifizierten Substanzen in Probe E-1-1-5. Die einzelnen Substanzen zur Retentionszeit t_R entsprechen den detektierten organischen Substanzen im DCM-Extrakt. Das entsprechende Chromatogramm ist in Abbildung 9 dargestellt. *Blindwert im DCM.*

t_R [min]	Substanzname	CAS-Nr.	Qualifire [%]	REACH	Jährliche Produktion [kT]	H-Sätze
4,67	Octane, 2-methyl-	003221-61-2	70	-		H226
5,62	1-Dodecene	000112-41-4	96	x	≥100 bis <1000	H304
6,02	Octanoic acid	000124-07-2	91	x	≥10 bis <100	H314, H318, H412
7,94	1-Tetradecene	001120-36-1	92	x	≥1 bis <10	H304
11,19	7-Hexadecene, (Z)-	035507-09-6	94	-		
11,82*	2,4-Di-tert-butylphenol	000096-76-4	93			
11,97	Dodecanoic acid	000143-07-7	98	x	≥10 bis <100	H318
13,24	Apocynin	000498-02-2	94	-		H315, H317, H319, H335
18,76	Xanthoxylin	000090-24-4	80	-		
21,89	Dibutyl phthalate	000084-74-2	97	x	≥1 bis <10	H360, H400
27,14	4,8,12,16-Tetramethylheptadecan-4-olide	096168-15-9	99	-		
28,16	1-Heptacosanol	002004-39-9	93	-		
29,93	Octadecane	000593-45-3	97	x	≥0,1 bis <1	H304
33,89	Cyclotetracosane	000297-03-0	94	-		
32,68	Nonacosane	000630-03-5	95	-		
33,07	Hexacosanal	026627-85-0	96	-		
33,88	1-Tetracosene	010192-32-2	98	-		
34,15	9-Octadecenamide, (Z)-	000301-02-0	78	-		H315, H319, H335, H413
35,26	Tetracosane	000646-31-1	98	-		
35,69	1,19-Eicosadiene	014811-95-1	96	-		
36,46	Pentacos-1-ene	016980-85-1	97	-		
37,69	Octacosane	630-02-4	95	-		
38,14	1,19-Eicosadiene	014811-95-1	98	-		
38,88	Nonacos-1-ene	018835-35-3	74	-		
40,99	.gamma.-Sitosterol	000083-47-6	99	-		
42,90	8-Methyl -9-propyl-2H,3H,6H-[1,4]dioxino[2,3-g]quinolin-7-one	1192657-35-4	92	-		
43,39	Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, octadecyl ester	002082-79-3	93	x	≥10	

*Tabelle 22: Auflistung der mittels GC-MS-Screening identifizierten Substanzen in Probe D-1-5-2. Die einzelnen Substanzen zur Retentionszeit t_R entsprechen den detektierten organischen Substanzen im DCM-Extrakt. Das entsprechende Chromatogramm ist in Abbildung 10 dargestellt. Grau unterlegt = PAK_{16},. *Blindwert im DCM.*

t_R [min]	Substanzname	CAS-Nr.	Qualifire [%]	REACH	Jährliche Produktion [kT]	H-Sätze
7,94	1-Tetradecene	001120-36-1	92	x	≥1 bis <10	H304
9,19	Duroquinone	000527-17-3	94	-		
9,42	1,2,3-Trimethoxybenzene	000634-36-6	97	-		
10,90	Benzene, 1,2,3-trimethoxy-5-methyl-	006443-69-2	94	x		
11,82*	2,4-Di-tert-butylphenol	000096-76-4	93			
11,97	Dodecanoic acid	000143-07-7	98	x	≥10 bis <100	H318
12,44	1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro-5,7-dimethyl-	006682-69-5	96	-		
13,38	Benzene, (1,1-dimethylpropyl)-	002049-95-8	68	x	≥0 bis <0,01	H317, H411
13,97	3',5'-Dimethoxyacetophenone	039151-19-4	94	-		
14,25	2,3-Dimethyl-4-nitroanisole	081029-03-0	90	-		
14,94	2-Amino-4,5-dimethoxybenzoic acid	005653-40-7	43	-		
15,02	Ethanone, 1-(3,4-dimethoxyphenyl)-	001131-62-0	96	-		
15,27	3-Methoxy-5-nitrosalicylaldehyde	017028-61-4	64	-		
15,82	Ethanone, 1-(1-Naphthalenyl)-	000941-98-0	90	x	≥1 bis <0,01	H302, H412
15,94	Benzene, 1,3-diisocyanato-2-methyl-	000091-08-7	58	x	≥1 bis <0,01	H315, H319, H317, H330, H335, H334, H351, H412
16,11	2H-1-Benzopyran-2-one, 3-methyl-	002445-82-1	89	-		
16,22	Benzene, 1,2-dimethoxy-4-nitro-	000709-09-1	94	-		
17,29	Ethanone, 1-(3,4,5-trimethoxyphenyl)-	001136-86-3	96	-		
17,61	4-Methylcarbazole	003770-48-7	74	-		
18,22	Nitrobenzene, 3,4,5-trimethoxy-	006307-90-0	98	-		H315, H319, H335
18,57	9H-Fluoren-9-one	000486-25-9	97	x		H411
19,20	Phenanthrene	000085-01-8	93	x		H410
19,60	n-Hexadecanoic acid	000057-10-3	99	x	≥10 bis >100	
19,96	N-(4-Methoxyphenyl)-2-hydroxyimino-acetamide	1000143-61-3	86	-		
20,20	2-Methylthio-5-nitro anisole	004163-77-3	59	-		
20,74	Naphthalene, 1-phenyl-	000605-02-7	91	-		
21,00	Anthrone	000090-44-8	95	x		H335, 319, 317
21,17	Anthracene, 2-methyl-	000613-12-7	92	-		
21,34	Phenanthrene, 2-methyl-	002531-84-2	98	-		
21,55	Anthrone	000090-44-8	94	-		H315, H319, H335
21,97	Phenanthrene, 1-methyl-	000832-69-9	97	-		
22,75	1H-Phenalen-1-one	000548-39-0	94	-		
22,85	Naphthalene, 2-phenyl-	000612-94-2	95	-		
23,17	Pyrene, 1,2,3,6,7,8-hexahydro-	001732-13-4	91	-		
23,34	4-Hydroxy-9-fluorenone	001986-00-1	93	-		
23,66	9,10-Anthracenedione	000084-65-1	97	x	≥1 bis <10	H350, H317
24,83	Fluoranthene	000206-44-0	96	-		H302, H400, H410
24,97	Cyclopenta(def)phenanthrenone	005737-13-3	97	-		
25,65	Benzo[b]naphtho[2,3-d]furan	000243-42-5	97	-		
25,93	9,10-Anthracenedione, 2-methyl-	000084-54-8	96	x	≥0,01 bis <0,1	H400, H410
26,06	Pyrene	000129-00-0	96	x		H400, H410
26,98	Pentacosane	000629-99-2	98	-		
27,14	4,8,12,16-Tetramethylheptadecan-4-olide	096168-15-9	90	-		
28,17	Cyclopentadecane	000295-48-7	97	-		
30,32	11H-Benzo[a]fluoren-11-one	000479-79-8	95	-		
30,85	Cyclopenta[cd]pyrene	027208-37-3	93	-		
30,97	7H-Benz[de]anthracen-7-one	000082-05-3	64	-		H315, H319
31,13	1-Tetracosene	010192-32-2	99	-		
31,37	11H-Benzo[a]fluoren-11-one	000479-79-8	95	-		
31,74	Benz[a]anthracene	000056-55-3	97	-		H350, H400, H410
32,09	Chrysene	000217-59-4	98	-		H312, H318, H410
32,69	Tetracosane	000646-31-1	98	-		
33,07	Oxirane, heptadecyl-	067860-04-2	95	-		
33,19	7H-Benz[de]anthracen-7-one	000082-05-3	97	-		
33,89	Cyclotetracosane	000297-03-0	94	-		
35,27	Heneicosane	000629-94-7	97	-		
35,69	Octacosanal	022725-64-0	98	-		
36,46	Heptacos-1-ene	015306-27-1	95	-		
36,67	Benzo[b]fluoranthene	000205-99-2	98	-		H350, H400, H410
36,78	Benzo[k]fluoranthene	000207-08-9	98	-		H350, H400, H410
36,89	Benzo-e-pyrene	000192-97-2	98	-		H350, H400, H410
37,69	Octacosan	630-02-4	95	-		
38,28	Benzo-a-pyrene	000050-32-8	97	-		H317, H340, H350, H360FD, H400, H410
40,98	.gamma.-Sitosterol	000083-47-6	99	-		

6.4 Übersicht untersuchte PAK und ermittelte Feststoffgehalte

Tabelle 23: Auflistung der PAK_{16} mit kanzerogenem Potential (Toxizitätsäquivalentfaktor, TEF) im Verhältnis zu BaP.
Die Reihenfolge entspricht der Elutionsfolge bei gaschromatographischer Trennung. Die Tabelle wurde entnommen aus: "Bewertung von Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch" [44]. Die Molekulargewichte steigen im Wesentlichen mit der Anzahl der aromatischen Ringe. Damit nimmt auch die Wasserlöslichkeit ab.

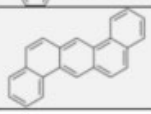
	Substanz	Abkürzung	Formel	Wasserlöslichkeit	TEF
Niedermolekuare PAK	Naphthalin	Naph		31,7	
	Acenaphthylen	Acy		3,93	0,01
	Acenaphthen	Ace		1,93	
	Fluoren	Flu		1,68-1,98	
	Phenanthren	Phen		1,2	
	Anthracen	Anth		0,076	0,01
	Fluoranthen	FluA		0,2-0,26	0,01
	Pyren	Pyr		0,077	
Höhermolekuare PAK	Benzo(a)anthracen	BaA		0,013	0,1
	Chrysen	Chry		0,003	0,01
	Benzo(b)fluoranthen	BbF		0,0012	1
	Benzo(k)fluoranthen	BkF		0,0008	0,1
	Benzo(a)pyren	**BaP**		0,0023	1
	Benzo(ghi)perylen	BghiP		0,0003	0,01
	Indeno(1,2,3-cd)pyren	I123P		0,062	0,1
	Dibenzo(ah)anthracen	DBahA		0,00054	1

Tabelle 24: Auflistung aller ermittelten Feststoffgehalte der PAK_{16} in entnommenen Proben in mg/kg. Bestimmt mittels GC-MS (Hexanextrakt, interner Standard).

Probe-Nr.	Probename	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	Doppelbestimmung*	Naphthalin	Acenaphthylen	Acenaphthen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthen	Pyren	Benz[a]anthracen	Chrysen	Benzo[b]fluoranthen	Benzo[k]fluoranthen	Benzo[a]pyren	Dibenz[a,h]anthracen	Benzo[ghi]perylen	Indeno[1,2,3-cd]pyren	Summe PAK_{16}
1	A-1-1-1	Pouch-Scheune	Innenwand	70	0-3	-	0,006	0,001	0,001	0,001	0,018	0,001	0,018	0,010	0,003	0,005	0,004	0,002	0,003	0,005	0,001	0,003	0,081
2	A-1-1-2			70	7-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	A-1-1-3			70	23,5-26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	A-1-1-4			70	40-43	-	0,002	0,000	0,001	0,001	0,006	0,000	0,004	0,003	0,001	0,003	0,001	0,000	0,001	0,002	0,001	0,001	0,027
5	A-1-1-5			70	47-50	-	0,003	0,000	0,001	0,001	0,016	0,001	0,033	0,028	0,007	0,013	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,113
6	A-1-2-1			110	0-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	A-1-2-2			110	7-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	A-1-2-3			110	23,5-26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	A-1-2-4			110	40-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	A-1-2-5			110	47-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	A-1-3-1			150	0-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	A-1-3-2			150	7-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	A-1-3-3			150	23,5-26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	A-1-3-4			150	40-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	A-1-3-5			150	47-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	A-1-4-1			230	0-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	A-1-4-2			230	7-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	A-1-4-3			230	23,5-26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	A-1-4-4			230	40-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	A-1-4-5			230	47-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	A-2-1-1		Außenwand	360	0-3	-	0,001	0,000	0,000	0,000	0,006	0,001	0,007	0,006	0,002	0,004	0,003	0,001	0,002	0,003	0,001	0,003	0,041
22	A-2-1-2			360	7-10	-	0,001	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,005	0,003	0,001	0,003	0,002	0,001	0,001	0,002	0,000	0,002	0,025
23	A-2-1-3			360	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	A-3-1-1		Boden		0-10	-	0,000	0,004	0,003	0,003	0,070	0,015	0,176	0,147	0,086	0,101	0,064	0,023	0,085	0,081	0,017	0,066	0,941
25	A-3-1-2				10-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	A-3-1-3				31-33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	B-1-1-1	Pouch-Backstube	Innenwand	30	0-3 (Putz)	-	0,049	< BG	0,004	0,011	0,053	0,000	0,012	0,006	0,001	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001	< BG	0,001	0,141
28	B-1-1-2			30	7-10	-	0,017	0,000	0,001	0,001	0,012	0,000	0,005	0,004	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001	< BG	0,001	0,046
29	B-1-1-3			30	23,5-26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	B-1-1-4			30	40-43	-	0,053	< BG	0,004	0,011	0,059	< BG	0,012	0,005	0,001	0,002	0,001	0,000	0,000	< BG	< BG	< BG	0,149
31	B-1-1-5			30	47-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	B-1-2-1			70	0-3	-	0,062	< BG	0,004	0,011	0,068	0,001	0,038	0,031	0,007	0,014	0,005	0,002	0,002	0,003	0,001	0,002	0,251

Probe-Nr.	Probename	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	Doppelbestimmung*	Naphthalin	Acenaphthylen	Acenaphthen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthen	Pyren	Benz[a]anthracen	Chrysen	Benzo[b]fluoranthen	Benzo[k]fluoranthen	Benzo[a]pyren	Dibenz[a,h]anthracen	Benzo[ghi]perylen	Indeno[1,2,3-cd]pyren	Summe PAK_{16}
33	B-1-2-2			70	7-10	-	0,056	< BG	0,004	0,010	0,056	0,000	0,018	0,009	0,001	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,161
34	B-1-2-3			70	23,5-26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	B-1-2-4			70	40-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	B-1-2-5			70	47-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	B-1-3-1			110	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	B-1-3-2			110	0-3	-	0,035	0,005	0,004	0,001	0,028	0,002	0,077	0,054	0,006	0,021	0,004	0,002	0,002	0,003	0,001	0,002	0,246
39	B-1-3-3			110	7-10	-	0,057	0,001	0,004	0,001	0,029	0,000	0,026	0,012	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,134
40	B-1-3-4			110	23,5-26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	B-1-3-5			110	40-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	B-1-3-6			110	47-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	B-1-4-1			150	0-3	-	0,037	0,011	0,003	0,002	0,110	0,003	0,195	0,145	0,014	0,038	0,005	0,003	0,002	0,003	0,001	0,002	0,573
44	B-1-4-2			150	7-10	-	0,056	< BG	0,004	0,013	0,175	0,001	0,071	0,035	0,004	0,005	0,003	0,001	0,002	0,003	0,001	0,002	0,375
45	B-1-4-3			150	23,5-26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	B-1-4-4			150	40-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	B-1-4-5			150	47-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	B-2-1-1		Außen wand	150	0-3	-	0,006	0,000	0,001	0,000	0,047	0,001	0,022	0,013	0,002	0,008	0,005	0,002	0,001	0,004	0,001	0,004	0,119
49	B-2-1-2			150	7-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	B-3-1-1		Boden		0-10	-	0,051	0,018	0,064	0,059	0,693	0,146	0,894	0,660	0,351	0,498	0,277	0,139	0,263	0,234	0,049	0,173	4,569
51	B-3-1-2				10-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	B-3-1-3				24-40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	C-1-1-1	Halle-Gasthaus	Außenwand -Vorraum	150	0-3	-	0,006	0,001	0,005	0,003	0,074	0,001	0,048	0,031	0,002	0,014	0,006	0,002	0,001	0,006	0,001	0,004	0,207
54	C-1-1-2			150	7	-	0,034	0,000	0,002	0,001	0,061	0,000	0,021	0,012	0,002	0,003	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,139
55	C-1-1-3			150	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	C-2-1-1		Außenwand- Ballsaal	150	0	-	0,003	0,000	0,002	0,001	0,026	0,000	0,019	0,010	0,001	0,022	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,089
57	C-2-1-2			150	0-3	-	0,004	0,001	0,003	0,002	0,076	0,001	0,045	0,024	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,162
58	C-2-1-3			150	7-10	-	0,013	0,000	0,003	0,001	0,027	0,000	0,011	0,005	0,001	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,069
59	C-2-1-4			150	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	C-3-1-1		Boden		0-10	-	0,013	0,015	0,010	0,006	0,127	0,018	0,298	0,233	0,126	0,207	0,120	0,054	0,109	0,106	0,021	0,081	1,542
61	D-1-1-1	Hohenfelden-Utzberger Hof	Außenwand- Schwarzküche	25	0-3	x	0,002	0,000	0,001	0,001	0,011	0,001	0,013	0,009	0,004	0,006	0,004	0,002	0,003	0,003	0,001	0,002	0,063
62	D-1-1-2			25	6-11	x	0,004	0,000	0,000	0,001	0,006	0,000	0,007	0,014	0,002	0,005	0,002	0,001	0,001	0,002	0,000	0,002	0,046
63	D-1-1-3			25	23-27	x	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	< BG	0,001	0,001	< BG	0,008
64	D-1-1-5			25	47-50	x	0,004	0,001	0,000	0,001	0,006	0,000	0,009	0,004	0,001	0,004	0,005	0,001	0,001	0,006	0,002	0,005	0,052
65	D-1-2-1			65	0-3	x	0,004	0,001	0,000	0,001	0,006	0,000	0,009	0,004	0,001	0,004	0,005	0,001	0,001	0,006	0,002	0,005	0,052
66	D-1-2-2			65	6-11	x	0,004	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,011	0,029	0,001	0,008	0,005	0,001	0,000	0,004	0,002	0,003	0,075
67	D-1-2-3			65	23-27	x	0,004	0,001	0,001	0,000	0,003	0,001	0,004	0,006	0,003	0,008	0,013	0,004	0,007	0,022	0,008	0,020	0,104

