



DIPLOMARBEIT

wasted ground

Die Potenziale von Aushub im Lehmbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.in Dipl.-Ing.in Dr.in phil. Andrea Rieger-Jandl
E251 - Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege

Univ.Prof.in Dipl.-Ing.in Dr.in techn. Azra Korjenic
E207 - Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von
Karolin Wagner
12031845

Wien, am 22. Mai 2024

Abstrakt

Lehm als Baustoff unterscheidet sich von anderen Baumaterialien nicht nur durch seine unumstrittene Recyclingfähigkeit, seine besondere Nachhaltigkeit und seine positiven bauphysikalischen Eigenschaften. Der einzigartige Vorteil von Lehm besteht darin, dass er innerhalb eines Bauvorhabens als Aushub gewonnen werden kann. Dieser Aspekt wird jedoch im aktuellen Lehmbau nur unzureichend berücksichtigt und damit bleiben vielversprechende Möglichkeiten zum Wandel des Bausektors zur Nachhaltigkeit ungenutzt.

Die gegenwärtige Entstehung einer Lehmbauindustrie bietet die Möglichkeit einer erneuten Evaluierung der etablierten Vorgehensweisen in bestehenden Industriezweigen. Sie erlaubt die Erweiterung der Zielsetzung von einer Industrie für nachhaltige Lehmbaumaterialien hin zu einer nachhaltigen Lehmbauindustrie. Dafür ist es alternativlos, die ökologischen Potenziale von Lehm im Bauwesen ganzheitlich einzubeziehen – beginnend mit der Gewinnung des Ausgangsstoffes: dem Baulehm.

Im traditionellen Lehmbau stellte die Verwertung von Aushub eine Selbstverständlichkeit dar. Bauweisen wurden gezielt an das lokal verfügbare Material angepasst und dementsprechend entwickelt. Heute fällt Bauaushub jeglicher Art unter die Kategorie Abfall. Das österreichische Gesetz regelt dementsprechend seinen Umgang: Mit jährlich über 40 Millionen Tonnen bei steigender Tendenz macht Aushubmaterial den größten Massenstrom in der Abfallwirtschaft aus. Der Hauptteil davon wird auf den knapp 1.000 Bodenaushubdeponien in Österreich abgelagert und verbleibt damit ungenutzt im Status der nicht erforschten Potenziale.

Die Diplomarbeit setzt sich mit verschiedenen Handlungsfeldern der Aushubverwertung ausein-

ander. Durch eine analytische Momentaufnahme werden rechtliche Problemstellungen und mögliche Lösungsansätze aufgezeigt. Aktuelle Entwicklungen in der Rohstoffaufbereitung generieren neue Voraussetzungen für die Bewertung von Lehm. Eine direkte Vorortverwertung von Aushubmaterial stellt nicht immer die effizienteste Nutzung des Materials dar. Besonders wenn die beinahe uneingeschränkten Möglichkeiten der Anpassung materialspezifischer Eigenschaften von Aushub an den gewünschten Baustoff zu einer unökologischen Verwertung führen. Ein alternatives Szenario wäre die klassifizierte Ablagerung des Aushubmaterials mit zugeschalteten Aufbereitungsanlagen, die auf unterschiedliche Materialansprüche ausgelegt sind. Dieses Konzept bedingt jedoch innovative Herangehensweisen in der Materialanalyse von Aushub. Die gegenwärtige Eignungsprüfung von Baulehm besteht aus Prüfmethoden, die hinsichtlich der großmaßstäblichen Aushubverwertung weiterentwickelt werden müssen. Durch die praktische Durchführung der Eignungsprüfung von Baulehm innerhalb dieser Arbeit wird der erforderliche Handlungsbedarf in den Prüfverfahren aufgezeigt. Zur Erfüllung der Kriterien für die Praxistauglichkeit und für eine großmaßstäbliche Umsetzung ist es notwendig, die Forschung und Entwicklung in der Eignungsprüfung von Baulehm stark zu intensivieren.

Die Potenziale von Aushub im Lehmbau zeichnen sich trotz der Herausforderungen für deren Umsetzung deutlich ab. Die Verwertung von Bauaushub wäre nicht nur für die vollständige Nutzung der einzigartigen Möglichkeiten des Lehmbaus entscheidend, sondern darüber hinaus auch einen wertvollen Beitrag zur Förderung einer nachhaltigen Baubranche leisten.

Abstract

Earth as a building material differs from other building materials not only because of its undisputed recyclability, its outstanding sustainability, and its positive properties in terms of building physics. The unique advantage of earth is that it can be obtained as excavated material within a construction project. However, this aspect is insufficiently considered in current earth construction, leaving promising opportunities to transform the construction sector towards sustainability unused.

The current development of an earthen industry offers the opportunity to reevaluate established practices in existing industry sectors. It allows the objective to be extended from an industry for sustainable earth building materials to a truly sustainable industry for earth construction. To achieve this, there is no alternative to holistically incorporating the ecological potential of earth in the industry - starting with the extraction of the raw material: loam or clayey soil (as it is referred scientifically).

In the traditional earthen architecture, the utilisation of excavated earth was a matter of course. Construction methods were specifically adapted to the locally available material and developed accordingly. Today, excavated soil of any kind is categorised as waste. The Austrian law regulates its handling correspondingly: with over 40 million tonnes per year and a rising trend, excavated soil makes up the largest volume in waste management. The majority of this material is deposited in the almost 1.000 landfills for excavated soil in Austria and remains unused in the status of unexplored potential.

The thesis examines various fields of action in the utilisation of excavated material in earth construction. Legal challenges and possible solutions are identified through an analytical review. Current developments

in the processing of raw materials generate new requirements for the evaluation of earth as a building material. Direct utilisation of excavated earth on site is not always the most efficient use of it. Especially when the almost unlimited possibilities of adapting the material-specific properties of excavated earth to the desired building material lead to unecological use. An alternative scenario would be the classified deposition of excavated earth with connected processing plants that are designed for different material requirements. However, this concept requires innovative approaches in the material analysis of excavated earth. The current testing methods used for the suitability of earth for construction purposes need to be further developed with regard to large-scale excavation utilisation. The practical implementation of the testing methods for earth in this thesis demonstrates the need for action in the testing procedures. In order to fulfil the criteria for practical suitability and large scale implementation, it is necessary to intensify research and development in the testing methods for the suitability of earth.

The potential of excavated earth in earth building is clearly emerging despite the challenges involved in implementing it. The utilisation of excavated earth would not only be crucial for fully exploiting the unique possibilities of earth building, but would also make a valuable contribution to promoting a sustainable construction industry.

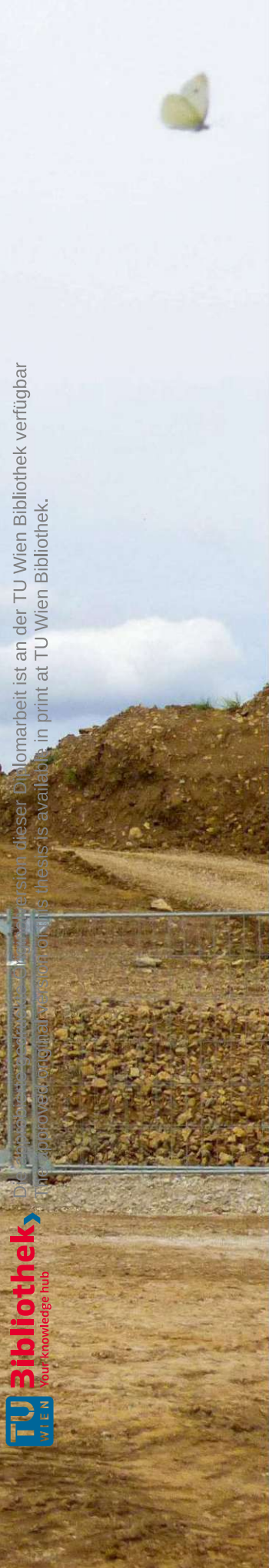
1	Bauen mit Aushub	6
1.1	Einleitung.....	8
1.1.1	Ausgangslage.....	8
1.1.2	Forschungsfrage und Zielsetzung.....	9
1.1.3	Aufbau der Arbeit.....	10
1.2	Tradition Lehmbau.....	11
1.2.1	Lehmbau und Aushub in Österreich.....	11
1.2.2	Historische Verwertung von Aushub.....	14
1.3	Aktuelles Bauen mit Aushub - Referenzprojekte.....	17
1.3.1	Rudolf Steiner-Schule, Wien.....	18
1.3.2	Musterhaus, Mitterretzbach.....	20
1.3.3	Hochregallager von Weleda, Schwäbisch Gmünd.....	22
2	Bodenaushub in Österreich	24
2.1	Gesetzgebung und Regelungen in Österreich.....	26
2.1.1	Übersicht zu den rechtlichen Rahmenbedingungen.....	26
2.1.2	Begrifflichkeiten.....	27
2.2	Aushub als Abfall.....	29
2.2.1	Aushub- und Abfallaufkommen.....	29
2.2.2	Aushubherkunft.....	30
2.2.3	Aushubkategorien und -qualitäten.....	32
2.2.4	Spezifizierung.....	33
2.2.5	Kleinmengenregelung.....	34
2.3	Abfallströme von Aushubmaterialien.....	35
2.4	Deponierte Aushubmaterialien.....	38
2.4.1	Bodenaushubdeponien in Österreich.....	39
2.4.2	Vermischungsverbot.....	40
2.4.3	Finanzielle Aspekte von Bodenaushubdeponien.....	41
2.5	Verwertung von Aushubmaterialien im Bauwesen.....	42
2.5.1	Behandlungsanlagen.....	42
2.5.2	Recycling-Baustoffe.....	43
2.6	Der Weg aus der Abfallwirtschaft?.....	46
2.6.1	Gesetzliche Zielsetzung: Abfallhierarchie.....	46
2.6.2	Aushub als Nebenprodukt.....	47
2.6.3	Potenzielles Abfallende für Aushub.....	48
2.6.4	Aussichten für die Verwendung von Aushub im Bauwesen.....	49
3	Lehm – Vorkommen, Zusammensetzung und Verarbeitung	50
3.1	Lehmvorkommen in Österreich.....	52
3.1.1	Entstehung von Lehm in Österreich.....	52
3.1.2	Lehmvorkommen in Österreich.....	53
3.2	Was ist Lehm?.....	55
3.2.1	Bestandteile.....	55
3.2.2	Vorstellung der wesentlichen Tonminerale.....	59
3.2.3	Lehmarten.....	60
3.3	Lehm im Bau.....	62
3.3.1	Baulehm.....	62
3.3.2	Arten der Aufbereitung.....	63
3.3.3	Lehmstoffe.....	67