Probe-Nr.	Probename	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Entnahmetiefe [cm]	Doppelbestimmung*	Naphthalin	Acenaphthylen	Acenaphthen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthen	Pyren	Benz[a]anthracen	Chrysen	Benzo[b]fluoranthen	Benzo[k]fluoranthen	Benzo[a]pyren	Dibenz[a,h]anthracen	Benzo[ghi]perylen	Indeno[1,2,3-cd]pyren	Summe PAK_{16}
68	D-1-2-4			65	39-44	x	0,004	0,001	0,001	0,001	0,008	0,001	0,005	0,003	0,002	0,005	0,007	0,002	0,003	0,014	0,004	0,013	0,072
69	D-1-2-5			65	47-50	x	0,005	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,009	0,003	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001	0,005	0,001	0,005	0,045
70	D-1-3-1			105	0-3	x	0,007	0,004	0,002	0,003	0,367	0,012	0,707	0,613	0,111	0,216	0,061	0,029	0,030	0,078	0,016	0,061	2,317
71	D-1-3-2			105	6-11	x	0,009	0,002	0,002	0,002	0,246	0,007	0,315	0,233	0,030	0,063	0,022	0,009	0,009	0,022	0,006	0,018	0,995
72	D-1-3-3			105	23-27	x	0,009	0,000	0,001	0,001	0,083	0,001	0,008	0,006	0,002	0,006	0,006	0,002	0,002	0,010	0,003	0,009	0,147
73	D-1-3-4			105	39-44	x	0,006	0,001	0,001	0,001	0,016	0,001	0,005	0,003	0,001	0,003	0,004	0,001	0,002	0,008	0,003	0,007	0,064
74	D-1-3-5			105	47-50	x	0,004	0,000	0,001	0,000	0,010	0,000	0,009	0,003	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000	0,002	0,001	0,002	0,038
75	D-1-4-1			145	0-3	x	0,012	0,005	0,001	0,006	0,286	0,009	0,618	0,451	0,101	0,268	0,084	0,034	0,029	0,091	0,026	0,072	2,091
76	D-1-4-2			145	6-11	x	0,010	0,002	0,001	0,003	0,331	0,003	0,231	0,138	0,020	0,048	0,027	0,010	0,010	0,028	0,008	0,024	0,894
77	D-1-4-3			145	23-27	x	0,014	0,002	0,001	0,001	0,103	0,001	0,045	0,029	0,006	0,014	0,012	0,005	0,005	0,017	0,006	0,016	0,277
78	D-1-4-4			145	39-44	x	0,010	0,001	0,001	0,001	0,029	0,001	0,014	0,012	0,004	0,010	0,008	0,003	0,004	0,010	0,002	0,009	0,119
79	D-1-4-5			145	47-50	x	0,007	0,001	0,001	0,001	0,027	0,001	0,022	0,011	0,002	0,005	0,004	0,002	0,002	0,005	0,001	0,004	0,094
80	D-1-5-1			225	0-3	x	0,017	0,037	0,002	0,018	0,658	0,087	2,003	1,720	0,431	0,628	0,338	0,170	0,276	0,304	0,062	0,247	6,996
81	D-1-5-2			225	6-11	x	0,009	0,007	0,002	0,016	0,373	0,011	0,918	0,641	0,071	0,143	0,058	0,028	0,038	0,075	0,020	0,062	2,474
82	D-1-5-3			225	23-27	x	0,021	0,001	0,001	0,002	0,133	0,002	0,308	0,204	0,022	0,070	0,036	0,016	0,011	0,041	0,008	0,035	0,912
83	D-1-5-4			225	39-44	x	0,013	0,002	0,001	0,001	0,118	0,001	0,200	0,136	0,016	0,051	0,018	0,009	0,003	0,014	0,003	0,011	0,595
84	D-1-5-5			225	47-50	x	0,006	0,000	0,001	0,001	0,034	0,000	0,024	0,009	0,002	0,006	0,006	0,002	0,002	0,006	0,002	0,005	0,106
85	D-2-1-1		Außenwand-Stall	140	0-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	D-2-1-2			140	7-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	D-2-1-3			140	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	E-1-1-1	Hohenfelden-Haus Abtsbessingen	Außenwand	140	0-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
89	E-1-1-2			140	7-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	E-1-1-3			140	24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
91	E-1-1-4			140	39-44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
92	E-1-1-5			140	47-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
93	F-1-1-1	Schleberoda-Viehstall	Innenwand-Stall	110	0-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
94	F-1-2-1			150	0-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
95	F-1-2-2			150	6-11	-	0,007	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010
96	F-1-2-3			150	23-27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
97	F-1-3-1			250	0-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	F-1-3-2			250	6-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
99	F-2-1-1		Boden		0-10	x	0,007	0,013	0,025	0,020	0,248	0,036	0,457	0,341	0,195	0,240	0,192	0,084	0,157	0,167	0,039	0,132	2,352
100	F-2-1-2				10-45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
101	F-2-1-3				33-45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

7 Quellenverzeichnis

[1] Stieme-Kirst, S.L. (2022): Leben im Lehm – der traditionelle Hausbau in Mitteldeutschland. Der Holznagel 2, 19-27

[2] Schroeder, H. (2018): Lehmbau- Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Bd. 3, Springer Vieweg

[3] Steinhuber, U. (2019): Braunkohlenveredlung in Mitteldeutschland (Teil I (Nord)). Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau Verwaltungsgesellschaft mbH

[4] Möller, C. (2022): Braunkohle und Umweltschutz in der DDR, Bergbau und Umwelt in DDR und BRD, 43-70

[5] Preuschoff, C. (2002): Altlastensanierung in Sachsen-Anhalt, Landesanstalt für Altlastenfreistellung des Landes Sachsen-Anhalt (LAF)

[6] Lemke, M., Pistol, K., Schroeder, H. und Schulz, J.-U. (2022): Erarbeitung von Datengrundlagen und Muster-Umweltproduktdeklarationen für Lehmmauermörtel, Lehmsteine und Lehmplatten unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten des Recyclings, Abschlussbericht zum Kooperationsvorhaben, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter Az.: 35658/01

[7] Schroeder, H. (2020): Ökologische Bilanzierungen für Lehmbaustoffe. Tagungsband LEHM2020

[8] Röhlen, U. und Ziegert, C. (2020): Lehmbau-Praxis: Planung und Ausführung, Beuth Verlag GmbH

[9] Röhlen, U. und Ziegert, C. (2010): Lehmbau-Praxis: Planung und Ausführung, Beuth Verlag GmbH

[10] UBA (2015): Bodenzustand in Deutschland, www.umweltbundesamt.de/publikationen/bodenzustand-in-deutschland

[11] LHW Sachsen-Anhalt (2017): Bericht zur Beschaffenheit der Fließgewässer und Seen in Sachsen-Anhalt 2009-2013, https://lhw.sachsen-anhalt.de/untersuchen-bewerten/berichte-veroeffentlichungen/gewaesserberichte-sachsen-anhalt/gewaesserbericht-oberflaechengewaesser-2009-2013

[12] LFU Sachsen (2010): Geogene Hintergrundbelastungen, https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14924

[13] Geochemische Übersichtskarte der Böden des Freistaats Sachsen 1: 400 000; Kupfer im Oberboden, https://www.boden.sachsen.de/uebersichtskarten-fuer-schadstoffe-in-boeden-23988.html?_cp=%7B%22accordion-content-23994%22%3A%7B%220%22%3Atrue%7D%2C%22previousOpen%22%3A%7B%22group%22%3A%22accordion-content-23994%22%2C%22idx%22%3A0%7D%7D

[14] Schauer, J.J., Rogge, W.F., Hildemann, L.M., Mazurek, M.A., Cass, G.R. und Simoneit, B.R. (1996): Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers. Atmospheric Environment 30(22), 3837-3855

[15] Bernhardt, C. (2012): Erprobung und Vergleich der 3-Phasen-Extraktion - Bewertung belasteter Flächen auf Basis der Verfügbarkeit von Kontaminanten, Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin, Dissertation

[16] Rommel, P., Rommel, J., Schneider, J. und Schneider, V. (1998): Literaturstudie zum Transfer von organischen Schadstoffen im System Boden/Pflanze und Boden/Sickerwasser. Texte und Berichte zum Bodenschutz. Bd. 5

[17] Savric, I. (2001): Einflussfaktoren auf die Bindung und Mobilität organischer und anorganischer Stoffe in kontaminierten Rieselfeldböden, Fakultät III – Fakultät für Prozesswissenschaften, Technischen Universität Berlin

[18] Maliszewska-Kordybach, B. (1993): The effect of temperature on the rate of disappearance of polycyclic aromatic hydrocarbons from soils. Environmental pollution 79(1), 15-20

[19] Dachverband Lehm e.V. (2009): Lehmbau Regeln, 3. Auflage. Vieweg-Teubner. Stuttgart

[20] Volhard, F. (2009): Lehmbau Regeln- Begriffe - Baustoffe - Bauteile, Röhlen, U. Bd. 3, Vieweg + Teubner GWV Fachverlage GmbH: Wiesbaden
[21] BMUV (2021): "Mantelverordnung": Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, Bundesgesetzblatt, Jg. 2021, Teil I, Nr. 43, Bonn 16. Juli 2021
[22] DIN 18945: 2024-03, Lehmsteine - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung
[23] DIN 18946: 2024-03, Lehmmauermörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung
[24] DIN 18947: 2024-03, Lehmputzmörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung
[25] WTA-Merkblatt 4-5-99/D: 1999-09, Beurteilung von Mauerwerk - Mauerwerksdiagnostik
[26] UBA (2006): Mulde-Fische weiter mit Hexachlorcyclohexan (HCH) belastet. UBA - Hintergrundpapier, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3546.pdf
[27] DIN EN 15309: 2007-08, Charakterisierung von Abfällen und Böden - Bestimmung der elementaren Zusammensetzung durch Röntgenfluoreszenz-Analyse
[28] DIN EN 13657: 2003-1, Charakterisierung von Abfällen - Aufschluß zur anschließenden Bestimmung des in Königswasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen
[29] DIN EN ISO 17294-2: 2017-01, Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope
[30] DIN EN ISO 11885: 2009-09, Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES)
[31] LABO (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden, Anhang: Tabellen der Hintergrundwerte für Böden
[32] LABO (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden, 4. überarbeitete und ergänzte Auflage
[33] Wu, C.-M., Tsai, H.-T., Yang, K.-H. und Wen, J.-C. (2012): How Reliable is X-Ray Fluorescence (XRF) Measurement for Different Metals in Soil Contamination? Environmental Forensics 13(2), 110-121
[34] Beuge, P. und Ulique, A. (1997): Stoffliche Belastungen von Auenböden. Abschlußbericht des i. A. d. Sächs. Staatsmin. f. Umwelt u. Landesentwicklung geförderten Forsch.-vorhabens, TU Bergakademie Freiberg
[35] BGR (2017): Karte Geogene Hintergrundbelastung Chrom, https://numis.niedersachsen.de/trefferanzeige;jsessionid=5F2140A6299D04F9E4B72BFA27A87CDD?docuuid=4479b842-f14a-466d-9099-2a39f8de6d10&plugid=/ingrid-group:iplug-csw-dsc-bgr&docid=b8kTY4ABPPzLW3j8TDr2
[36] BGR (2017): HGW1000_Ni V2.0, (c), Karte Hintergundbelastung Nickel, Hannover, https://numis.niedersachsen.de/trefferanzeige?docuuid=6e6df03d-98a0-495e-8e2b-0077bbdf9e1d
[37] Pikuła, D. und Stępień, W. (2021): Effect of the Degree of Soil Contamination with Heavy Metals on Their Mobility in the Soil Profile in a Microplot Experiment. Agronomy 11(5)
[38] Freudenschuß, A., Obersteiner, E. und Schwarz, S. (2007): Schwermetalle in Oberböden, Kartenband, lebensministerium.at, https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/boden/boris/bericht_boris_kartenband.pdf
[39] Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen (2007): Stoffliche Bodenbelastungen in Sachsen: Arsen und Schwermetalle

[40] Werner, S., Nies, E., Peters, S., Pitzke, K., Hitz, J., Kraus, A., Reuther, S. und Franzen, C. (2019): Arsenhaltige Farben am Kulturerbe: Schweinfurter Grün in historischer Wandgestaltung. Arbeitsplatzbelastung 79(3), 57-66

[41] ECHA (2006): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission

[42] UBA (2016): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? UBA - Hintergrundpapier, https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/polyzyklische-aromatische-kohlenwasserstoffe#:~:text=Giftig!,Unvermeidbar%3F&text=Polyzyklische%20Aromatische%20Kohlenwasserstoffe%20(%E2%81%A0PAK,reichern%20sich%20in%20Organismen%20an.

[43] LHW Sachsen-Anhalt (2013): Sachstandsbericht zur Schadstoffbelastung der Oberflächengewässer in Sachsen-Anhalt und zur Identifizierung der Ursachen und Quellen 2013, https://lhw.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/Landesbetriebe/LHW/neu_PDF/5.0_GLD/Dokumente_GLD/Schadtstoffkonzept_Sedimentmanagement/2013_M%C3%A4rz_Sachstand_OW.pdf

[44] Landesamt für Umwelt Sachsen (2023): Bewertung von Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch, https://www.boden.sachsen.de/download/Bewertung_von_PAK_2023_11_17.pdf

[45] Fiedler, H. (1997): Stoffverhalten von Gaswerkspezifischen Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung

[46] Walter, T. (1998): Sorption polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe an Böden in ölfreien und in ölkontaminierten Systemen: Vergleich verschiedener Untersuchungsmethoden und Modeliierung, Institut für Technische Chemie, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Dissertation

[47] Furtmann, K. (1993): Phthalate in der aquatischen Umwelt, LWA-Materialien 6/93, Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen

[48] Hartmann, R. und Rohe, W. (2001): Phthalatkonzentrationen in Böden naturnaher Standorte des Sollings (Niedersachsen). Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 13(1), 13-17

[49] Nagorka, R. und Koschorreck, J. (2020): Trends for plasticizers in German freshwater environments - Evidence for the substitution of DEHP with emerging phthalate and non-phthalate alternatives. Environ Pollut 262, 114237

[50] EGGBI (2023): Weichmacher in Bauprodukten, https://www.eggbi.eu/fileadmin/EGGBI/PDF/Weichmacher_in_Bauprodukten.pdf

[51] Jasmund, K. und Lagaly, G. (1993): Tonminerale und Tone- Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Bd. 1, Steinkopff Heidelberg

[52] Klinge, A., Roswag-Klinge, E., Fontana, P., Hoppe, J., Richter, M. und Sjöström, C. (2016): Reduktion von Lüftungstechnik durch den Einsatz klimasteuernder Naturbaustoffe – Ergebnisse aus dem EU-Forschungsvorhaben H-House und der Baupraxis, Tagungsband der Internationalen Fachtagung LEHM2016, Eigenverlag DVL, Weimar

[53] natureplus e.V. (2015): Vergaberichtlinien Lehmputzmörtel, Eigenverlag. Neckargemünd

[54] UBA (2011): Richtwerte für zyklische Dimethylsiloxane in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt

[55] Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS) (2023): TRBA 460 - Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Einstufung von Pilzen in Risikogruppen, GMBl 2016, Nr. 29/30 vom 22.7.2016 und 6. Änderung vom 11.12.2023, GMBL Nr. 50
[56] BAuA, Feldstudien zu Biostoffen, https://www.baua.de/DE/Themen/Chemikalien-Biostoffe/Biostoffe-Infektionsschutz/Bioaerosole/Felduntersuchung.html
[57] BAuA, Biostoffe im Arbeitsschutz, https://www.baua.de/DE/Themen/Chemikalien-Biostoffe/Biostoffe-Infektionsschutz/Biostoffe/_functions/BereichsPublikationssuche_Formular.html?nn=8cb13e5c-743f-4a8f-90cc-c6d37546528a
[58] Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS) (2019): TRBA 230 - Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen in der Land- und Forstwirtschaft und bei vergleichbaren Tätigkeiten, GMBl 2019, Nr. 64 vom 4.12.2019 und 1. Änderung vom 5.6.2020, GMBl. Nr. 19
[59] Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS) (2017): TRBA 400 - Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung und für die Unterrichtung der Beschäftigten bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen, GMBl 2017, Nr. 10/11 vom 31. März 2017 und 1. Änderung vom 3.7.2018, GMBl Nr. 30
[60] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) (2024): TRGS 900 - Technische Regeln für Gefahrstoffe - Arbeitsplatzgrenzwerte, BArBl Heft 1/2006 S. 41-55, Zuletzt geändert und ergänzt: GMBl 2024 S. 411-412 [Nr. 21] (v. 17. Juni 2024)
[61] BetrSichV (2015): Betriebssicherheitsverordnung vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49), die zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146) geändert worden ist
[62] ArbMedVV (2008): Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge vom 18. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Juli 2019 (BGBl. I S. 1082) geändert worden ist
[63] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) (2023): TRGS 402 - Technische Regeln für Gefahrstoffe - Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition", GMBl 2023, S. 898-920 [Nr.42] (v.11.9.2023)
[64] DIN EN 12880 (2001-02): Charakterisierung von Schlämmen - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts; Deutsche Fassung EN 12880:2000, German Institute for Standardization
[65] DIN EN 14346: 2007-03 Charakterisierung von Abfällen - Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes
[66] DIN EN 13279-2: 2014-03, Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel - Teil 2: Prüfverfahren
[67] DIN ISO 10390: 2022-08, Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung des pH-Werts
[68] DIN EN 27888 (1993-11): Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit
[69] DIN 66137-3 (2005-09): Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 3: Gasauftriebsverfahren
[70] DIN EN 17685-1: 2023-04, Erdarbeiten - Chemische Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung des Glühverlusts
[71] DIN EN ISO 54321: 2021-04, Boden, behandelter Bioabfall, Schlamm und Abfall - Aufschluss von mit Königswasser löslichen Anteilen von Elementen
[72] DIN EN 16181: 2019-08, Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) mittels Gaschromatographie (GC) und Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC)
[73] DIN-ISO 16000-6: 2022-03, Innenraumluftverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung organischer Verbindungen (VVOC, VOC, SVOC) in Innenraum- und Prüfkammerluft durch aktive Probenahme auf Adsorptionsröhrchen, thermischer Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID

[74] Noll, M., Matthies, D., Frenzel, P., Derakshani, M. und Liesack, W. (2005): Succession of bacterial community structure and diversity in a paddy soil oxygen gradient. Environmental Microbiology 7(3), 382-395
[75] Lasota, S., Stephan, I., Horn Marcus, A., Otto, W. und Noll, M. (2019): Copper in Wood Preservatives Delayed Wood Decomposition and Shifted Soil Fungal but Not Bacterial Community Composition. Applied and Environmental Microbiology 85(4), e02391-18
[76] Bushnell, B., Rood, J. und Singer, E. (2017): BBMerge–accurate paired shotgun read merging via overlap. PloS one 12(10), e0185056
[77] Andrews, S. (2010): FastQC: a quality control tool for high throughput sequence data, Cambridge, United Kingdom
[78] Schloss, P.D., Westcott, S.L., Ryabin, T., Hall, J.R., Hartmann, M., Hollister, E.B., Lesniewski, R.A., Oakley, B.B., Parks, D.H. und Robinson, C.J. (2009): Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities. Applied and environmental microbiology 75(23), 7537-7541
[79] Glöckner, F.O., Yilmaz, P., Quast, C., Gerken, J., Beccati, A., Ciuprina, A., Bruns, G., Yarza, P., Peplies, J. und Westram, R. (2017): 25 years of serving the community with ribosomal RNA gene reference databases and tools. Journal of biotechnology 261, 169-176
[80] Edgar, R.C., Haas, B.J., Clemente, J.C., Quince, C. und Knight, R. (2011): UCHIME improves sensitivity and speed of chimera detection. Bioinformatics 27(16), 2194-2200

8 Anlagen

8.1 Erläuterung zur Probennummerierung

Bei der Nummerierung bzw. der Vergabe der Objektbuchstaben (siehe Tabelle 4 und Abschnitt 2.1) wurde bei der BAM und ZRS leicht unterschiedlich vorgegangen. Die in diesem Bericht verwendeten Probenbezeichnungen wurden entsprechend folgendem System vergeben (siehe auch Probenübersicht in Tabelle 19):

O-x-y-z

wobei

O = Objekt (A bis F in zeitlicher Reihenfolge der Probenahmen)
x = Probennahmeort (Wände oder Bodenproben durchnummeriert für das gleiche Objekt)
y = Entnahmehöhe (Horizont in cm) von OKFF
z = Entnahmetiefe (durchlaufende Nummer, Entnahmetiefen siehe Tabelle 19)

Beim Projektpartner ZRS wurde wie folgt vorgegangen:

Projektnummer_Teilprojekt_Standort_Entnahmehöhe_Entnahmetiefe

Bei der Vergabe der Objektbuchstaben wurde für den Utzberger Hof in Hohenfelden für alle Wände und die Bodenprobe der Buchstabe D vergeben, während bei ZRS für die Schwarzküche (einschl. Bodenprobe) und den Stall die Buchstaben D bzw. E vergeben wurden. Dadurch ergab sich auch eine Verschiebung bei der weiteren Vergabe der Buchstaben für die Objekte.

Aus Gründen der Qualitätssicherung bei der Dokumentation und Rückverfolgbarkeit der Originaldaten für die Untersuchungsergebnisse wurde auf eine Korrektur der Probenummerierung verzichtet. Daher wird im Folgenden ein Übersetzungsschlüssel für die Nummern bei der BAM und ZRS zur Verfügung gestellt (siehe 8.2). Die Entnahmehöhe wurde manchmal bei ZRS auch von der Oberkante Sockel (OKS) angegeben.

In den Ergebnistabellen des Projektpartners ZRS (siehe 8.3) ist die Zuordnung der Ergebnisse durch detaillierte Informationen zum Objektnamen sowie den Entnahmehöhen und -tiefen zusätzlich leicht verständlich. Die Entnahmehöhen wurden ab Fußboden (d.h. OKRF bzw. OKFF) teilweise aber auch ohne Berücksichtigung des Sockels erfasst, d.h. OKS (Oberkante ab Sockelhöhe). Den Nummern bei ZRS ist zusätzlich teilweise die Projektnummer 20029_2 vorangestellt.

8.2 Übersetzungsschlüssel für die Probennummern bei den Projektpartnern

Tabelle 25: Übersetzungsschlüssel für die Probennummern bei der BAM und ZRS

Lfd.-Nr.	Probenummer BAM	Probenummer ZRS	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Höhe über OKS [cm]	Entnahmetiefe [cm]
1	A-1-1-1	A_1_1	Pouch-Scheune	Innenwand	70		0-3
2	A-1-1-2	A_1_2			70		7-10
3	A-1-1-3	A_1_3			70		23,5-26-5
4	A-1-1-4	A_1_4			70		40-43
5	A-1-1-5	A_1_5			70		47-50
6	A-1-2-1	A_2_1			110		0-3
7	A-1-2-2	A_2_2			110		7-10
8	A-1-2-3	A_2_3			110		23,5-26-5
9	A-1-2-4	A_2_4			110		40-43
10	A-1-2-5	A_2_5			110		47-50
11	A-1-3-1	A_3_1			150		0-3
12	A-1-3-2	A_3_2			150		7-10
13	A-1-3-3	A_3_3			150		23,5-26-5
14	A-1-3-4	A_3_4			150		40-43
15	A-1-3-5	A_3_5			150		47-50
16	A-1-4-1	A_4_1			230		0-3
17	A-1-4-2	A_4_2			230		7-10
18	A-1-4-3	A_4_3			230		23,5-26-5
19	A-1-4-4	A_4_4			230		40-43
20	A-1-4-5	A_4_5			230		47-50
21	A-2-1-1	A_5_1		Außen wand	360		0-3
22	A-2-1-2	A_5_2			360		7-10
23	A-2-1-3	A_5_3			360		24-26
24	A-3-1-1	A_6_1		Boden			0-10
25	A-3-1-2	A_6_2					10-21
26	A-3-1-3	A_6_3					31-33
27	B-1-1-1	B_1_1	Pouch-Backstube	Innenwand	30		0-3 (Putz)
28	B-1-1-2	B_1_2			30		7-10
29	B-1-1-3	B_1_3			30		23,5-26-5
30	B-1-1-4	B_1_4			30		40-43
31	B-1-1-5	B_1_5			30		47-50
32	B-1-2-1	B_2_1			70		0-3
33	B-1-2-2	B_2_2			70		7-10
34	B-1-2-3	B_2_3			70		23,5-26-5
35	B-1-2-4	B_2_4			70		40-43
36	B-1-2-5	B_2_5			70		47-50
37	B-1-3-1	-			110		0 (Kalkputz)
38	B-1-3-2	B_3_1			110		0-3
39	B-1-3-3	B_3_2			110		7-10
40	B-1-3-4	B_3_3			110		23,5-26-5
41	B-1-3-5	B_3_4			110		40-43
42	B-1-3-6	B_3_5			110		47-50
43	B-1-4-1	B_4_1			150		0-3
44	B-1-4-2	B_4_2			150		7-10
45	B-1-4-3	B_4_3			150		23,5-26-5
46	B-1-4-4	B_4_4			150		40-43
47	B-1-4-5	B_4_5			150		47-50
48	B-2-1-1	B_5_1		Außenwand	150		0-3
49	B-2-1-2	B_5_2			150		7-10
50	B-3-1-1	-		Boden			0-11
51	B-3-1-2	-					11-24
52	B-3-1-3	-					24-40
53	C-1-1-1	C_1_1	Halle-Gasthaus	Außenwand-Vorraum	150		0-3
54	C-1-1-2	C_1_2			150		7-10
55	C-1-1-3	C_1_3			150		24-26

Lfd.-Nr.	Probenummer BAM	Probenummer ZRS	Probenentnahmeort	Entnahmeobjekt	Höhe über OKFF [cm]	Höhe über OKS [cm]	Entnahmetiefe [cm]
56	C-2-1-1	-			150		0 (Kalkputz)
57	C-2-1-2	C_2_1		Außenwand-Ballsaal	150		0-3
58	C-2-1-3	C_2_2			150		7-10
59	C-2-1-4	C_2_3			150		24-26
60	C-3-1-1	C_HZ1		Boden			0-10
61	D-1-1-1	D_1_1			25	13	0-3
62	D-1-1-2	D_1_2			25	13	6-11
63	D-1-1-3	D_1_3			25	13	23-27
-	D-1-1-4	D_1_4			25	13	nicht entnommen
64	D-1-1-5	D_1_5			25	13	47-50
65	D-1-2-1	D_2_1			65	53	0-3
66	D-1-2-2	D_2_2			65	53	6-11
67	D-1-2-3	D_2_3			65	53	23-27
68	D-1-2-4	D_2_4			65	53	39-44
69	D-1-2-5	D_2_5			65	53	47-50
70	D-1-3-1	D_3_1			105	93	0-3
71	D-1-3-2	D_3_2			105	93	6-11
72	D-1-3-3	D_3_3			105	93	23-27
73	D-1-3-4	D_3_4			105	93	39-44
74	D-1-3-5	D_3_5			105	93	47-50
75	D-1-4-1	D_4_1			145	133	0-3
76	D-1-4-2	D_4_2			145	133	6-11
77	D-1-4-3	D_4_3			145	133	23-27
78	D-1-4-4	D_4_4			145	133	39-44
79	D-1-4-5	D_4_5			145	133	47-50
80	D-1-5-1	D_5_1			225	213	0-3
81	D-1-5-2	D_5_2			225	213	6-11
82	D-1-5-3	D_5_3			225	213	23-27
83	D-1-5-4	D_5_4			225	213	39-44
84	D-1-5-5	D_5_5			225	213	47-50
85	D-2-1-1	E_1_1			140	100	0-3
86	D-2-1-2	E_1_2		Außenwand-Stall	140	100	7-10
87	D-2-1-3	E_1_3			140	100	24-26
88	E-1-1-1	F_1_1			140	100	0-3
89	E-1-1-2	F_1_2			140	100	7-10
90	E-1-1-3	F_1_3			140	100	24-26
91	E-1-1-4	F_1_4			140	100	39-44
92	E-1-1-5	F_1_5			140	100	47-50
93	F-1-1-1	-			110	-	0-3
94	F-1-2-1	G_1_1			150	100	0-3
95	F-1-2-2	G_1_2		Innenwand-Stall	150	100	6-11
96	F-1-2-3	G_1_3			150	100	23-27
97	F-1-3-1	G_2_1			250	200	0-3
98	F-1-3-2	G_2_2			250	200	6-11
99	F-2-1-1	-					0-10
100	F-2-1-2	-		Boden			10-45
101	F-2-1-3						33-45

Hohenfelden-Utzberger Hof

Außenwand-Schwarzküche

Hohenfelden-Haus Abtsbessingen

Außenwand

Schleberoda-Viehstall

8.3 Ergebnisse der Untersuchungen ZRS Ingenieure

Die Ergebnisdaten der Feuchte- und Salzbestimmungen beim Projektpartner ZRS Ingenieure GmbH (kurz ZRSI) werden im Folgenden in vier Anlagen dargestellt.

Anlage 1: Objekt A

Anlage 2: Objekte B und C

Anlage 3: Objekte D, E und F (nach der Kennzeichnung durch ZRSI)

Anlage 4: Objekt G (nach der Kennzeichnung durch ZRSI)

Aufnahmedaten

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_A_Wellerscheune

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

	Höhe [cm] OKRF	A-Wellerscheune Achse I EG - Innenwand					
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm Proben	24 - 26 cm Proben	10 - 7 cm Proben	3 - 0 cm Proben	
Einfahrt	230	A_4_1	A_4_2	A_4_3	A_4_4	A_4_5	Stall
	150	A_3_1	A_3_2	A_3_3	A_3_4	A_3_5	
	110	A_2_1	A_2_2	A_2_3	A_2_4	A_2_5	
	70	A_1_1	A_1_2	A_1_3	A_1_4	A_1_5	

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

	Höhe [cm] OKRF	A-Wellerscheune Achse II EG - Außenwand					
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm Proben	24 - 26 cm Proben	10 - 7 cm Proben	3 - 0 cm Proben	
Außen	367	A_5_1	A_5_2	A_5_3	-	-	Außen

Tiefe ins Erdreich [cm]	Profil Boden Südseite
	Proben
0-10	A_6_1
10-21	A_6_2
21-33	A_6_3

OKRF... Oberkante Rohfußboden
OKFF... Oberkante Fertigfußboden
OKS... Oberkante Sockel
OKG... Oberkante Gelände

ZR
SI

Aufnahmedaten

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_A_Wellerscheune

lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Achse Probe	Geschoss	Höhe über OKRF in cm	Entnahmetiefe in cm	Entnahmematerial	Probenentnahme	Befundbeschreibung	auszuführende Untersuchungen
1	20029_2_A_1_1	I	EG	70	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
2	20029_2_A_1_2	I	EG	70	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
3	20029_2_A_1_3	I	EG	70	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
4	20029_2_A_1_4	I	EG	70	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Stallseite	S
5	20029_2_A_1_5	I	EG	70	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Stallseite	S
6	20029_2_A_2_1	I	EG	110	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
7	20029_2_A_2_2	I	EG	110	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
8	20029_2_A_2_3	I	EG	110	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
9	20029_2_A_2_4	I	EG	110	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Stallseite	S
10	20029_2_A_2_5	I	EG	110	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Stallseite	S
11	20029_2_A_3_1	I	EG	150	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
12	20029_2_A_3_2	I	EG	150	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
13	20029_2_A_3_3	I	EG	150	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
14	20029_2_A_3_4	I	EG	150	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Stallseite	S
15	20029_2_A_3_5	I	EG	150	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Stallseite	S
16	20029_2_A_4_1	I	EG	230	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
17	20029_2_A_4_2	I	EG	230	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
18	20029_2_A_4_3	I	EG	230	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Seite Einfahrt	S
19	20029_2_A_4_4	I	EG	230	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Stallseite	S
20	20029_2_A_4_5	I	EG	230	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl	Innenwand, Stallseite	S
21	20029_2_A_5_1	II	OG	367	0,3	Wellerlehm	Bohrmehl	Außenwand, feucht	S
22	20029_2_A_5_2	II	OG	367	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl	Außenwand, Tendenz innen trockener	S
23	20029_2_A_5_3	II	OG	367	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl	Außenwand, Tendenz innen trockener	S
24	20029_2_A_6_1	III	Boden	0-10	-	Erde	Einstich	Profil Boden Südseite	S
25	20029_2_A_6_2	III	Boden	10-21	-	Erde	Einstich	Profil Boden Südseite	S
26	20029_2_A_6_3	III	Boden	21-33	-	Erde	Einstich	Profil Boden Südseite	S

OKRF... Oberkante Rohfußboden
OKFF... Oberkante Fertigfußboden
OKS... Oberkante Sockel
OKG... Oberkante Gelände
S... Salzbelastung
F... Feuchtegehalt

Notizen Achse I Höhe 70 und 110 cm: Zuschlag mürbe
Achse I ab Höhe 150 cm: Zuschlag fester
Achse I Höhe 230 cm: Zuschlag von Einfahrtsseite fester als von Stallseite
*Zuschlag = Reisig, Zweige
Achse II: an einigen Stellen Heidekraut, Reisig und dünne Zweige als Zuschlag
Achse A II: Auch Stroh als Zuschlag

ZR
SI

Trocknungsprotokoll

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_A_Wellerscheune

Trocknung (40 °C)

	$Masse_{Probe}$ in g				
Probenbezeichnung	vor Versuch	Trocknung 02.11.2022	Trocknung 03.11.2022	Masse-differenz	Behältermasse
20029_2_A_1_1	-	27,21	27,18	-0,1	6,07
20029_2_A_1_2	-	26,92	26,93	0,0	5,96
20029_2_A_1_3	-	19,36	19,34	-0,1	5,97
20029_2_A_1_4	-	22,40	22,38	-0,1	6,06
20029_2_A_1_5	-	16,04	16,03	-0,1	6,07
20029_2_A_2_1	-	26,25	26,22	-0,1	6,02
20029_2_A_2_2	-	16,37	16,35	-0,1	6,03
20029_2_A_2_3	-	22,22	22,19	-0,1	6,02
20029_2_A_2_4	-	23,17	23,14	-0,1	6,03
20029_2_A_2_5	-	25,90	25,88	-0,1	5,93
20029_2_A_3_1	-	21,77	21,75	-0,1	6,07
20029_2_A_3_2	-	23,46	23,44	-0,1	6,07
20029_2_A_3_3	-	18,74	18,72	-0,1	5,96
20029_2_A_3_4	-	23,30	23,28	-0,1	6,08
20029_2_A_3_5	-	29,55	29,53	-0,1	5,93
20029_2_A_4_1	-	22,17	22,16	0,0	6,07
20029_2_A_4_2	-	23,36	23,34	-0,1	5,97
20029_2_A_4_3	-	29,22	29,20	-0,1	6,05
20029_2_A_4_4	-	24,46	24,45	0,0	6,07
20029_2_A_4_5	-	24,94	24,93	0,0	6,02
20029_2_A_5_1	-	22,86	22,85	0,0	6,08
20029_2_A_5_2	-	21,83	21,81	-0,1	5,97
20029_2_A_5_3	-	23,90	23,88	-0,1	5,96
20029_2_A_6_1	-	34,89	34,88	0,0	6,10
20029_2_A_6_2	-	37,04	37,03	0,0	5,92
20029_2_A_6_3	-	36,14	36,14	0,0	5,96

Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinanderfolgenden Wägungen im Abstand von 24 Stunden um höchstens 0,2 % der Masse bezogen auf den kleineren Messwert voneinander abweichen.

ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

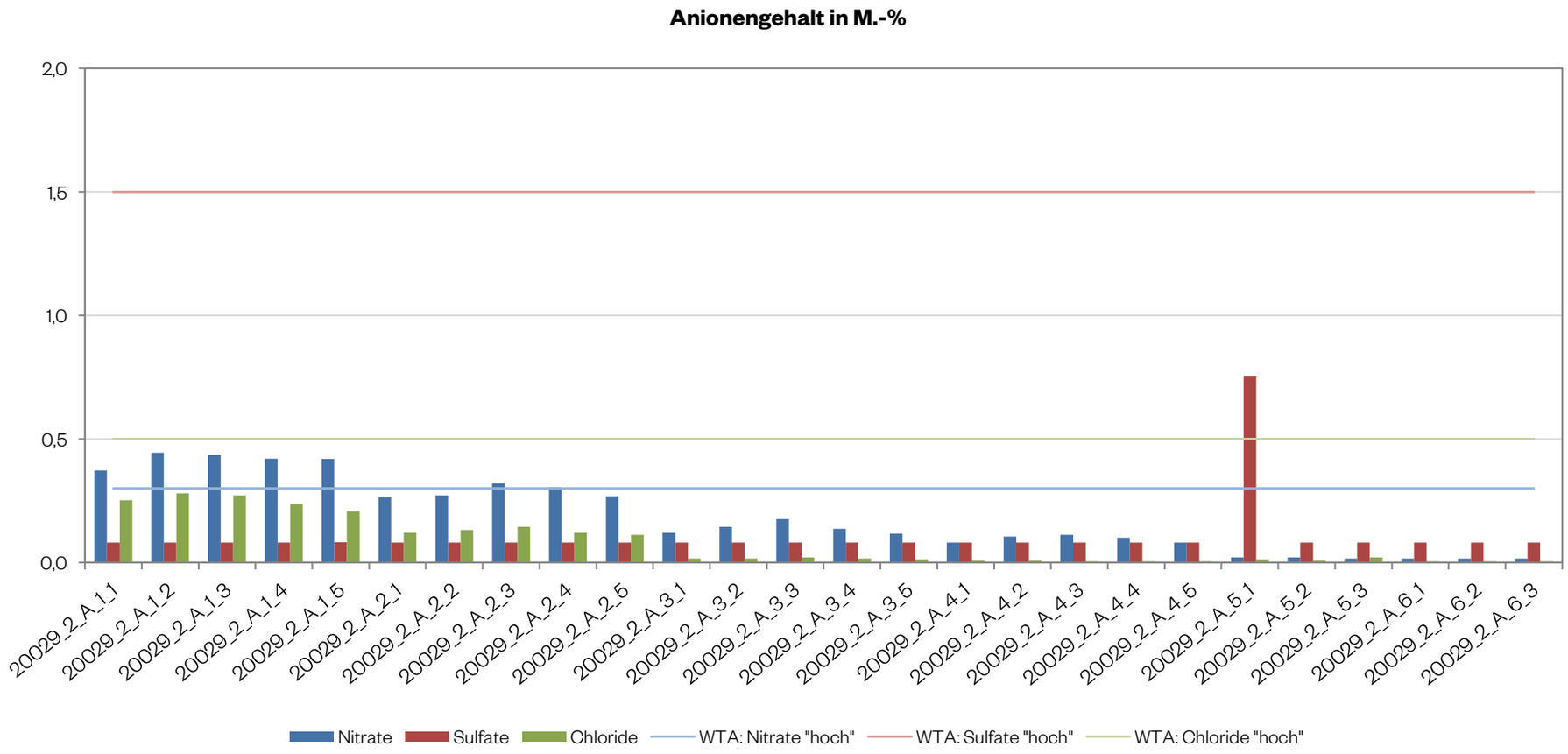
Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_A_Wellerscheune

lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Geschoss	Höhe über OKRF in cm	Entnahme-tiefe in cm	Entnahmematerial		Nitrate M.-%		Sulfate M.-%		Chloride M.-%	∑ Anionengehalt M.-%
1	20029_2_A_1_1	EG	70	0-3	Wellerlehm		0,37	<	0,08		0,25	0,70
2	20029_2_A_1_2	EG	70	7-10	Wellerlehm		0,44	<	0,08		0,28	0,80
3	20029_2_A_1_3	EG	70	24-26	Wellerlehm		0,44	<	0,08		0,27	0,79
4	20029_2_A_1_4	EG	70	10-7	Wellerlehm		0,42	<	0,08		0,24	0,74
5	20029_2_A_1_5	EG	70	3-0	Wellerlehm		0,42	<	0,08		0,21	0,71
6	20029_2_A_2_1	EG	110	0-3	Wellerlehm		0,26	<	0,08		0,12	0,46
7	20029_2_A_2_2	EG	110	7-10	Wellerlehm		0,27	<	0,08		0,13	0,48
8	20029_2_A_2_3	EG	110	24-26	Wellerlehm		0,32	<	0,08		0,14	0,54
9	20029_2_A_2_4	EG	110	10-7	Wellerlehm		0,30	<	0,08		0,12	0,50
10	20029_2_A_2_5	EG	110	3-0	Wellerlehm		0,27	<	0,08		0,11	0,46
11	20029_2_A_3_1	EG	150	0-3	Wellerlehm		0,12	<	0,08		0,02	0,22
12	20029_2_A_3_2	EG	150	7-10	Wellerlehm		0,14	<	0,08		0,02	0,24
13	20029_2_A_3_3	EG	150	24-26	Wellerlehm		0,18	<	0,08		0,02	0,28
14	20029_2_A_3_4	EG	150	10-7	Wellerlehm		0,14	<	0,08		0,02	0,23
15	20029_2_A_3_5	EG	150	3-0	Wellerlehm		0,12	<	0,08		0,01	0,21
16	20029_2_A_4_1	EG	230	0-3	Wellerlehm		0,08	<	0,08		0,01	0,17
17	20029_2_A_4_2	EG	230	7-10	Wellerlehm		0,10	<	0,08		0,01	0,19
18	20029_2_A_4_3	EG	230	24-26	Wellerlehm		0,11	<	0,08		0,00	0,20
19	20029_2_A_4_4	EG	230	10-7	Wellerlehm		0,10	<	0,08		0,00	0,18
20	20029_2_A_4_5	EG	230	3-0	Wellerlehm		0,08	<	0,08		0,00	0,16
21	20029_2_A_5_1	OG	367	0,3	Wellerlehm		0,02		0,76		0,01	0,79
22	20029_2_A_5_2	OG	367	7-10	Wellerlehm		0,02	<	0,08		0,01	0,11
23	20029_2_A_5_3	OG	367	24-26	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,02	0,12
24	20029_2_A_6_1	Boden	0-10	-	Erde	<	0,02	<	0,08		0,00	0,10
25	20029_2_A_6_2	Boden	10-21	-	Erde	<	0,02	<	0,08		0,00	0,10
26	20029_2_A_6_3	Boden	21-33	-	Erde	<	0,02	<	0,08		0,00	0,10

ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_A_Wellerscheune



Bewertung der schadensverursachenden Wirkung verschiedener Salzionen in Mauerwerkskörpern:

Nach WTA- Merkblatt 4-5-99 „Mauerwerksdiagnostik“			
[M.-%]			
Nitrate	< 0,1	0,1 - 0,3	> 0,3
Sulfate	< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5
Chloride	< 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Bewertung	Belastung gering	Belastung mittel	Belastung hoch
	Maßnahmen im Ausnahmefall erforderlich	Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbestimmung) erforderlich. Maßnahmen im Einzelfall erforderlich	Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbestimmung) erforderlich. Maßnahmen erforderlich
	Für einfache Rückschlüsse zum Gesamtsalzgehalt ist der ermittelte höchste Gehalt von Salzionen, unabhängig von Chlorid, Nitrat oder Sulfat und die Bewertung o. a. Tabelle maßgebend.		