4	<i>Eignungsprüfung von Baulehm in der Vorbereitung</i>	70
4.1	Zielsetzung.....	72
4.2	Eignungsprüfung von Baulehm vers. Baustoffprüfung.....	73
4.3	Momentaufnahme zur Eignungsprüfung von Baulehm.....	74
4.3.1	Normen und Richtlinien.....	74
4.3.2	Prüfstellen.....	74
4.3.3	Kosten.....	75
4.3.4	Forschung und Entwicklung.....	75
4.4	Mögliche Ansätze im aktuellen Bauwesen.....	76
4.4.1	Baugrunduntersuchung.....	76
4.4.2	Erstuntersuchung nach DVO 2008.....	78
4.5	Verfahren zur Eignungsprüfung von Baulehm im Überblick.....	79
4.5.1	Feldversuche.....	79
4.5.2	Laborprüfungen.....	81
4.6	Vorgehensweise.....	84
4.6.1	Ziele der Eignungsprüfung von Baulehm.....	84
4.6.2	Gewichtung und Relevanz der Prüfungen.....	86
4.6.3	Ablauf der Eignungsprüfung von Baulehm.....	88
4.7	Probenahme.....	89
4.7.1	Ablauf der Probenahme im Lehmbau.....	89
4.7.2	Zeitpunkt und Ablauf der Probenahme in der Praxis.....	90
4.7.3	Standorte der Probenahme.....	90
4.7.4	Projekte der Probenahme.....	94
5	<i>Eignungsprüfung von Baulehm in der Praxis</i>	102
5.1	Feldversuche – Zusammenfassung.....	105
5.1.1	Theoretischer Hintergrund.....	105
5.1.2	Versuche.....	106
5.1.3	Versuchsdurchführung.....	107
5.1.4	Ergebnisse und Auswertung.....	107
5.1.5	Diskussion zu den Feldversuchen.....	115
5.2	Bestimmung von organischen Bestandteilen (theoretisch).....	116
5.3	Bestimmung des Salzgehalts.....	118
5.3.1	Theoretischer Hintergrund.....	119
5.3.2	Prüfmethodik.....	120
5.3.3	Prüfungsdurchführung.....	123
5.3.4	Ergebnisse und Auswertung.....	124
5.3.5	Diskussion zur Prüfung.....	127
5.3.6	Alternative: Spezifische elektrische Leitfähigkeit.....	128
5.4	Bestimmung des Kalkgehalts.....	130
5.4.1	Theoretischer Hintergrund.....	131
5.4.2	Prüfmethodik.....	133
5.4.3	Prüfungsdurchführung.....	134
5.4.4	Ergebnisse und Auswertung.....	134
5.4.5	Diskussion zur Prüfung.....	136
5.4.6	Alternative: Essigsäure.....	137
5.5	Bindekraftprüfung.....	138
5.5.1	Theoretischer Hintergrund.....	139
5.5.2	Prüfmethodik.....	143
5.5.3	Prüfungsdurchführung.....	147
5.5.4	Ergebnisse und Auswertung.....	155
5.5.5	Diskussion zur Prüfung.....	158