Nach DIN 18947:2024-03 "Lehmputzmörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung", ebenso DIN 18945:2024-03 (Lehmsteine) und DIN 18946:2024-03 (Lehmmauermörtel)				
[M.-%]				
Nitrate	≤ 0,02	> 0,02	∑ Anionengehalt	
Sulfate	≤ 0,10	> 0,10		
Chloride	≤ 0,08	> 0,08	≤ 0,12	> 0,12
Bewertung	zulässig	nicht zulässig	zulässig	nicht zulässig

ZR
S

Auswertung: Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_A_Wellerscheune

Einfahrt	Höhe [cm] OKRF	A-Wellerscheune Achse I EG - Innenwand [M.-%]															Stall
		0 - 3 cm			7 - 10 cm			24 - 26 cm			10 - 7 cm			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	230	0,08	0,08	0,01	0,10	0,08	0,01	0,11	0,08	0,00	0,10	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	
	150	0,12	0,08	0,02	0,14	0,08	0,02	0,18	0,08	0,02	0,14	0,08	0,02	0,12	0,08	0,01	
	110	0,26	0,08	0,12	0,27	0,08	0,13	0,32	0,08	0,14	0,30	0,08	0,12	0,27	0,08	0,11	
	70	0,37	0,08	0,25	0,44	0,08	0,28	0,44	0,08	0,27	0,42	0,08	0,24	0,42	0,08	0,21	

Außen	Höhe [cm] OKRF	A-Wellerscheune Achse II EG - Außenwand [M.-%]															Außen
		0 - 3 cm			7 - 10 cm			24 - 26 cm			10 - 7 cm			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	367	0,02	0,76	0,01	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,02							

Tiefe ins Erdreich [cm]	Profil Boden Südseite [M.-%]		
	Nitrat	Sulfat	Chlorid
0-10	0,02	0,08	0,00
10-21	0,02	0,08	0,00
21-33	0,02	0,08	0,00

ZR
S

Auswertung: Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_A_Wellerscheune

Einfahrt	Höhe [cm] OKRF	A-Wellerscheune Achse I EG - Innenwand [M.-%]																				Stall
		0 - 3 cm				7 - 10 cm				24 - 26 cm				10 - 7 cm				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	230	0,08	0,08	0,01	0,17	0,10	0,08	0,01	0,19	0,11	0,08	0,00	0,20	0,10	0,08	0,00	0,18	0,08	0,08	0,00	0,16	
	150	0,12	0,08	0,02	0,22	0,14	0,08	0,02	0,24	0,18	0,08	0,02	0,28	0,14	0,08	0,02	0,23	0,12	0,08	0,01	0,21	
	110	0,26	0,08	0,12	0,46	0,27	0,08	0,13	0,48	0,32	0,08	0,14	0,54	0,30	0,08	0,12	0,50	0,27	0,08	0,11	0,46	
	70	0,37	0,08	0,25	0,70	0,44	0,08	0,28	0,80	0,44	0,08	0,27	0,79	0,42	0,08	0,24	0,74	0,42	0,08	0,21	0,71	

Außen	Höhe [cm] OKRF	A-Wellerscheune Achse II EG - Außenwand [M.-%]																				Außen
		0 - 3 cm				7 - 10 cm				24 - 26 cm				10 - 7 cm				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	367	0,02	0,76	0,01	0,79	0,02	0,08	0,01	0,11	0,02	0,08	0,02	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tiefe ins Erdreich [cm]	Profil Boden Südseite [M.-%]			
	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑
0-10	0,02	0,08	0,00	0,10
10-21	0,02	0,08	0,00	0,10
21-33	0,02	0,08	0,00	0,10

Aufnahmedaten

Projekt: 20019_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_B_C_Backhaus_Gaststube

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

Innen, Backhaus, Nische	Höhe [cm] OKFF	B-Backhaus Achse I EG - Innenwand, von Süden und Norden					Innen, Schuppen
		0 - 3 cm * Proben	7 - 10 cm Proben	24 - 26 cm Proben	10 - 7 cm Proben	3 - 0 cm Proben	
	150	B_4_1	B_4_2	B_4_3	B_4_4	B_4_5	
	110	B_3_1	B_3_2	B_3_3	B_3_4	B_3_5	
	70	B_2_1	B_2_2	B_2_3	B_2_4	B_2_5	
	30	B_1_1	B_1_2	B_1_3	B_1_4	B_1_5	

*reale Tiefe: 1,5 - 4,5 cm

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

Außen	Höhe [cm] OKS	B-Backhaus Achse II EG - Außenwand, West					Außen
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm Proben	24 - 26 cm Proben	10 - 7 cm Proben	3 - 0 cm Proben	
	150	B_5_1	B_5_2	-	-	-	

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

Innen	Höhe [cm] OKFF	C-Gaststube Achse I EG - Innenwand, Nordost					Innen
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm Proben	24 - 26 cm Proben	10 - 7 cm Proben	3 - 0 cm Proben	
	150	C_1_1	C_1_2	C_1_3	-	-	

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

Innen	Höhe [cm] OKFF	C-Gaststube Achse II EG - Außenwand, Südwest					Außen
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm Proben	24 - 26 cm Proben	10 - 7 cm Proben	3 - 0 cm Proben	
	150	C_2_1	C_2_2	C_2_3	-	-	

Tiefe ins Erdreich [cm]	C-Gaststube, ca. 20 m entf. Bodenproben
	Proben
0 - 10	C_HZ1 (Erde, Humus)

OKRF... Oberkante Rohfußboden
OKFF... Oberkante Fertigfußboden
OKS... Oberkante Sockel
OKG... Oberkante Gelände

ZR
S

Aufnahmedaten

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_B_C_Backhaus_Gaststube

lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Achse Probe	Geschoss	Höhe über OKFF in cm	Entnahmetiefe in cm	Entnahmematerial	Probenentnahme	Befundbeschreibung	auszuführende Untersuchungen
1	20029_2_B_1_1	B_I	EG	30	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	ca. 1 m weiter links entnommen	F, S
2	20029_2_B_1_2	B_I	EG	30	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	ca. 1 m weiter links entnommen	F, S
3	20029_2_B_1_3	B_I	EG	30	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	ca. 1 m weiter links entnommen	F, S
4	20029_2_B_1_4	B_I	EG	30	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
5	20029_2_B_1_5	B_I	EG	30	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
6	20029_2_B_2_1	B_I	EG	70	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
7	20029_2_B_2_2	B_I	EG	70	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
8	20029_2_B_2_3	B_I	EG	70	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
9	20029_2_B_2_4	B_I	EG	70	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
10	20029_2_B_2_5	B_I	EG	70	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
11	20029_2_B_3_1	B_I	EG	110	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
12	20029_2_B_3_2	B_I	EG	110	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
13	20029_2_B_3_3	B_I	EG	110	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
14	20029_2_B_3_4	B_I	EG	110	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	Zuordnung unklar, angenommen	F, S
15	20029_2_B_3_5	B_I	EG	110	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
16	20029_2_B_4_1	B_I	EG	150	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
17	20029_2_B_4_2	B_I	EG	150	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
18	20029_2_B_4_3	B_I	EG	150	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	angenommene Nullprobe	F, S
19	20029_2_B_4_4	B_I	EG	150	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
20	20029_2_B_4_5	B_I	EG	150	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	Zuordnung unklar	F, S
21	20029_2_B_5_1	B_II	EG	150	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
22	20029_2_B_5_2	B_II	EG	150	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
23	20029_2_C_1_1	C_I	EG	150	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
24	20029_2_C_1_2	C_I	EG	150	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
25	20029_2_C_1_3	C_I	EG	150	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
26	20029_2_C_2_1	C_II	EG	150	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
27	20029_2_C_2_2	C_II	EG	150	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
28	20029_2_C_2_3	C_II	EG	150	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone		F, S
28	20029_2_C_HZ1	-	-	0- 10	-	Boden	Profil Boden	0 bis 10 cm tief ins Erdreich, Humus	F, S

OKRF... Oberkante Rohfußboden
OKFF... Oberkante Fertigfußboden
OKS... Oberkante Sockel
OKG... Oberkante Gelände
S... Salzbelastung
F... Feuchtegehalt

ZR
SI

Trocknungsprotokoll

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_B_C_Backhaus_Gaststube

Konditionierung (23 °C, 50 % r. LF)

	$Masse_{Probe}$ in g				
Probenbezeichnung	vor Versuch 03.05.2023	Konditionierung 23.05.2023	Konditionierung 24.05.2023	Massedifferenz in %	Behälter
20029_2_B_1_1	20,55	20,46	20,44	0,1	6,35
20029_2_B_1_2	22,71	22,57	22,54	0,1	6,43
20029_2_B_1_3	24,50	24,24	24,24	0,0	6,34
20029_2_B_1_4	23,10	22,87	22,87	0,0	6,43
20029_2_B_1_5	23,43	23,29	23,29	0,0	6,34
20029_2_B_2_1	23,74	23,64	23,63	0,0	6,34
20029_2_B_2_2	20,57	20,45	20,46	0,0	6,34
20029_2_B_2_3	24,58	24,42	24,42	0,0	6,43
20029_2_B_2_4	30,22	29,97	29,97	0,0	6,08
20029_2_B_2_5	22,81	22,68	22,69	0,0	6,34
20029_2_B_3_1	23,91	23,81	23,81	0,0	6,44
20029_2_B_3_2	23,70	23,56	23,56	0,0	6,37
20029_2_B_3_3	29,54	29,40	29,41	0,0	6,42
20029_2_B_3_4	27,61	27,52	27,52	0,0	6,43
20029_2_B_3_5	27,03	26,93	26,94	0,0	6,12
20029_2_B_4_1	20,52	20,43	20,44	0,0	5,96
20029_2_B_4_2	19,59	19,49	19,50	-0,1	6,16
20029_2_B_4_3	27,67	27,54	27,55	0,0	6,44
20029_2_B_4_4	23,49	23,39	23,39	0,0	6,34
20029_2_B_4_5	27,28	27,16	27,17	0,0	6,44
20029_2_B_5_1	27,94	27,92	27,93	0,0	6,06
20029_2_B_5_2	28,72	28,63	28,64	0,0	6,03
20029_2_C_1_1	24,56	24,11	24,12	0,0	6,08
20029_2_C_1_2	20,71	20,22	20,22	0,0	6,06
20029_2_C_1_3	19,67	19,20	19,21	-0,1	6,43
20029_2_C_2_1	24,28	24,24	24,25	0,0	6,07
20029_2_C_2_2	24,44	24,41	24,41	0,0	6,43
20029_2_C_2_3	22,08	22,05	22,06	0,0	6,34
20029_2_C_HZ1	22,87	21,03	21,04	0,0	5,97

ZRS

Konditionierung (23 °C, 80 % r. LF)

	Masse$_{Behälter+Probe}$ in g				
Probenbezeichnung	vor Versuch 24.05.2023	Konditionierung 17.07.2023	Konditionierung 18.07.2023	Massedifferenz in %	Behälter
20029_2_B_1_1	20,44	20,52	20,52	0,0	6,35
20029_2_B_1_2	22,54	22,66	22,66	0,0	6,43
20029_2_B_1_3	24,24	24,45	24,46	0,0	6,34
20029_2_B_1_4	22,87	23,09	23,10	0,0	6,43
20029_2_B_1_5	23,29	23,50	23,50	0,0	6,34
20029_2_B_2_1	23,63	23,76	23,76	0,0	6,34
20029_2_B_2_2	20,46	20,60	20,61	0,0	6,34
20029_2_B_2_3	24,42	24,60	24,60	0,0	6,43
20029_2_B_2_4	29,97	30,18	30,19	0,0	6,08
20029_2_B_2_5	22,69	22,85	22,85	0,0	6,34
20029_2_B_3_1	23,81	23,95	23,95	0,0	6,44
20029_2_B_3_2	23,56	23,74	23,74	0,0	6,37
20029_2_B_3_3	29,41	29,58	29,58	0,0	6,42
20029_2_B_3_4	27,52	27,68	27,68	0,0	6,43
20029_2_B_3_5	26,94	27,08	27,08	0,0	6,12
20029_2_B_4_1	20,44	20,55	20,56	0,0	5,96
20029_2_B_4_2	19,50	19,61	19,61	0,0	6,16
20029_2_B_4_3	27,55	27,72	27,72	0,0	6,44
20029_2_B_4_4	23,39	23,53	23,54	0,0	6,34
20029_2_B_4_5	27,17	27,33	27,33	0,0	6,44
20029_2_B_5_1	27,93	28,10	28,11	0,0	6,06
20029_2_B_5_2	28,64	28,83	28,84	0,0	6,03
20029_2_C_1_1	24,12	24,94	24,96	-0,1	6,08
20029_2_C_1_2	20,22	20,87	20,89	-0,1	6,06
20029_2_C_1_3	19,21	19,81	19,80	0,1	6,43
20029_2_C_2_1	24,25	24,35	24,35	0,0	6,07
20029_2_C_2_2	24,41	24,51	24,52	0,0	6,43
20029_2_C_2_3	22,06	22,16	22,16	0,0	6,34
20029_2_C_HZ1	21,04	21,09	21,10	0,0	5,97

ZRS

Trocknung (40 °C)

Probenbezeichnung	$Masse_{Behälter+Probe}$ in g				Behälter
	vor Versuch 18.07.2023	Trocknung 24.07.2023	Trocknung 25.07.2023	Massedifferenz in %	
20029_2_B_1_1	20,52	20,35	20,35	0,0	6,35
20029_2_B_1_2	22,66	22,41	22,41	0,0	6,43
20029_2_B_1_3	24,46	24,02	24,03	0,0	6,34
20029_2_B_1_4	23,10	22,64	22,65	0,0	6,43
20029_2_B_1_5	23,50	23,07	23,08	0,0	6,34
20029_2_B_2_1	23,76	23,49	23,49	0,0	6,34
20029_2_B_2_2	20,61	20,28	20,28	0,0	6,34
20029_2_B_2_3	24,60	24,19	24,19	0,0	6,43
20029_2_B_2_4	30,19	29,69	29,70	0,0	6,08
20029_2_B_2_5	22,85	22,47	22,47	0,0	6,34
20029_2_B_3_1	23,95	23,58	23,58	0,0	6,44
20029_2_B_3_2	23,74	23,30	23,30	0,0	6,37
20029_2_B_3_3	29,58	29,10	29,14	0,1	6,42
20029_2_B_3_4	27,68	27,26	27,27	0,0	6,43
20029_2_B_3_5	27,08	26,69	26,69	0,0	6,12
20029_2_B_4_1	20,56	20,24	20,24	0,0	5,96
20029_2_B_4_2	19,61	19,29	19,30	0,1	6,16
20029_2_B_4_3	27,72	27,24	27,25	0,0	6,44
20029_2_B_4_4	23,54	23,15	23,15	0,0	6,34
20029_2_B_4_5	27,33	26,89	26,91	0,1	6,44
20029_2_B_5_1	28,11	27,68	27,69	0,0	6,06
20029_2_B_5_2	28,84	28,31	28,32	0,0	6,03
20029_2_C_1_1	24,96	23,73	23,73	0,0	6,08
20029_2_C_1_2	20,89	19,91	19,91	0,0	6,06
20029_2_C_1_3	19,80	18,93	18,93	0,0	6,43
20029_2_C_2_1	24,35	24,14	24,13	0,0	6,07
20029_2_C_2_2	24,52	24,29	24,28	0,0	6,43
20029_2_C_2_3	22,16	21,95	21,94	0,0	6,34
20029_2_C_HZ1	21,10	20,90	20,90	0,0	5,97

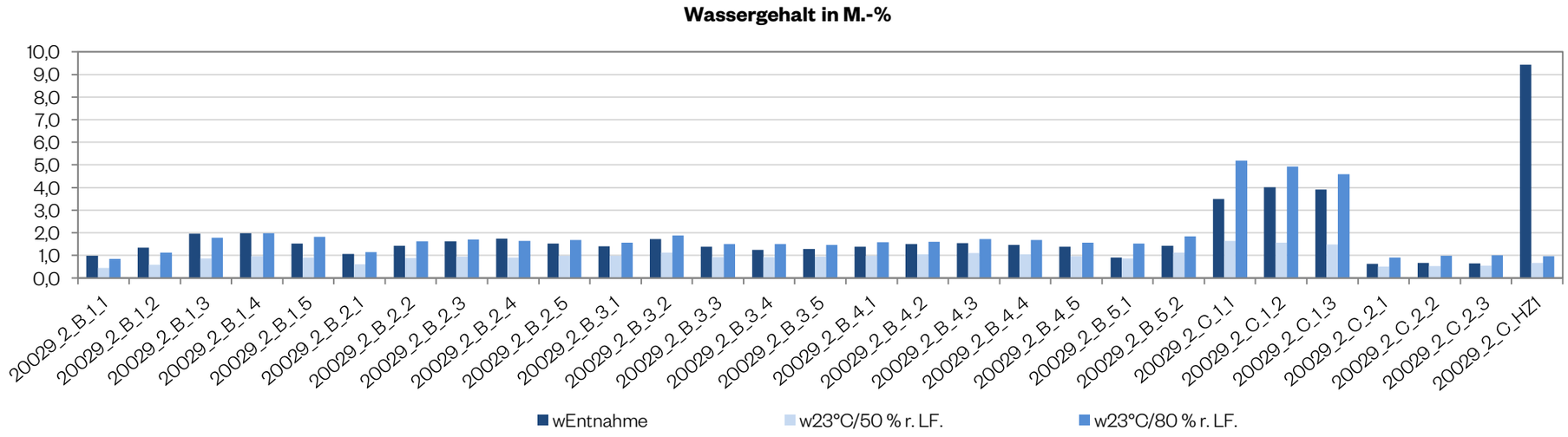
Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinanderfolgenden Wägungen im Abstand von 24 Stunden um höchstens 0,2 % der Masse bezogen auf den kleineren Messwert voneinander

ZR
S

Übersicht der ermittelten Feuchtegehalte

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_B_C_Backhaus_Gaststube

lfd. Nr.	Achse Probe	Proben-bezeichnung	Geschoss	Höhe über OKFF in cm	Entnahmetiefe in cm	$w_{Entnahme}$ in M.-%	$w_{23°C/50\,\%\,r.\,LF.}$ in M.-%	$w_{23°C/80\,\%\,r.\,LF.}$ in M.-%
1	B_I	20029_2_B_1_1	EG	30	0-3	0,98	0,44	0,84
2	B_I	20029_2_B_1_2	EG	30	7-10	1,34	0,58	1,12
3	B_I	20029_2_B_1_3	EG	30	24-26	1,96	0,87	1,79
4	B_I	20029_2_B_1_4	EG	30	10-7	1,99	0,97	1,99
5	B_I	20029_2_B_1_5	EG	30	3-0	1,52	0,91	1,82
6	B_I	20029_2_B_2_1	EG	70	0-3	1,06	0,60	1,15
7	B_I	20029_2_B_2_2	EG	70	7-10	1,43	0,89	1,63
8	B_I	20029_2_B_2_3	EG	70	24-26	1,61	0,95	1,69
9	B_I	20029_2_B_2_4	EG	70	10-7	1,75	0,91	1,65
10	B_I	20029_2_B_2_5	EG	70	3-0	1,51	0,98	1,69
11	B_I	20029_2_B_3_1	EG	110	0-3	1,40	0,98	1,57
12	B_I	20029_2_B_3_2	EG	110	7-10	1,72	1,12	1,89
13	B_I	20029_2_B_3_3	EG	110	24-26	1,37	0,93	1,51
14	B_I	20029_2_B_3_4	EG	110	10-7	1,25	0,92	1,50
15	B_I	20029_2_B_3_5	EG	110	3-0	1,27	0,94	1,46
16	B_I	20029_2_B_4_1	EG	150	0-3	1,38	0,99	1,58
17	B_I	20029_2_B_4_2	EG	150	7-10	1,50	1,04	1,61
18	B_I	20029_2_B_4_3	EG	150	24-26	1,54	1,10	1,72
19	B_I	20029_2_B_4_4	EG	150	10-7	1,47	1,04	1,68
20	B_I	20029_2_B_4_5	EG	150	3-0	1,37	0,97	1,56
21	B_II	20029_2_B_5_1	EG	150	0-3	0,90	0,87	1,52
22	B_II	20029_2_B_5_2	EG	150	7-10	1,41	1,13	1,84
23	C_I	20029_2_C_1_1	EG	150	0-3	3,50	1,64	5,18
24	C_I	20029_2_C_1_2	EG	150	7-10	4,02	1,56	4,92
25	C_I	20029_2_C_1_3	EG	150	24-26	3,91	1,48	4,60
26	C_II	20029_2_C_2_1	EG	150	0-3	0,62	0,50	0,91
27	C_II	20029_2_C_2_2	EG	150	7-10	0,66	0,54	0,99
28	C_II	20029_2_C_2_3	EG	150	24-26	0,64	0,55	1,00
29	-	20029_2_C_HZ1	-	0-10	-	9,43	0,67	0,96



ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

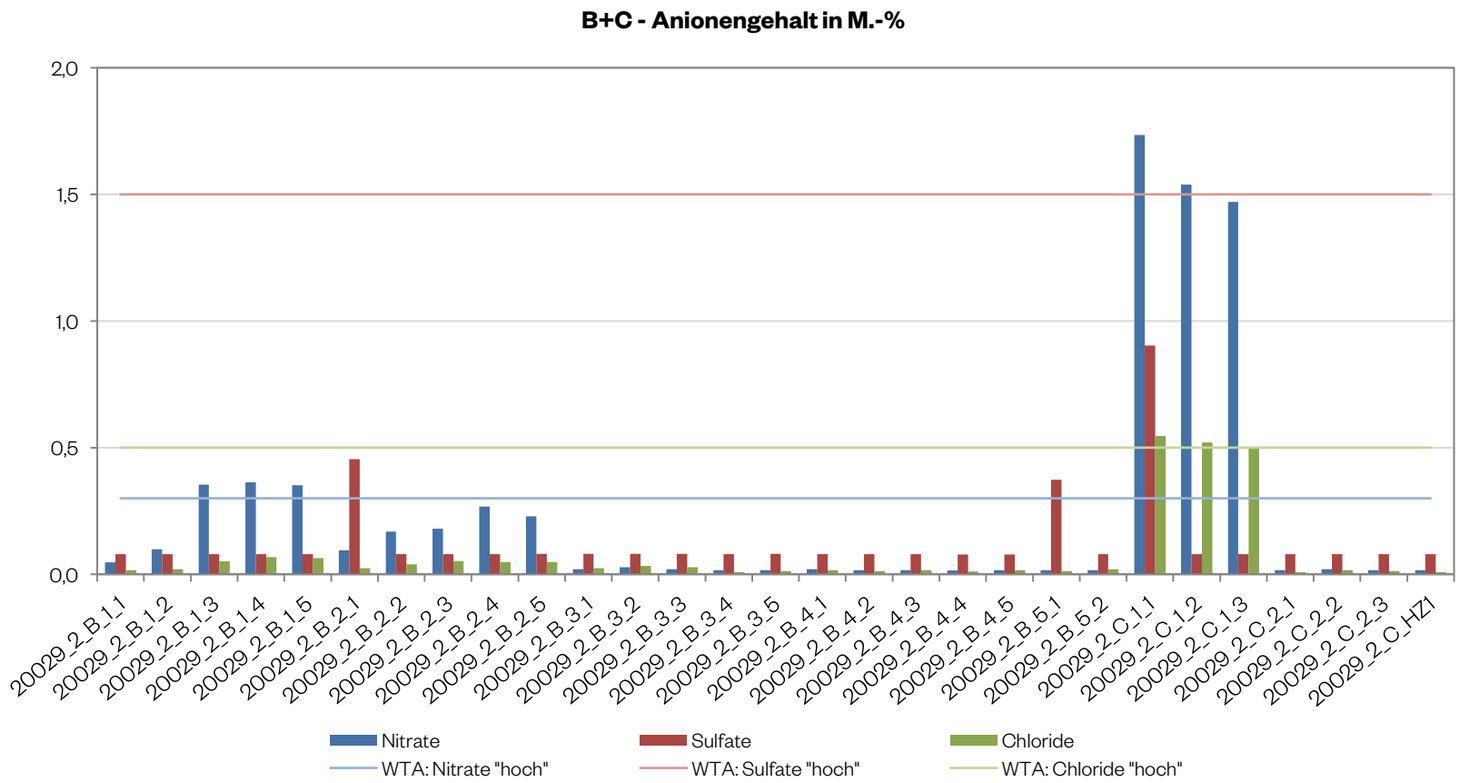
Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_B_C_Backhaus_Gaststube

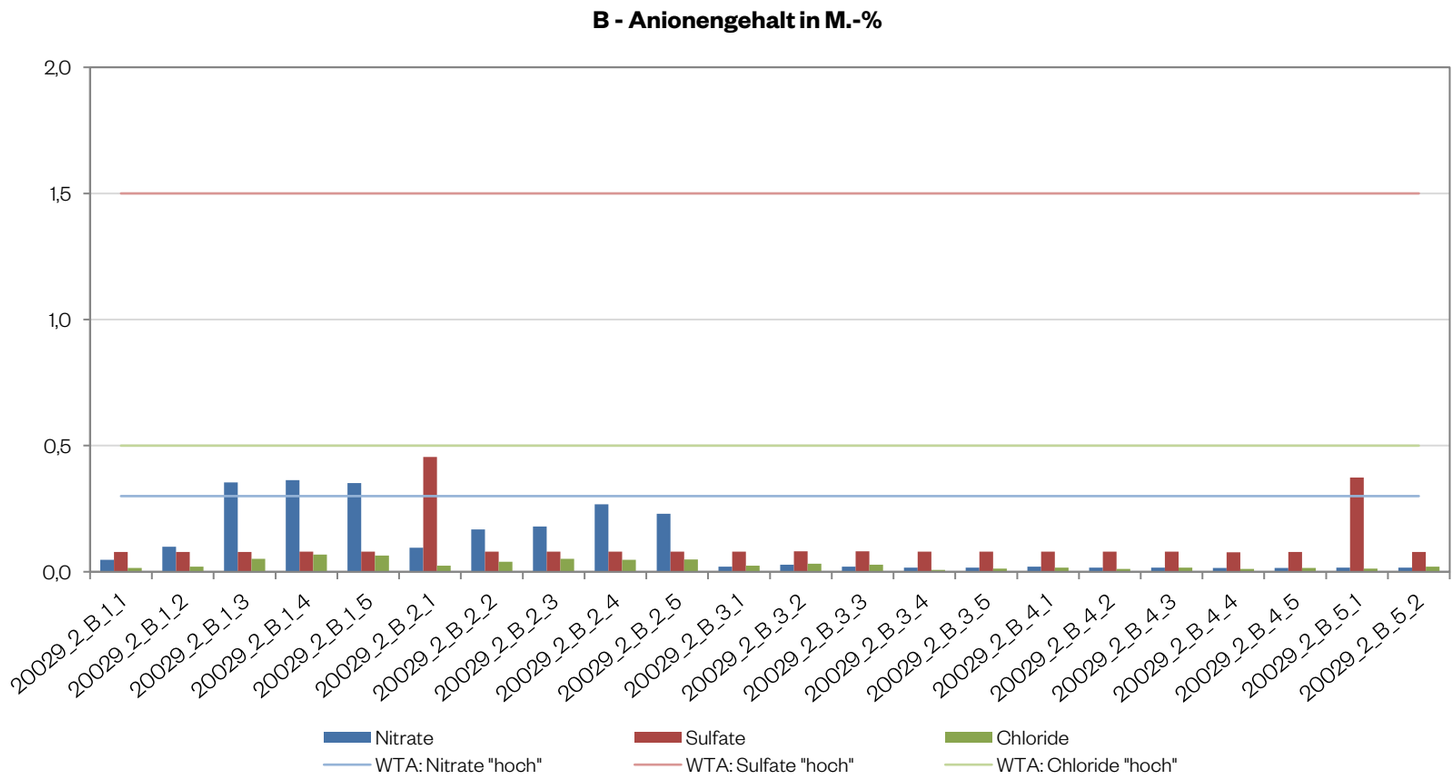
lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Geschoss	Höhe über OKFF in cm	Entnahme-tiefe in cm	Entnahmematerial		Nitrate M.-%		Sulfate M.-%		Chloride M.-%	∑ Anionengehalt M.-%
1	20029_2_B_1_1	EG	30	0-3	Wellerlehm		0,05	<	0,08		0,02	0,14
2	20029_2_B_1_2	EG	30	7-10	Wellerlehm		0,10	<	0,08		0,02	0,20
3	20029_2_B_1_3	EG	30	24-26	Wellerlehm		0,35	<	0,08		0,05	0,48
4	20029_2_B_1_4	EG	30	10-7	Wellerlehm		0,36	<	0,08		0,07	0,51
5	20029_2_B_1_5	EG	30	3-0	Wellerlehm		0,35	<	0,08		0,06	0,50
6	20029_2_B_2_1	EG	70	0-3	Wellerlehm		0,09		0,46		0,02	0,57
7	20029_2_B_2_2	EG	70	7-10	Wellerlehm		0,17	<	0,08		0,04	0,29
8	20029_2_B_2_3	EG	70	24-26	Wellerlehm		0,18	<	0,08		0,05	0,31
9	20029_2_B_2_4	EG	70	10-7	Wellerlehm		0,27	<	0,08		0,05	0,40
10	20029_2_B_2_5	EG	70	3-0	Wellerlehm		0,23	<	0,08		0,05	0,36
11	20029_2_B_3_1	EG	110	0-3	Wellerlehm		0,02	<	0,08		0,02	0,12
12	20029_2_B_3_2	EG	110	7-10	Wellerlehm		0,03	<	0,08		0,03	0,14
13	20029_2_B_3_3	EG	110	24-26	Wellerlehm		0,02	<	0,08		0,03	0,13
14	20029_2_B_3_4	EG	110	10-7	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,01	0,10
15	20029_2_B_3_5	EG	110	3-0	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,01	0,11
16	20029_2_B_4_1	EG	150	0-3	Wellerlehm		0,02	<	0,08		0,02	0,11
17	20029_2_B_4_2	EG	150	7-10	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,01	0,11
18	20029_2_B_4_3	EG	150	24-26	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,02	0,11
19	20029_2_B_4_4	EG	150	10-7	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,01	0,10
20	20029_2_B_4_5	EG	150	3-0	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,02	0,11
21	20029_2_B_5_1	EG	150	0-3	Wellerlehm	<	0,02		0,37		0,01	0,40
22	20029_2_B_5_2	EG	150	7-10	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,02	0,11
23	20029_2_C_1_1	EG	150	0-3	Wellerlehm		1,73		0,90		0,55	3,18
24	20029_2_C_1_2	EG	150	7-10	Wellerlehm		1,54	<	0,08		0,52	2,14
25	20029_2_C_1_3	EG	150	24-26	Wellerlehm		1,47	<	0,08		0,50	2,05
26	20029_2_C_2_1	EG	150	0-3	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,01	0,10
27	20029_2_C_2_2	EG	150	7-10	Wellerlehm		0,02	<	0,08		0,02	0,12
28	20029_2_C_2_3	EG	150	24-26	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,01	0,11
29	20029_2_C_HZ1	-	0- 10	-	Boden	<	0,02	<	0,08		0,01	0,10

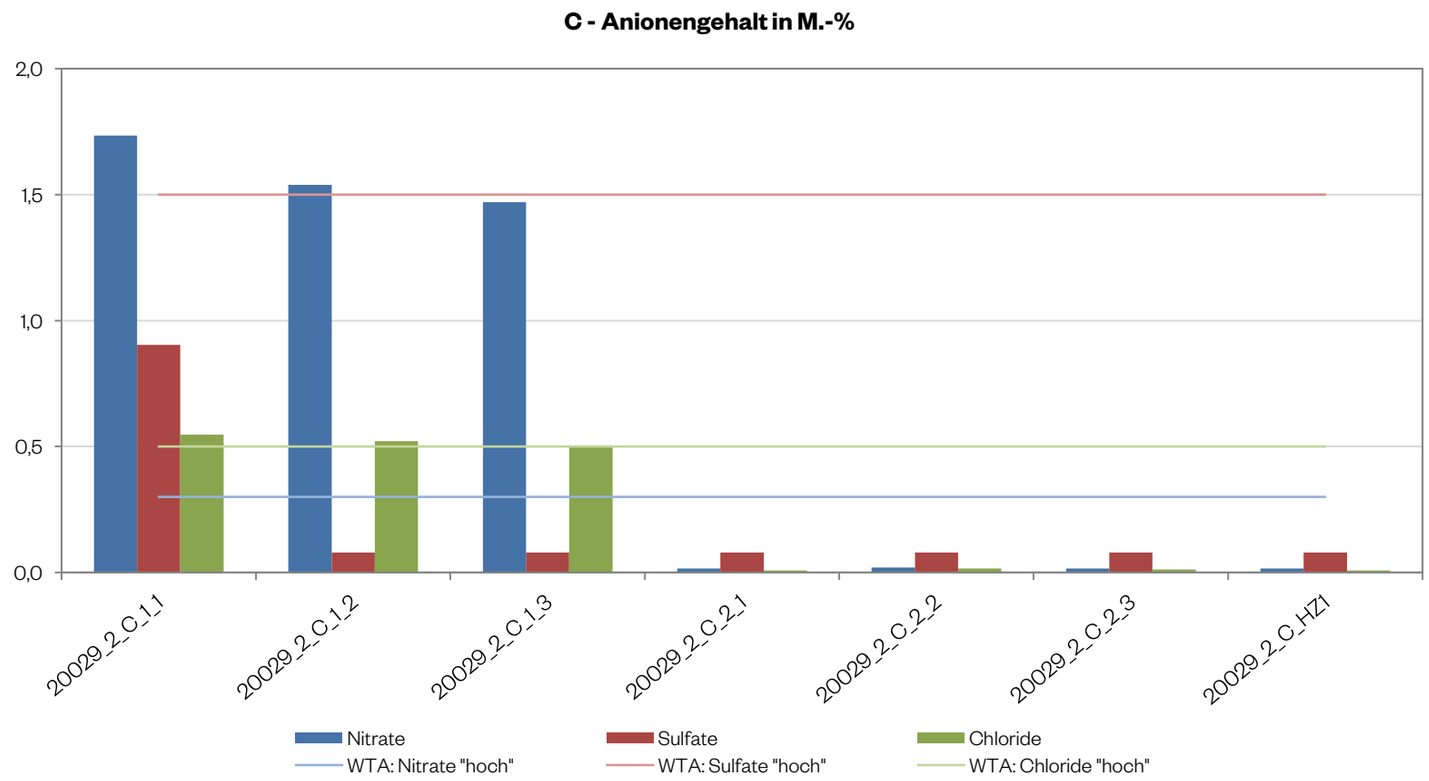
ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20019_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_B_C_Backhaus_Gaststube




B - Anionengehalt in M.-%
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
20029_2_B_1_1
20029_2_B_1_2
20029_2_B_1_3
20029_2_B_1_4
20029_2_B_1_5
20029_2_B_2_1
20029_2_B_2_2
20029_2_B_2_3
20029_2_B_2_4
20029_2_B_2_5
20029_2_B_3_1
20029_2_B_3_2
20029_2_B_3_3
20029_2_B_3_4
20029_2_B_3_5
20029_2_B_4_1
20029_2_B_4_2
20029_2_B_4_3
20029_2_B_4_4
20029_2_B_4_5
20029_2_B_5_1
20029_2_B_5_2
Nitrate
Sulfate
Chloride
WTA: Nitrate "hoch"
WTA: Sulfate "hoch"
WTA: Chloride "hoch"


C - Anionengehalt in M.-%
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
20029_2_C_1_1
20029_2_C_1_2
20029_2_C_1_3
20029_2_C_2_1
20029_2_C_2_2
20029_2_C_2_3
20029_2_C_HZ1
Nitrate
Sulfate
Chloride
WTA: Nitrate "hoch"
WTA: Sulfate "hoch"
WTA: Chloride "hoch"

ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_B_C_Backhaus_Gaststube

Innen, Backhaus, Nische	Höhe [cm] OKRF	B-Backhaus Achse I EG - Innenwand, von Süden und Norden [M.-%]															Innen, Schuppen
		0 - 3 cm *			7 - 10 cm			24 - 26 cm			10 - 7 cm			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	150	0,02	0,08	0,02	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,02	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,02	
	110	0,02	0,08	0,02	0,03	0,08	0,03	0,02	0,08	0,03	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,01	
	70	0,09	0,46	0,02	0,17	0,08	0,04	0,18	0,08	0,05	0,27	0,08	0,05	0,23	0,08	0,05	
	30	0,05	0,08	0,02	0,10	0,08	0,02	0,35	0,08	0,05	0,36	0,08	0,07	0,35	0,08	0,06	

*reale Tiefe: 1,5 - 4,5 cm

Außen	Höhe [cm] OKRF	B-Backhaus Achse II EG - Außenwand, West [M.-%]															Außen
		0 - 3 cm			7 - 10 cm			24 - 26 cm			10 - 7 cm			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	150	0,02	0,37	0,01	0,02	0,08	0,02										

Innen	Höhe [cm] OKRF	C-Gaststube Achse I EG - Innenwand, Nordost [M.-%]															Innen
		0 - 3 cm			7 - 10 cm			24 - 26 cm			10 - 7 cm			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	150	1,73	0,90	0,55	1,54	0,08	0,52	1,47	0,08	0,50							

Außen	Höhe [cm] OKRF	C-Gaststube Achse II EG - Außenwand, Südwest [M.-%]															Außen
		0 - 3 cm			7 - 10 cm			24 - 26 cm			10 - 7 cm			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	150	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,02	0,02	0,08	0,01							

Tiefe ins Erdreich [cm]	C-Gaststube, ca. 20 m entf. Bodenprobe [M.-%]		
	Nitrat	Sulfat	Chlorid
0-10	0,02	0,08	0,01

ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_B_C_Backhaus_Gaststube

Innen, Backhaus, Nische	Höhe [cm] OKRF	B-Backhaus Achse I EG - Innenwand, von Süden und Norden [M.-%]																				Innen, Schuppen
		0 - 3 cm *				7 - 10 cm				24 - 26 cm				10 - 7 cm				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	150	0,02	0,08	0,02	0,11	0,02	0,08	0,01	0,11	0,02	0,08	0,02	0,11	0,02	0,08	0,01	0,10	0,02	0,08	0,02	0,11	
	110	0,02	0,08	0,02	0,12	0,03	0,08	0,03	0,14	0,02	0,08	0,03	0,13	0,02	0,08	0,01	0,10	0,02	0,08	0,01	0,11	
	70	0,09	0,46	0,02	0,57	0,17	0,08	0,04	0,29	0,18	0,08	0,05	0,31	0,27	0,08	0,05	0,40	0,23	0,08	0,05	0,36	
	30	0,05	0,08	0,02	0,14	0,10	0,08	0,02	0,20	0,35	0,08	0,05	0,48	0,36	0,08	0,07	0,51	0,35	0,08	0,06	0,50	