5.6	Korngrößenverteilung.....	162
5.6.1	Theoretischer Hintergrund.....	163
5.6.2	Prüfmethodik.....	172
5.6.3	Prüfungsdurchführung.....	174
5.6.4	Ergebnisse und Auswertung.....	177
5.6.5	Diskussion zur Prüfung.....	182
5.6.6	Alternativen.....	184
5.7	Gesamt- und Tonmineralanalyse.....	192
5.7.1	Theoretischer Hintergrund.....	193
5.7.2	Methodik.....	193
5.7.3	Durchführung.....	196
5.7.4	Ergebnisse und Auswertung.....	200
5.7.5	Bedeutung im Lehmabau.....	207
5.8	Fortführende Prüfungen der Baustoffentwicklung.....	208
5.8.1	Plastizitätsprüfung.....	208
5.8.2	Schwindmaß.....	210
5.8.3	Druckfestigkeitsprüfung.....	211
5.9	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	212
5.9.1	Gesamtheitliche Auswertung der Ergebnisse.....	213
5.9.2	Handlungsempfehlung.....	216
5.9.3	Eigene Erfahrungen und Erkenntnisse.....	217
5.9.4	Ausblick.....	218
6	Conclusio.....	222
7	Anhang.....	230
	Prüfberichte.....	232
	Interviews.....	268
	Literaturverzeichnis.....	284
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	288

This approved/accepted/printed/checked original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
Diese approbierte/geprüfte/gedruckte/überprüfte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.





Die digitale Version dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
This digital version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1. *Bauen mit Aushub*

1.1.1 Ausgangslage

EXPLIKATION

Aushub bezeichnet Material, das beim Ausheben von Boden gewonnen wird. Fällt dieses im Zuge einer Bautätigkeit an, handelt es sich um Baustellenaushub. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf Baustellenaushub als zentrale Untersuchungsthematik. Unter die Begrifflichkeit Aushub fällt auch Material aus Lehmgruben, die ausschließlich zur Generierung von Lehm als Rohstoff angelegt wurden. Dieser erzeugte Aushub findet bereits seinen Verwertungszweck in der Baubranche und ist daher für die Abhandlung der vorliegenden Arbeit nicht relevant. Er wird jedoch zur Vergleichsführung und Analyse bestehender Prozesse und Vorgehensweisen eingebunden.

Der Markt für Lehmbaumstoffe erfährt seit einigen Jahren einen Aufschwung in Europa. Im Vergleich zum konventionellen Baustoffmarkt ist er dennoch immer eine Randerscheinung. Lehmgruben decken den aktuellen Materialbedarf für die Herstellung von Lehmbaumstoffen und könnten diesen auch bei steigender Nachfrage sichern. Es stellt sich daher die Frage, wieso die Verwertung von anfallendem Aushub aus dem Bauwesen im Lehmbau anzustreben ist.

Die Industrialisierung im 19. Jahrhundert führte nicht nur zu einer radikalen Veränderung der Baubranche, sondern wirkt sich nach heutigen Wissensständen drastisch auf Umweltökologie, Ressourcennutzung und Emissionsbelastung aus. Diese globalen Bereiche gewinnen mit der Klimakrise immer mehr an Bedeutung. Neben den massiven CO₂-Emissionen durch einen hohen Energieeinsatz und die Freisetzung von gebundenem Kohlenstoffdioxid, sind die irreversible Verwertung der stark schwindenden Sand-Ressourcen sowie das gewaltige Abfallaufkommen in der Bauwirtschaft die wichtigsten Argumente für den vermehrt geforderten Bauwandel.

„Im Moment haben sich die Ressourcen- und Entsorgungsfrage sowie die Transportkapazitäten noch nicht so dramatisch zugespitzt, dass es wirklich eine

Schlüsselrolle spielt mit Aushub zu bauen. Aber wir sind davon gar nicht mehr so weit entfernt. Uns fehlen nur noch wenige Stellschrauben, wie zum Beispiel finanzielle Anreize oder die ökologische Gesamtbewertung, bis es tatsächlich bei jedem Bauvorhaben ernsthaft geprüft wird.“¹

Christof Ziegert

Die Coronapandemie ab dem Jahr 2020 nahm maßgeblichen Einfluss auf die Bewusstseinsbildung bezüglich der Nachteile eines globalen Baustoffmarktes und der damit verbundenen Materialtransporte. Aspekte wie der Energieeinsatz zur Baustoffherstellung und notwendige Transportwege spielen seit dem Kriegsbeginn zwischen der Ukraine und Russland im Februar 2022 in die Thematik ein. Die Erkenntnis der Abhängigkeit von nicht beeinflussbaren politischen Systemen führte zu einem Erwachen hinsichtlich der bis dahin als selbstverständlich angesehenen Gegebenheiten in der Baustoffindustrie. Die Reaktion darauf äußert sich jedoch eher zurückhaltend und Veränderungen geschehen nur langsam.