*reale Tiefe: 1,5 - 4,5 cm

Außen	Höhe [cm] OKRF	B-Backhaus Achse II EG - Außenwand, West [M.-%]																				Außen
		0 - 3 cm				7 - 10 cm				24 - 26 cm				10 - 7 cm				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	150	0,02	0,37	0,01	0,40	0,02	0,08	0,02	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Innen	Höhe [cm] OKRF	C-Gaststube Achse I EG - Innenwand, Nordost [M.-%]																				Innen
		0 - 3 cm				7 - 10 cm				24 - 26 cm				10 - 7 cm				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	150	1,73	0,90	0,55	3,18	1,54	0,08	0,52	2,14	1,47	0,08	0,50	2,05	-	-	-	-	-	-	-	-	

Außen	Höhe [cm] OKRF	C-Gaststube Achse II EG - Außenwand, Südwest [M.-%]																				Außen
		0 - 3 cm				7 - 10 cm				24 - 26 cm				10 - 7 cm				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	150	0,02	0,08	0,01	0,10	0,02	0,08	0,02	0,12	0,02	0,08	0,01	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tiefe ins Erdreich [cm]	C-Gaststube, ca. 20 m entf. Bodenprobe [M.-%]			
	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑
0-10	0,02	0,08	0,01	0,10

Anlage 3: Objekte D, E und F (nach der Kennzeichnung ZRSI)

Aufnahmedaten

Projekt: 20019_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_D_E_F_Hohenfelden

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

Innen	Höhe [cm] OKS ca. 12 cm über OKFF	D-Wohnstallhaus Hertel (Schwarze Küche) Achse I EG - Außenwand					Außen
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm * Proben	24 - 26 cm ** Proben	10 - 7 cm *** Proben	3 - 0 cm Proben	
	213	2_D_5_1	2_D_5_2	2_D_5_3	2_D_5_4	2_D_5_5	
	133	2_D_4_1	2_D_4_2	2_D_4_3	2_D_4_4	2_D_4_5	
	93	2_D_4_1	2_D_4_2	2_D_4_3	2_D_4_4	2_D_4_5	
	53	2_D_2_1	2_D_2_2	2_D_2_3	2_D_2_4	2_D_2_5	
	13	2_D_1_1	2_D_1_2	2_D_1_3	2_D_1_4****	2_D_1_5	

* real: 6 - 11 cm
** real: 23 - 24 cm
*** real: 11 - 6 cm

*** nicht entnommen

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

Innen	Höhe [cm] OKS ca. 40 cm über OKFF	E-Wohnstallhaus Hertel (Stall) Achse II EG - Außenwand					Außen
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm Proben	24 - 26 cm Proben	10 - 7 cm Proben	3 - 0 cm Proben	
	100	2_E_1_1	2_E_1_2	2_E_1_3	-	-	

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

Innen	Höhe [cm] OKS ca. 20 cm über OKFF	F-Haus Abtsbessingen Achse I EG - Außenwand					Außen
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm Proben	24 - 26 cm Proben	10 - 7 cm Proben	3 - 0 cm Proben	
	100	2_F_1_1	2_F_1_2	2_F_1_3	2_F_1_4	2_F_1_5	

Hinweis: Sockel außen höher als innen

OKRF... Oberkante Rohfußboden
OKFF... Oberkante Fertigfußboden
OKS... Oberkante Sockel
OKG... Oberkante Gelände

ZR
S

Aufnahmedaten

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_D_E_F_Hohenfelden

lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Achse Probe	Geschoss	Höhe über OKS in cm	Entnahmetiefe in cm	Entnahmematerial	Probenentnahme	Befundbeschreibung	auszuführende Untersuchungen
1	20029_2_D_1_1	D_I	EG	13	0-3	Lehm mit Stroh	Bohrmehl m. Bohrkrone	Reparaturmörtel 1999, trocken	F, S
2	20029_2_D_1_2	D_I	EG	13	7-10	Lehmstein	Bohrmehl m. Bohrkrone	Reparaturlehmstein 1999, trocken	F, S
3	20029_2_D_1_3	D_I	EG	13	24-26	Lehmstein	Bohrmehl m. Bohrkrone	Reparaturlehmstein 1999, trocken	F, S
4	20029_2_D_1_4	D_I	EG	13	10-7	-	Bohrmehl m. Bohrkrone	wurde nicht entnommen, wegen Natursteinsockel außen liegt höhe	F, S
5	20029_2_D_1_5	D_I	EG	13	3-0	Lehmputz	Bohrmehl m. Bohrkrone	Lehmputz mit Stroh auf Socken, mit Fassung, viel Stroh, trocken	F, S
6	20029_2_D_2_1	D_I	EG	53	0-3	Lehm mit Stroh	Bohrmehl m. Bohrkrone	Reparaturmörtel 1999, trocken	F, S
7	20029_2_D_2_2	D_I	EG	53	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	klamm	F, S
8	20029_2_D_2_3	D_I	EG	53	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	klamm	F, S
9	20029_2_D_2_4	D_I	EG	53	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	viel gelbes Stroh, trocken	F, S
10	20029_2_D_2_5	D_I	EG	53	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	evtl. tw. Putz, viel gelbes Stroh, trocken, Bein od. Zahn extra Probe	F, S
11	20029_2_D_3_1	D_I	EG	93	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	verschwärzt, mit Fassungen, trocken	F, S
12	20029_2_D_3_2	D_I	EG	93	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	gelbes Stroh, trocken	F, S
13	20029_2_D_3_3	D_I	EG	93	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	gelbes Stroh, trocken	F, S
14	20029_2_D_3_4	D_I	EG	93	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wenig Stroh, trocken, Probe für Altersbestimmung	F, S
15	20029_2_D_3_5	D_I	EG	93	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	evlt. tw. Putz, viel feines Stroh, trocken	F, S
16	20029_2_D_4_1	D_I	EG	133	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	verschwärzt, ohne Fassungen, trocken	F, S
17	20029_2_D_4_2	D_I	EG	133	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	nicht so viel Stroh, trocken	F, S
18	20029_2_D_4_3	D_I	EG	133	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	nicht so viel Stroh, trocken	F, S
19	20029_2_D_4_4	D_I	EG	133	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	fest, mäßig Stroh, ungleich verteilt, trocken	F, S
20	20029_2_D_4_5	D_I	EG	133	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	mit Putz und Fassung, Putz mit viel Flachs	F, S
21	20029_2_D_5_1	D_I	EG	213	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	stark verschwärzt, viele Fassungsfragmente	F, S
22	20029_2_D_5_2	D_I	EG	213	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	fast kein Stroh, trocken	F, S
23	20029_2_D_5_3	D_I	EG	213	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	fast kein Stroh, trocken, angenommene Nullprobe	F, S
24	20029_2_D_5_4	D_I	EG	213	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wenig Stroh, trocken, Scherben	F, S
25	20029_2_D_5_5	D_I	EG	213	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	mit Putz und Fassung, trocken, Stroh goldgelb, mit Flachsschäben	F, S
26	20029_2_E_1_1	E_II	EG	100	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	mit Lehmputz mit viel Flachs, trocken	F, S
27	20029_2_E_1_2	E_II	EG	100	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	mittel-viel Stroh, Tendenz klamm, Probe für Altersbestimmung	F, S
28	20029_2_E_1_3	E_II	EG	100	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	Stroh, trocken	F, S
29	20029_2_F_1_1	F_I	EG	100	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	mit Lehmputz , trocken, Zahn	F, S
30	20029_2_F_1_2	F_I	EG	100	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wenig Stroh, trocken, Probe für Altersbestimmung	F, S
31	20029_2_F_1_3	F_I	EG	100	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wenig Stroh, trocken, Knochen	F, S
32	20029_2_F_1_4	F_I	EG	100	10-7	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	Außensockel liegt höher	F, S
33	20029_2_F_1_5	F_I	EG	100	3-0	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wenig Stroh, trocken, ohne Putz oder Fassung	F, S

OKRF.. Oberkante Rohfußboden
OKFF... Oberkante Fertigfußboden
OKS... Oberkante Sockel
OKG... Oberkante Gelände
S... Salzbelastung
F... Feuchtegehalt

ZR
S

Trocknungsprotokoll

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_D_E_F_Hohenfelden

Konditionierung (23 °C, 50 % r. LF)

	$Masse_{Probe}$ in g				
Probenbezeichnung	vor Versuch 05.04.2023	Konditionierung 13.07.2023	Konditionierung 14.07.2023	Massedifferenz in %	Behälter
20029_2_D_1_1	16,04	16,01	16,00	0,1	6,43
20029_2_D_1_2	20,21	20,19	20,18	0,0	6,34
20029_2_D_1_3	21,08	21,00	21,00	0,0	5,96
20029_2_D_1_4	-	-	-	-	-
20029_2_D_1_5	19,82	19,84	19,84	0,0	5,97
20029_2_D_2_1	13,01	12,95	12,94	0,1	6,43
20029_2_D_2_2	33,33	33,06	33,05	0,0	6,43
20029_2_D_2_3	19,77	19,55	19,54	0,1	6,34
20029_2_D_2_4	17,05	16,96	16,96	0,0	6,35
20029_2_D_2_5	18,92	18,96	18,97	-0,1	6,34
20029_2_D_3_1	15,57	15,54	15,55	-0,1	6,43
20029_2_D_3_2	22,46	22,40	22,39	0,0	5,97
20029_2_D_3_3	17,91	17,84	17,84	0,0	6,43
20029_2_D_3_4	20,70	20,65	20,65	0,0	6,07
20029_2_D_3_5	15,17	15,18	15,19	-0,1	6,35
20029_2_D_4_1	20,20	20,14	20,13	0,0	6,43
20029_2_D_4_2	25,90	25,76	25,76	0,0	6,07
20029_2_D_4_3	25,02	24,90	24,90	0,0	6,34
20029_2_D_4_4	20,97	20,91	20,91	0,0	6,07
20029_2_D_4_5	18,16	18,12	18,15	-0,2	6,43
20029_2_D_5_1	14,58	14,54	14,55	-0,1	6,06
20029_2_D_5_2	18,14	18,06	18,06	0,0	5,97
20029_2_D_5_3	19,80	19,70	19,70	0,0	6,43
20029_2_D_5_4	19,34	19,27	19,27	0,0	6,35
20029_2_D_5_5	16,49	16,47	16,48	-0,1	5,96
20029_2_E_1_1	10,16	10,09	10,09	0,0	6,44
20029_2_E_1_2	11,03	10,91	10,91	0,0	6,07
20029_2_E_1_3	10,97	10,85	10,85	0,0	6,34
20029_2_F_1_1	14,64	14,57	14,57	0,0	6,07
20029_2_F_1_2	17,99	17,88	17,88	0,0	5,97
20029_2_F_1_3	17,84	17,74	17,74	0,0	5,97
20029_2_F_1_4	21,16	21,12	21,12	0,0	6,33
20029_2_F_1_5	16,15	16,19	16,19	0,0	6,34

ZR
S

Konditionierung (23 °C, 80 % r. LF)

Probenbezeichnung	Masse$_{Behälter+Probe}$ in g				Behälter
	vor Versuch 14.07.2023	Konditionierung 17.07.2023	Konditionierung 18.07.2023	Massedifferenz in %	
20029_2_D_1_1	16,00	16,10	16,09	0,1	6,43
20029_2_D_1_2	20,18	20,30	20,29	0,0	6,34
20029_2_D_1_3	21,00	21,11	21,11	0,0	5,96
20029_2_D_1_4	-	-	-	-	-
20029_2_D_1_5	19,84	20,20	20,20	0,0	5,97
20029_2_D_2_1	12,94	13,21	13,21	0,0	6,43
20029_2_D_2_2	33,05	33,60	33,60	0,0	6,43
20029_2_D_2_3	19,54	20,05	20,05	0,0	6,34
20029_2_D_2_4	16,96	17,40	17,40	0,0	6,35
20029_2_D_2_5	18,97	19,43	19,43	0,0	6,34
20029_2_D_3_1	15,55	15,63	15,63	0,0	6,43
20029_2_D_3_2	22,39	22,59	22,59	0,0	5,97
20029_2_D_3_3	17,84	18,03	18,03	0,0	6,43
20029_2_D_3_4	20,65	21,92	21,92	0,0	6,07
20029_2_D_3_5	15,19	15,42	15,42	0,0	6,35
20029_2_D_4_1	20,13	20,30	20,30	0,0	6,43
20029_2_D_4_2	25,76	25,99	25,99	0,0	6,07
20029_2_D_4_3	24,90	25,11	25,11	0,0	6,34
20029_2_D_4_4	20,91	21,07	21,07	0,0	6,07
20029_2_D_4_5	18,15	18,28	18,28	0,0	6,43
20029_2_D_5_1	14,55	14,64	14,64	0,0	6,06
20029_2_D_5_2	18,06	18,22	18,22	0,0	5,97
20029_2_D_5_3	19,70	19,88	19,88	0,0	6,43
20029_2_D_5_4	19,27	19,44	19,44	0,0	6,35
20029_2_D_5_5	16,48	16,60	16,60	0,0	5,96
20029_2_E_1_1	10,09	10,33	10,33	0,0	6,44
20029_2_E_1_2	10,91	11,19	11,19	0,0	6,07
20029_2_E_1_3	10,85	11,13	11,13	0,0	6,34
20029_2_F_1_1	14,57	14,72	14,72	0,0	6,07
20029_2_F_1_2	17,88	18,06	18,06	0,0	5,97
20029_2_F_1_3	17,74	17,91	17,91	0,0	5,97
20029_2_F_1_4	21,12	21,44	21,44	0,0	6,33
20029_2_F_1_5	16,19	16,46	16,46	0,0	6,34

ZRS

Trocknung (40 °C)

	Masse$_{Behälter+Probe}$ in g				
Probenbezeichnung	vor Versuch 18.07.2023	Trocknung 24.07.2023	Trocknung 25.07.2023	Massedifferenz in %	Behälter
20029_2_D_1_1	16,09	15,93	15,93	0,0	6,43
20029_2_D_1_2	20,29	20,11	20,11	0,0	6,34
20029_2_D_1_3	21,11	20,90	20,90	0,0	5,96
20029_2_D_1_4	-	-	-	-	-
20029_2_D_1_5	20,20	19,65	19,67	0,1	5,97
20029_2_D_2_1	13,21	12,82	12,81	-0,1	6,43
20029_2_D_2_2	33,60	32,70	32,70	0,0	6,43
20029_2_D_2_3	20,05	19,28	19,28	0,0	6,34
20029_2_D_2_4	17,40	16,74	16,74	0,0	6,35
20029_2_D_2_5	19,43	18,72	18,74	0,1	6,34
20029_2_D_3_1	15,63	15,44	15,44	0,0	6,43
20029_2_D_3_2	22,59	22,21	22,21	0,0	5,97
20029_2_D_3_3	18,03	17,67	17,67	0,0	6,43
20029_2_D_3_4	21,92	20,46	20,46	0,0	6,07
20029_2_D_3_5	15,42	15,05	15,04	-0,1	6,35
20029_2_D_4_1	20,30	19,96	19,96	0,0	6,43
20029_2_D_4_2	25,99	25,51	25,51	0,0	6,07
20029_2_D_4_3	25,11	24,67	24,67	0,0	6,34
20029_2_D_4_4	21,07	20,72	20,72	0,0	6,07
20029_2_D_4_5	18,28	18,00	18,01	0,1	6,43
20029_2_D_5_1	14,64	14,41	14,41	0,0	6,06
20029_2_D_5_2	18,22	17,89	17,89	0,0	5,97
20029_2_D_5_3	19,88	19,50	19,50	0,0	6,43
20029_2_D_5_4	19,44	19,08	19,08	0,0	6,35
20029_2_D_5_5	16,60	16,33	16,33	0,0	5,96
20029_2_E_1_1	10,33	9,96	9,96	0,0	6,44
20029_2_E_1_2	11,19	10,76	10,76	0,0	6,07
20029_2_E_1_3	11,13	10,70	10,70	0,0	6,34
20029_2_F_1_1	14,72	14,43	14,43	0,0	6,07
20029_2_F_1_2	18,06	17,69	17,69	0,0	5,97
20029_2_F_1_3	17,91	17,56	17,57	0,1	5,97
20029_2_F_1_4	21,44	20,90	20,90	0,0	6,33
20029_2_F_1_5	16,46	16,05	16,05	0,0	6,34

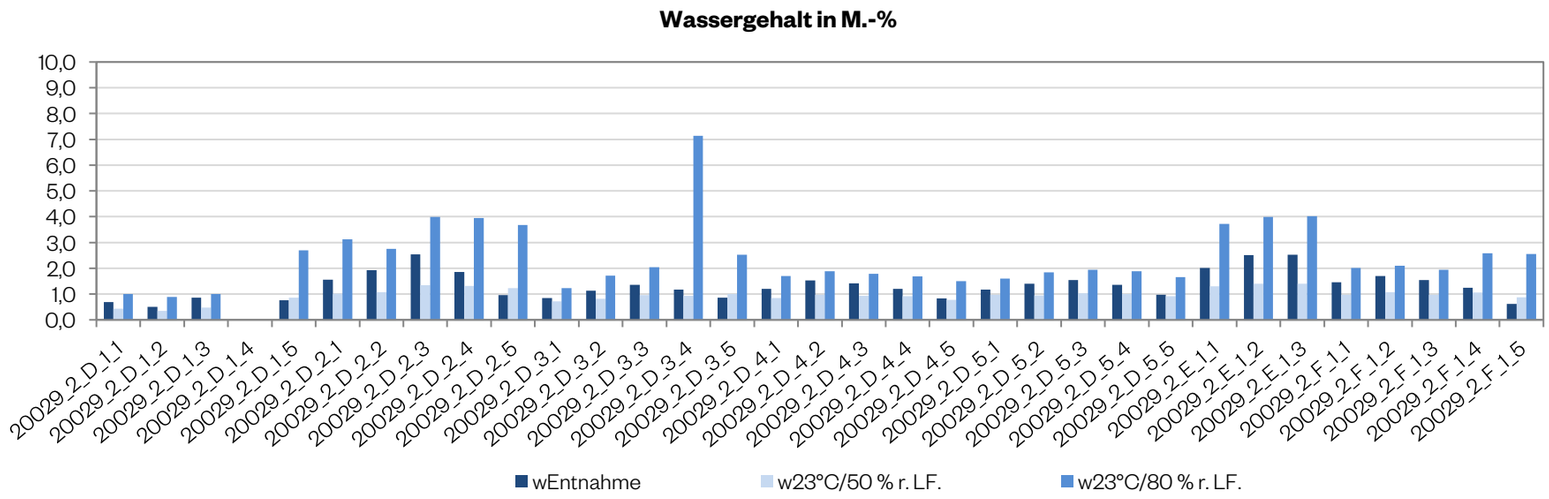
Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinanderfolgenden Wägungen im Abstand von 24 Stunden um höchstens 0,2 % der Masse bezogen auf den kleineren Messwert voneinander

ZR
S

Übersicht der ermittelten Feuchtegehalte

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_D_E_F_Hohenfelden

lfd. Nr.	Achse Probe	Proben-bezeichnung	Geschoss	Höhe über OKS in cm	Entnahmetiefe in cm	$w_{Entnahme}$ in M.-%	$w_{23°C/50\,\%\,r.\,LF.}$ in M.-%	$w_{23°C/80\,\%\,r.\,LF.}$ in M.-%
1	D_I	20029_2_D_1_1	EG	13	0-3	0,69	0,44	1,00
2	D_I	20029_2_D_1_2	EG	13	7-10	0,50	0,35	0,90
3	D_I	20029_2_D_1_3	EG	13	24-26	0,86	0,48	1,00
4	D_I	20029_2_D_1_4	EG	13	10-7	-	-	-
5	D_I	20029_2_D_1_5	EG	13	3-0	0,76	0,86	2,69
6	D_I	20029_2_D_2_1	EG	53	0-3	1,56	1,01	3,12
7	D_I	20029_2_D_2_2	EG	53	7-10	1,93	1,07	2,75
8	D_I	20029_2_D_2_3	EG	53	24-26	2,54	1,35	3,99
9	D_I	20029_2_D_2_4	EG	53	10-7	1,85	1,31	3,94
10	D_I	20029_2_D_2_5	EG	53	3-0	0,96	1,23	3,68
11	D_I	20029_2_D_3_1	EG	93	0-3	0,84	0,71	1,23
12	D_I	20029_2_D_3_2	EG	93	7-10	1,13	0,81	1,71
13	D_I	20029_2_D_3_3	EG	93	24-26	1,36	0,96	2,04
14	D_I	20029_2_D_3_4	EG	93	10-7	1,17	0,93	7,14
15	D_I	20029_2_D_3_5	EG	93	3-0	0,86	1,00	2,53
16	D_I	20029_2_D_4_1	EG	133	0-3	1,20	0,85	1,70
17	D_I	20029_2_D_4_2	EG	133	7-10	1,53	0,98	1,88
18	D_I	20029_2_D_4_3	EG	133	24-26	1,42	0,93	1,78
19	D_I	20029_2_D_4_4	EG	133	10-7	1,21	0,92	1,69
20	D_I	20029_2_D_4_5	EG	133	3-0	0,83	0,78	1,50
21	D_I	20029_2_D_5_1	EG	213	0-3	1,18	0,97	1,60
22	D_I	20029_2_D_5_2	EG	213	7-10	1,40	0,95	1,84
23	D_I	20029_2_D_5_3	EG	213	24-26	1,54	1,03	1,95
24	D_I	20029_2_D_5_4	EG	213	10-7	1,36	1,00	1,89
25	D_I	20029_2_D_5_5	EG	213	3-0	0,98	0,92	1,65
26	E_II	20029_2_E_1_1	EG	100	0-3	2,01	1,31	3,71
27	E_II	20029_2_E_1_2	EG	100	7-10	2,51	1,39	4,00
28	E_II	20029_2_E_1_3	EG	100	24-26	2,52	1,40	4,02
29	F_I	20029_2_F_1_1	EG	100	0-3	1,46	0,97	2,01
30	F_I	20029_2_F_1_2	EG	100	7-10	1,70	1,07	2,09
31	F_I	20029_2_F_1_3	EG	100	24-26	1,54	0,97	1,94
32	F_I	20029_2_F_1_4	EG	100	10-7	1,24	1,05	2,58
33	F_I	20029_2_F_1_5	EG	100	3-0	0,62	0,87	2,55


Wassergehalt in M.-%
10,0
9,0
8,0
7,0
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
20029_2_D_1_1
20029_2_D_1_2
20029_2_D_1_3
20029_2_D_1_4
20029_2_D_1_5
20029_2_D_2_1
20029_2_D_2_2
20029_2_D_2_3
20029_2_D_2_4
20029_2_D_2_5
20029_2_D_3_1
20029_2_D_3_2
20029_2_D_3_3
20029_2_D_3_4
20029_2_D_3_5
20029_2_D_4_1
20029_2_D_4_2
20029_2_D_4_3
20029_2_D_4_4
20029_2_D_4_5
20029_2_D_5_1
20029_2_D_5_2
20029_2_D_5_3
20029_2_D_5_4
20029_2_D_5_5
20029_2_E_1_1
20029_2_E_1_2
20029_2_E_1_3
20029_2_F_1_1
20029_2_F_1_2
20029_2_F_1_3
20029_2_F_1_4
20029_2_F_1_5
wEntnahme
w23°C/50 % r. LF.
w23°C/80 % r. LF.

ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

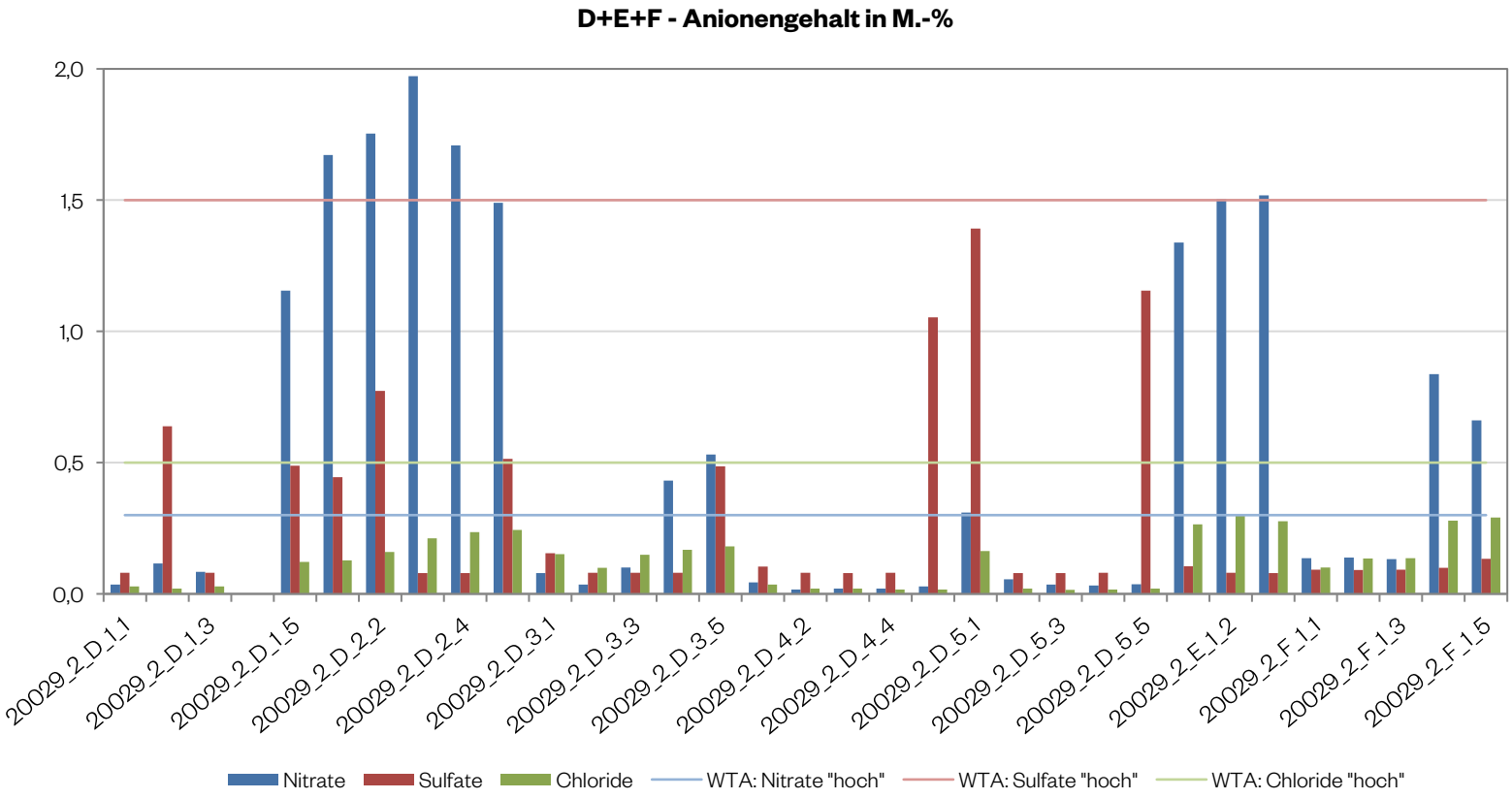
Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_D_E_F_Hohenfelden

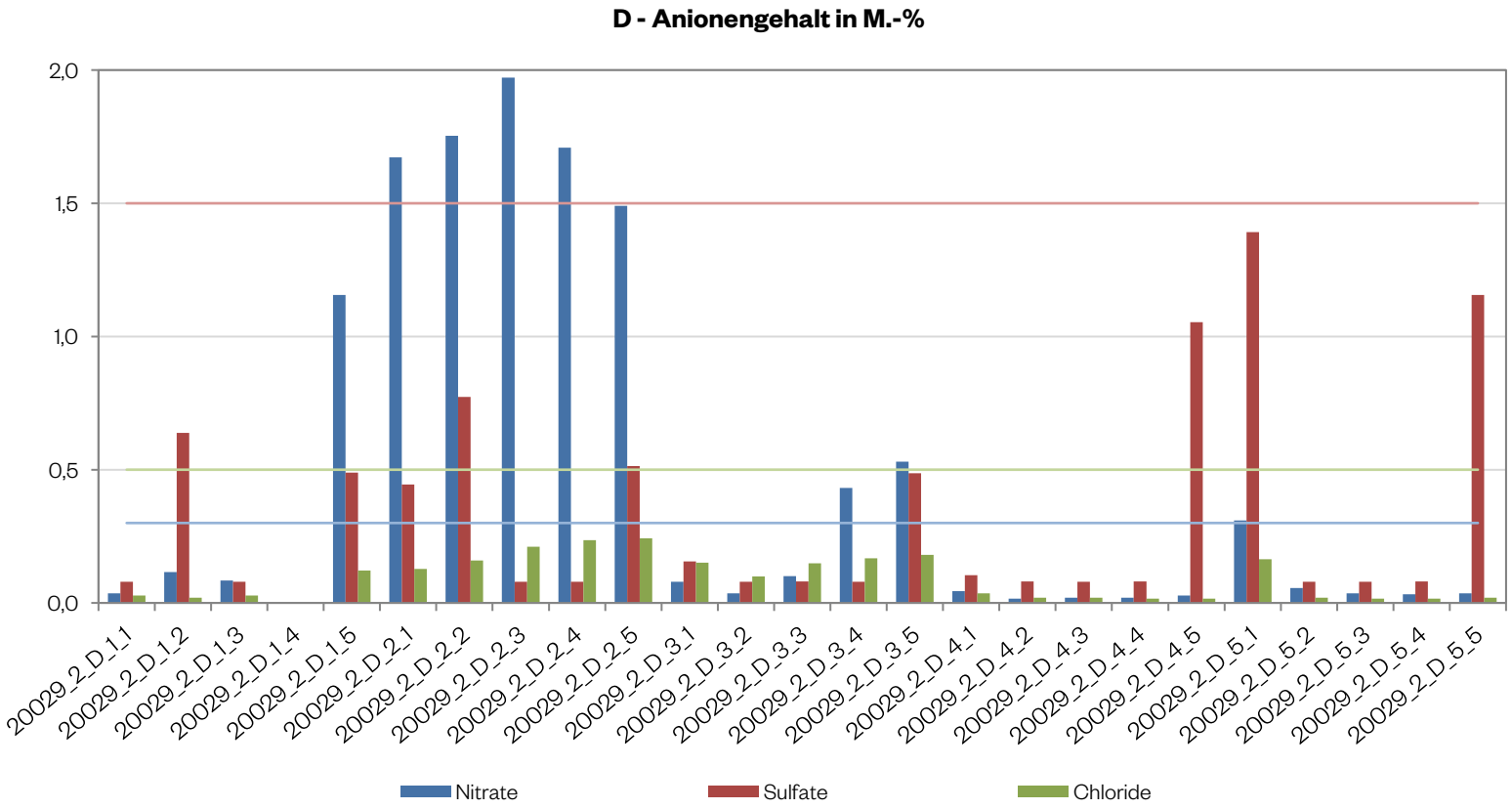
lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Geschoss	Höhe über OKS in cm	Entnahme-tiefe in cm	Entnahmematerial		Nitrate M.-%		Sulfate M.-%		Chloride M.-%	∑ Anionengehalt M.-%
1	20029_2_D_1_1	EG	13	0-3	Lehm mit Stroh		0,04	<	0,08		0,03	0,14
2	20029_2_D_1_2	EG	13	7-10	Lehmstein		0,12		0,64		0,02	0,77
3	20029_2_D_1_3	EG	13	24-26	Lehmstein		0,08	<	0,08		0,03	0,19
4	20029_2_D_1_4	EG	13	10-7	-							-
5	20029_2_D_1_5	EG	13	3-0	Lehmputz		1,16		0,49		0,12	1,77
6	20029_2_D_2_1	EG	53	0-3	Lehm mit Stroh		1,67		0,44		0,13	2,24
7	20029_2_D_2_2	EG	53	7-10	Wellerlehm		1,75		0,77		0,16	2,69
8	20029_2_D_2_3	EG	53	24-26	Wellerlehm		1,97	<	0,08		0,21	2,26
9	20029_2_D_2_4	EG	53	10-7	Wellerlehm		1,71	<	0,08		0,24	2,02
10	20029_2_D_2_5	EG	53	3-0	Wellerlehm		1,49		0,51		0,24	2,25
11	20029_2_D_3_1	EG	93	0-3	Wellerlehm		0,08		0,16		0,15	0,39
12	20029_2_D_3_2	EG	93	7-10	Wellerlehm		0,04		0,08		0,10	0,22
13	20029_2_D_3_3	EG	93	24-26	Wellerlehm		0,10	<	0,08		0,15	0,33
14	20029_2_D_3_4	EG	93	10-7	Wellerlehm		0,43	<	0,08		0,17	0,68
15	20029_2_D_3_5	EG	93	3-0	Wellerlehm		0,53		0,49		0,18	1,20
16	20029_2_D_4_1	EG	133	0-3	Wellerlehm		0,04		0,10		0,04	0,18
17	20029_2_D_4_2	EG	133	7-10	Wellerlehm	<	0,02	<	0,08		0,02	0,12
18	20029_2_D_4_3	EG	133	24-26	Wellerlehm		0,02	<	0,08		0,02	0,12
19	20029_2_D_4_4	EG	133	10-7	Wellerlehm		0,02	<	0,08		0,02	0,12
20	20029_2_D_4_5	EG	133	3-0	Wellerlehm		0,03		1,05		0,02	1,10
21	20029_2_D_5_1	EG	213	0-3	Wellerlehm		0,31		1,39		0,16	1,86
22	20029_2_D_5_2	EG	213	7-10	Wellerlehm		0,06	<	0,08		0,02	0,16
23	20029_2_D_5_3	EG	213	24-26	Wellerlehm		0,04	<	0,08		0,02	0,13
24	20029_2_D_5_4	EG	213	10-7	Wellerlehm		0,03	<	0,08		0,02	0,13

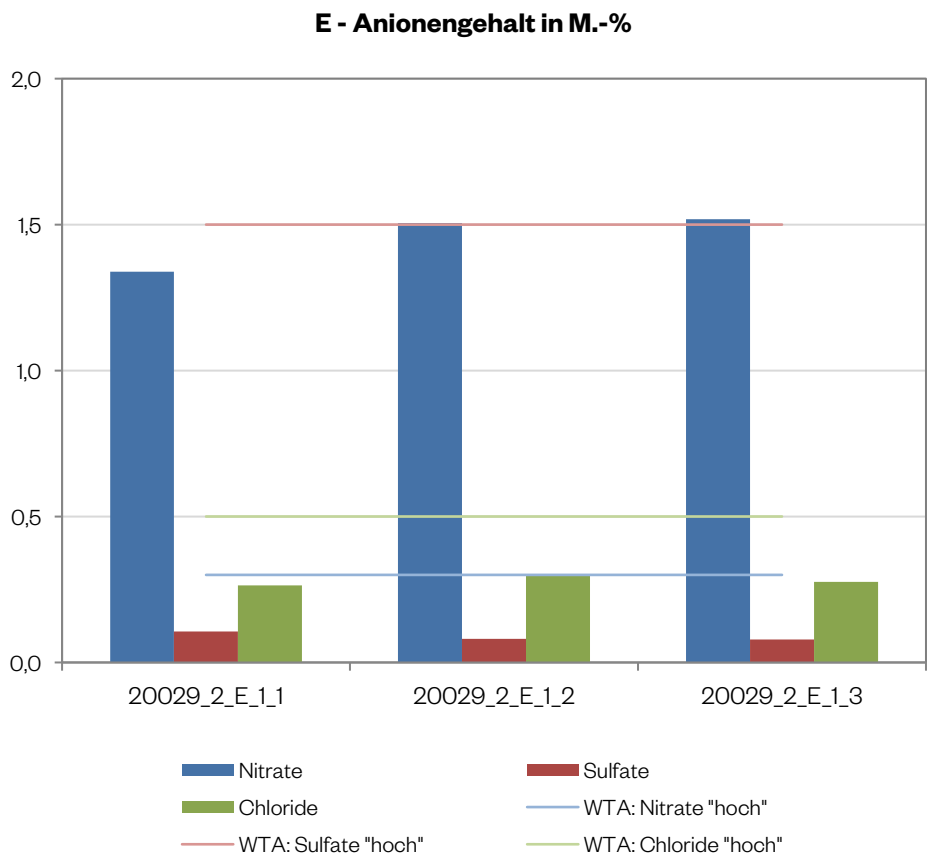
25	20029_2_D_5_5	EG	213	3-0	Wellerlehm		0,04		1,16		0,02	1,21
26	20029_2_E_1_1	EG	100	0-3	Wellerlehm		1,34	<	0,11		0,26	1,71
27	20029_2_E_1_2	EG	100	7-10	Wellerlehm		1,50	<	0,08		0,30	1,88
28	20029_2_E_1_3	EG	100	24-26	Wellerlehm		1,52	<	0,08		0,28	1,87
29	20029_2_F_1_1	EG	100	0-3	Wellerlehm		0,14		0,09		0,10	0,33
30	20029_2_F_1_2	EG	100	7-10	Wellerlehm		0,14		0,09		0,13	0,36
31	20029_2_F_1_3	EG	100	24-26	Wellerlehm		0,13		0,09		0,14	0,36
32	20029_2_F_1_4	EG	100	10-7	Wellerlehm		0,84		0,10		0,28	1,22
33	20029_2_F_1_5	EG	100	3-0	Wellerlehm		0,66		0,13		0,29	1,09

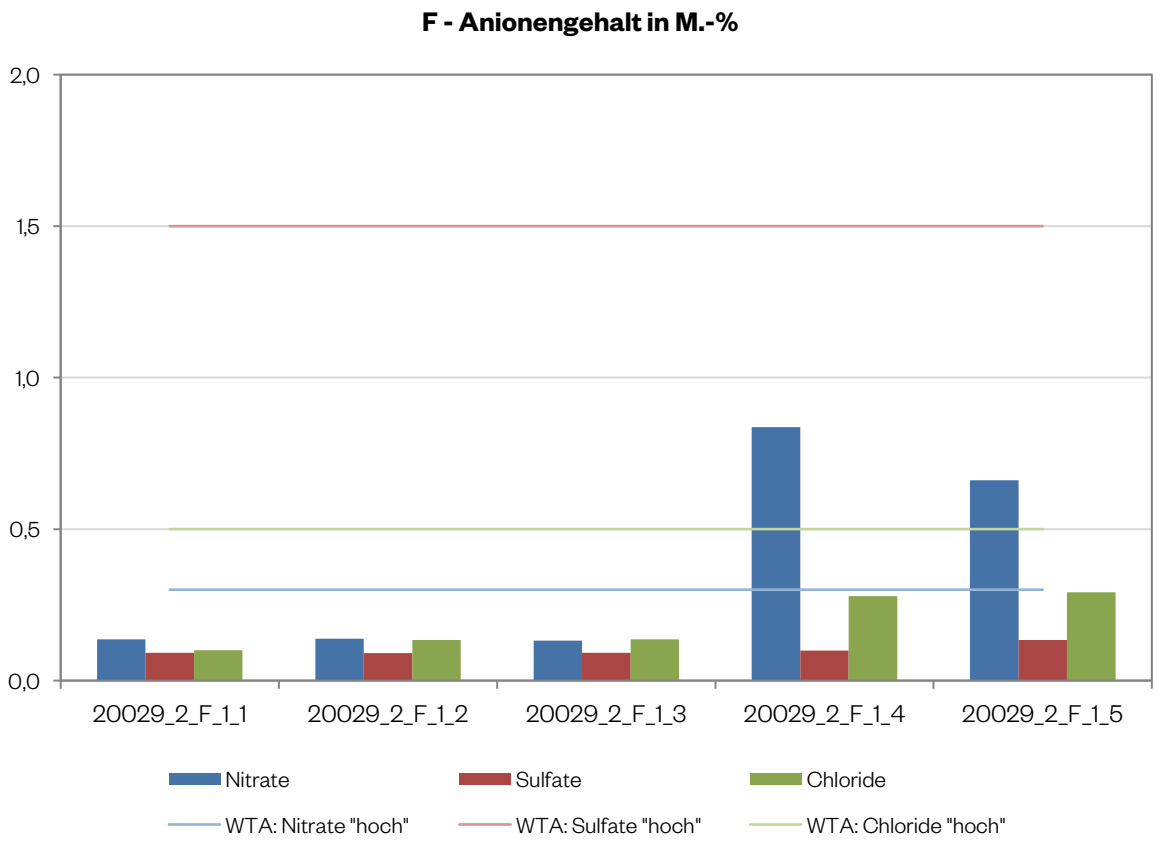
Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20019_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_D_E_F_Hohenfelden




D - Anionengehalt in M.-%
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
20029_2_D_1_1
20029_2_D_1_2
20029_2_D_1_3
20029_2_D_1_4
20029_2_D_1_5
20029_2_D_2_1
20029_2_D_2_2
20029_2_D_2_3
20029_2_D_2_4
20029_2_D_2_5
20029_2_D_3_1
20029_2_D_3_2
20029_2_D_3_3
20029_2_D_3_4
20029_2_D_3_5
20029_2_D_4_1
20029_2_D_4_2
20029_2_D_4_3
20029_2_D_4_4
20029_2_D_4_5
20029_2_D_5_1
20029_2_D_5_2
20029_2_D_5_3
20029_2_D_5_4
20029_2_D_5_5
Nitrate
Sulfate
Chloride


E - Anionengehalt in M.-%
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
20029_2_E_1_1
20029_2_E_1_2
20029_2_E_1_3
Nitrate
Sulfate
Chloride
WTA: Nitrate "hoch"
WTA: Sulfate "hoch"
WTA: Chloride "hoch"


F - Anionengehalt in M.-%
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
20029_2_F_1_1
20029_2_F_1_2
20029_2_F_1_3
20029_2_F_1_4
20029_2_F_1_5
Nitrate
Sulfate
Chloride
WTA: Nitrate "hoch"
WTA: Sulfate "hoch"
WTA: Chloride "hoch"

ZRS

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_D_E_F_Hohenfelden

Innen	Höhe [cm] OKS	D-Wohnstallhaus Hertel (Schwarze Küche) Achse I EG - Außenwand [M.-%]															Außen
		0 - 3 cm			7 - 10 cm *			24 - 26 cm **			10 - 7 cm ***			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	213	0,31	1,39	0,16	0,06	0,08	0,02	0,04	0,08	0,02	0,03	0,08	0,02	0,31	1,16	0,02	
	133	0,04	0,10	0,04	0,02	0,08	0,02	0,02	0,08	0,02	0,02	0,08	0,02	0,03	1,05	0,02	
	93	0,08	0,16	0,15	0,04	0,08	0,10	0,10	0,08	0,15	0,43	0,08	0,17	0,53	0,49	0,18	
	53	1,67	0,44	0,13	1,75	0,77	0,16	1,97	0,08	0,21	1,71	0,08	0,24	1,49	0,51	0,24	
	13	0,04	0,08	0,03	0,12	0,64	0,02	0,08	0,08	0,03				1,16	0,49	0,12	

* real: 6 - 11 cm

** real: 23 - 24 cm

*** real: 11 - 6 cm

Innen	Höhe [cm] OKS	E-Wohnstallhaus Hertel (Stall) Achse II EG - Außenwand [M.-%]															Außen
		0 - 3 cm			7 - 10 cm			24 - 26 cm			10 - 7 cm			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	100	1,34	0,11	0,26	1,50	0,08	0,30	1,52	0,08	0,28							

Innen	Höhe [cm] OKS	F-Haus Abtsbessingen Achse I EG - Außenwand [M.-%]															Außen
		0 - 3 cm			7 - 10 cm			24 - 26 cm			10 - 7 cm			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	100	0,14	0,09	0,10	0,14	0,09	0,13	0,13	0,09	0,14	0,84	0,10	0,28	0,66	0,13	0,29	

ZRS

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_D_E_F_Hohenfelden

Innen	Höhe [cm] OKS	D-Wohnstallhaus Hertel (Schwarze Küche) Achse I EG - Außenwand [M.-%]																				Außen
		0 - 3 cm				7 - 10 cm *				24 - 26 cm **				10 - 7 cm ***				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	213	0,31	1,39	0,16	1,86	0,06	0,08	0,02	0,16	0,04	0,08	0,02	0,13	0,03	0,08	0,02	0,13	0,31	1,16	0,02	1,21	
	133	0,04	0,10	0,04	0,18	0,02	0,08	0,02	0,12	0,02	0,08	0,02	0,12	0,02	0,08	0,02	0,12	0,03	1,05	0,02	1,10	
	93	0,08	0,16	0,15	0,39	0,04	0,08	0,10	0,22	0,10	0,08	0,15	0,33	0,43	0,08	0,17	0,68	0,53	0,49	0,18	1,20	
	53	1,67	0,44	0,13	2,24	1,75	0,77	0,16	2,69	1,97	0,08	0,21	2,26	1,71	0,08	0,24	2,02	1,49	0,51	0,24	2,25	
	13	0,04	0,08	0,03	0,14	0,12	0,64	0,02	0,77	0,08	0,08	0,03	0,19	-				1,16	0,49	0,12	1,77	

* real: 6 - 11 cm

** real: 23 - 24 cm

*** real: 11 - 6 cm

Innen	Höhe [cm] OKS	E-Wohnstallhaus Hertel (Stall) Achse II EG - Außenwand [M.-%]																				Außen
		0 - 3 cm				7 - 10 cm				24 - 26 cm				10 - 7 cm				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	100	1,34	0,11	0,26	1,71	1,50	0,08	0,30	1,88	1,52	0,08	0,28	1,87	-	-	-	-	-	-	-	-	

Innen	Höhe [cm] OKS	F-Haus Abtsbessingen Achse I EG - Außenwand [M.-%]																				Außen
		0 - 3 cm				7 - 10 cm				24 - 26 cm				10 - 7 cm				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	100	0,14	0,09	0,10	0,33	0,14	0,09	0,13	0,36	0,13	0,09	0,14	0,36	0,84	0,10	0,28	1,22	0,66	0,13	0,29	1,09	

Anlage 4: Objekt G (nach der Kennzeichnung ZRSI)

Aufnahmedaten

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_G_Schleberoda

Bohrrichtung → | ← Bohrrichtung

Innen Stall	Höhe [cm] OKS	G-Stall (aktiv) Achse I EG - Innenwand					Innen Schuppen
		0 - 3 cm Proben	7 - 10 cm * Proben	24 - 26 cm ** Proben	10 - 7 cm *** Proben	3 - 0 cm Proben	
	200	2_G_2_1	2_G_2_2	-	-	-	
	100	2_G_1_1	2_G_1_2	2_G_1_3	-	-	

* real: 6 - 11 cm
** real: 23 - 24 cm
*** real: 11 - 6 cm

Sockel bei 48 cm OKRF

OKRF... Oberkante Rohfußboden
OKFF... Oberkante Fertigfußboden
OKS... Oberkante Sockel
OKG... Oberkante Gelände

ZR
S

Aufnahmedaten

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_G_Schleberoda

lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Achse Probe	Geschoss	Höhe über OKS in cm	Entnahmetiefe in cm	Entnahmematerial	Probenentnahme	Befundbeschreibung	auszuführende Untersuchungen
1	20029_2_G_1_1	G_I	EG	100	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	ockerfarben, fest, viel Stroh (goldgelb), krümelig/mehlig, Gesteinskörnung wenig	F, S
2	20029_2_G_1_2	G_I	EG	100	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wie _1_1 aber mittel Stroh	F, S
3	20029_2_G_1_3	G_I	EG	100	24-26	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wie _1_2	F, S
4	20029_2_G_2_1	G_I	EG	200	0-3	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wie _1_1, mit Kalkputz, ca. 1 cm	F, S
5	20029_2_G_2_2	G_I	EG	200	7-10	Wellerlehm	Bohrmehl m. Bohrkrone	wie _ 1_2	F, S

OKRF.. Oberkante Rohfußboden
OKFF... Oberkante Fertigfußboden
OKS... Oberkante Sockel
OKG... Oberkante Gelände
S... Salzbelastung
F... Feuchtegehalt

ZR
SI

Trocknungsprotokoll

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_G_Schleberoda

Trocknung (40 °C)

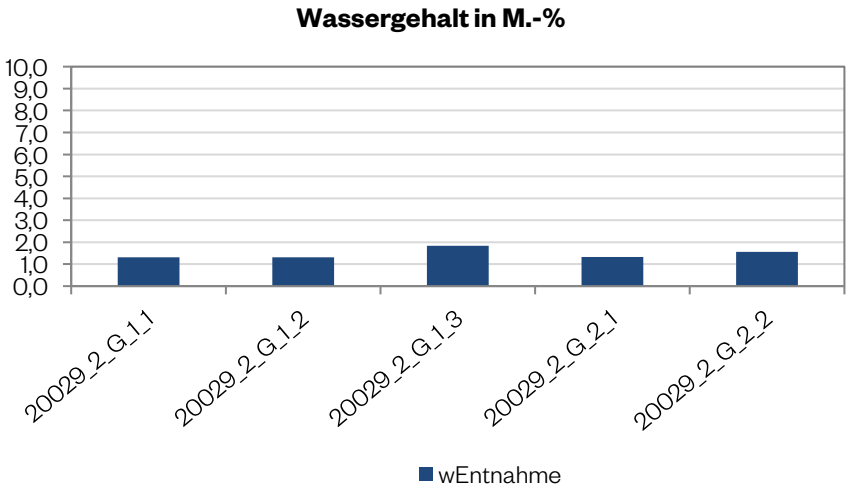
	Masse$_{Behälter+Probe}$ in g				
Probenbezeichnung	vor Versuch 12.10.2023	Trocknung 16.10.2023	Trocknung 17.10.2023	Massedifferenz in %	Behälter
20029_2_G_1_1	21,58	21,30	21,30	0,0	65,00
20029_2_G_1_2	25,46	25,13	25,13	0,0	65,00
20029_2_G_1_3	17,21	16,90	16,90	0,0	65,00
20029_2_G_2_1	16,87	16,65	16,65	0,0	65,00
20029_2_G_2_2	25,96	25,56	25,56	0,0	65,00

Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinanderfolgenden Wägungen im Abstand von 24 Stunden um höchstens 0,2 % der Masse bezogen auf den kleineren Messwert voneinander

Übersicht der ermittelten Feuchtegehalte

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_G_Schleberoda

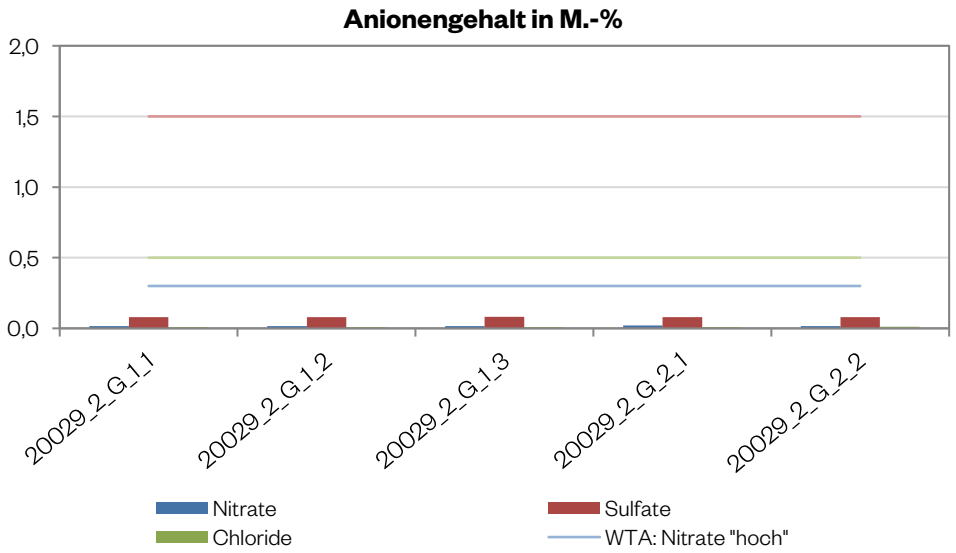
lfd. Nr.	Achse Probe	Proben-bezeichnung	Geschoss	Höhe über OKS in cm	Entnahmetiefe in cm	$w_{Entnahme}$ in M.-%
1	G_I	20029_2_G_1_1	EG	100	0-3	1,31
2	G_I	20029_2_G_1_2	EG	100	7-10	1,31
3	G_I	20029_2_G_1_3	EG	100	24-26	1,83
4	G_I	20029_2_G_2_1	EG	200	0-3	1,32
5	G_I	20029_2_G_2_2	EG	200	7-10	1,56



Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_G_Schleberoda

lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Geschoss	Höhe über OKS in cm	Entnahmetiefe in cm	Entnahmematerial	Nitrate M.-%	Sulfate M.-%	Chloride M.-%	∑ Anionengehalt M.-%
1	20029_2_G_1_1	EG	100	0-3	Wellerlehm	< 0,02	< 0,08	0,01	0,10
2	20029_2_G_1_2	EG	100	7-10	Wellerlehm	< 0,02	< 0,08	0,01	0,10
3	20029_2_G_1_3	EG	100	24-26	Wellerlehm	< 0,02	< 0,08	0,01	0,11
4	20029_2_G_2_1	EG	200	0-3	Wellerlehm	0,02	< 0,08	0,01	0,11
5	20029_2_G_2_2	EG	200	7-10	Wellerlehm	< 0,02	< 0,08	0,01	0,11



ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_G_Schleberoda

Innen Stall	Höhe [cm] OKS	G-Stall (aktiv) Achse I EG - Innenwand [M.-%]															Innen Schuppen
		0 - 3 cm			7 - 10 cm *			24 - 26 cm **			10 - 7 cm ***			3 - 0 cm			
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Chlorid	
	200	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,01										
	100	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,01							

* real: 6 - 11 cm
** real: 23 - 24 cm
*** real: 11 - 6 cm

Sockel bei 48 cm OKRF

ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 20029_2_FuE_Golehm_Schadstoffe_G_Schleberoda

Innen Stall	Höhe [cm] OKS	G-Stall (aktiv) Achse I EG - Innenwand [M.-%]																				Innen Schuppen
		0 - 3 cm				7 - 10 cm *				24 - 26 cm **				10 - 7 cm ***				3 - 0 cm				
		Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	Nitrat	Sulfat	Chlorid	∑	
	200	0,02	0,08	0,01	0,11	0,02	0,08	0,01	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	100	0,02	0,08	0,01	0,10	0,02	0,08	0,01	0,10	0,02	0,08	0,01	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	

* real: 6 - 11 cm
** real: 23 - 24 cm
*** real: 11 - 6 cm

Sockel bei 48 cm OKRF

KURZBERICHT

HistRCL – Vorstudie zur Identifikation und Einordnung von historischen Lehmbauteilen für die Wiederverwendung hinsichtlich der Anreicherung von Schadstoffen und bauschädlichen Salzen (FKZ 03WIR5704)

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), ZRS Ingenieure GmbH (ZRSI)

Lehm aus dem historischen Baubestand bietet ein hohes Potenzial für eine Wiederverwendung und die Schonung natürlicher Ressourcen. Der klimafreundliche Roh- und Baustoff ist ohne energieintensive Aufbereitungsprozesse direkt erneut einsetzbar.
Der Lehmbau in Mitteldeutschland kann vor allem durch die geologisch bedingte hohe Verfügbarkeit des Rohstoffes auf eine lange Tradition zurückblicken. Anthropogene Einflüsse aus der Industrie der Region Mitteldeutschland aber auch die Akkumulation von Schadstoffen durch spezifische Nutzungen und bauschädlichen Salzen durch Feuchteeinfluss können jedoch einer Wiederverwendung entgegenstehen. Aufgabe des Projektes war daher die exemplarische Überprüfung der Rezyklierbarkeit von Lehmbaustoffen aus historischen Bauten unter besonderer Berücksichtigung der Umwelt- und Nutzerverträglichkeit.

Die potenzielle Anreicherung von Schadstoffen durch im Lehm enthaltene Tonminerale ist in der Literatur gut dokumentiert. Auch sind die Quellen bauschädlicher Salze und salzinduzierte Schädigungsmechanismen in Baustoffen bekannt. Das Thema Recyclinglehm ist bisher allerdings kaum untersucht worden und Grenzwerte existieren nicht.

In Zusammenarbeit mit der Koordinierungsstelle des WIR!-Bündnisses GOLEHM wurden exemplarisch aus dem historischen Baubestand geeignete Wellerlehmgebäude mit einer potenziellen Salz-, Schadstoff- oder mikrobiologischen Belastung ausgewählt und mittels Kernbohrungen beprobt. Auf Grundlage von Analysen dieser Proben wurden Wandprofile der Gehalte von Salzen sowie identifizierter anorganischer und organischer Schadstoffe erstellt und eine Risikoabschätzung vorgenommen. Ausgewählte Proben aus dem Wandaufbau der beprobten Lehmwände wurden durch Emissionsuntersuchungen in Kammern oder Mikrokammern auf Ausgasungen leicht flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) überprüft, um die Eignung von rezykliertem Lehm für die Nutzung in Innenräumen zu

bewerten. An zwei ausgewählten Gebäuden wurden Lehmproben im bodennahen Bereich der Wände für orientierende mikrobiologische Untersuchungen entnommen, da hier die Besiedelung mit gesundheitsschädlichen Pilzen durch Verschmutzung aufgrund von Tierhaltung potenziell begünstigt war.

Die Machbarkeit des erneuten Einsatzes von Lehmbaustoffen aus dem historischen Gebäudebestand konnte für die untersuchten Beispielobjekte grundsätzlich bestätigt werden. Die Vorstudie ergab, dass selbst in der unmittelbaren Umgebung ehemaliger Industrieregionen wie Bitterfeld-Wolfen keine bedenklichen Anreicherungen von Schadstoffen in Lehmbaustoffen nachgewiesen werden können, die einer Wiederverwertung der Baustoffe entgegenstehen. Nur in einem Fall gab es eine nutzungsbedingte, oberflächliche Anreicherung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) durch extreme Einwirkung von Rauchgasen (Schwarzküche), die vor einem Rückbau gut erkennbar und separierbar wäre. Bei einigen beprobten Objekten wurden teilweise erhöhte Schwermetallgehalte nachgewiesen, welche durch regionale Hintergrundgehalte des verwendeten Baulehms zu erklären sind.
Es wurden keine leicht flüchtigen Stoffe in bedeutendem Ausmaß identifiziert, so dass gesundheitsschädliche Einflüsse auf die Innenraumluft nicht zu erwarten sind.
An den beprobten Wellerlehmwänden konnten keine deutlich sichtbaren Bauschäden ausgemacht werden. Dennoch wurden bauschädliche Salze teilweise in Gehalten über den Grenzwerten für Lehmbaustoffe gefunden, die sich im Inneren der Wände aufkonzentriert hatten. Da Grenzwerte für Wellerlehm nicht reguliert sind, wurden Festlegungen aus den Normen für Lehmbaustoffe (DIN 18945 bis 18947) herangezogen. Schlussfolgerungen und praktische Empfehlungen für die Wiederverwertung wurden nach zukünftigen Nutzungskategorien abgeleitet.

Die Ergebnisse wurden regelmäßig im Netzwerk der WIR!-GoLehm Initiative diskutiert und der Ergebnistransfer zu den relevanten Interessengruppen ist gewährleistet. Die Vorstudie liefert einen Beitrag, Unsicherheiten bei im Lehmbau tätigen Unternehmen hinsichtlich des sicheren Umganges mit möglichen stofflichen Belastungen abzubauen und diese bei der Einhaltung umweltrechtlicher und kreislaufgerechter Rahmenbedingungen bei der Wiederverwendung von Lehm aus dem historischen Bestand zu unterstützen.