„Es wurden viele Umwege gemacht aufgrund von Kapitalismus und Profitgier; Die Optimierung von Prozessen Richtung Kapital und Gewinn; Die Erschaffung einer Aktiengesellschaft, deren Aktionäre befriedigt werden müssen. Wir müssen diesbezüglich wieder ein bisschen zurückgehen.“²

Franz Ottner

Im politischen Sinne wäre Aushub, der im traditionellen Lehmbau Verwertung finden würde, ein „antikapitalistischer“³ Baustoff; er muss nicht käuflich erworben werden, sondern kann ohne Einwirkung einer Industrie gewonnen und verwendet werden. Dieser Sachverhalt scheint die Industrie zur Gegnerin des Lehmbaus zu machen.

Seit der Industrialisierung fand der Lehmbau nur zu Zeiten von Krisen und Notständen Aufmerksamkeit – wenn die Industrie versagte. Damit hat Lehm als Baustoff keine industrielle Entwicklung erfahren, sondern verblieb im Handwerksstatus. Oftmals wird das

Interview, Christof Ziegert
Interview, Franz Ottner
vgl. Dethier, 2019 | S. 298

„traditionelle Handwerk“ im Lehmbau als Rückbesinnung auf die vorindustrielle Zeit gesehen und von einigen Lehmbauvertreter:innen so propagiert. Dieser Umstand trägt dazu bei, dass die Hauptanwendungen des Lehmbaus derzeit in der Sanierung historischer Bauten oder in Projekten südlich des Äquators liegen. Der Einsatz von Lehm in industriell geprägten Regionen der Welt ist damit fast in Vergessenheit geraten. Es bedarf die Integration des Baurohstoffs Lehm in der Industrie und es ist notwendig darauf hinzuweisen, dass die Vorteile der Industrialisierung keineswegs hinter ihren Nachteilen zurückfallen. Aspekte wie Standardisierung, Forschung und Sicherheit durch die erzeugten Baustoffe haben die Baubranche stark vorangetrieben. Dies führte zur kontinuierlichen Verbesserung des allgemeinen Lebensstandards. Die Entwicklungen und Möglichkeiten durch die Industrialisierung äußern sich in beachtlichen technischen Fortschritten im Bauwesen des letzten Jahrhunderts. Eine Baubranche ohne industrielle Produktion ist im heutigen Kontext nicht möglich.

Ein Bauwandel bedeutet demnach nicht die Abschaffung der Baustoffindustrie, sondern eine Umorientierung hin zu einem nachhaltigen Bauwesen. Dabei bedarf es auch dem sinnvollen Einsatz von Baustoffen. Das Ziel besteht nicht darin, konventionelle Baustoffe vom Markt zu verdrängen, sondern einen materialgerechten Umgang mit Baustoffen und eine profitable Synergie zwischen ihnen zu fördern. Das betrifft konventionelle und nachhaltige Materialien gleichermaßen. In diesem Zuge gilt es darauf hinzuweisen, dass das vermehrte Aushubaufkommen bei Bautätigkeiten erst mit der Verwendung von industriellen Baustoffen einherging.

In den letzten Jahrzehnten entstanden Bemühungen für den Ausgleich des industriellen Defizits von Lehmabaustoffen. Sie äußern sich derzeit vor allem durch ein wachsendes Bewusstsein für den Baustoff und erste Ansätze einer Lehmabauindustrie.

Eine nachhaltige Lehmabauindustrie ist jedoch nicht allein durch die Herstellung nachhaltiger Bauprodukte bedingt, sondern durch die volle Ausschöpfung der materialbedingten Potenziale. Dafür ist die Ausrichtung nach den Gegebenheiten der Materialgewinnung notwendig. Eine zentrale Baustoffgewinnung, wie beispielsweise bei der Zementproduktion, hängt von der eingeschränkten Verfügbarkeit der Baurohstoffe und der erforderlichen Infrastruktur für die Ver-

arbeitungsprozesse ab. Lehm ist einer der seltenen Baurohstoffe, die als Nebenerzeugnis innerhalb eines Bauprozesses anfallen, ohne direkte Beabsichtigung der Gewinnung. Diesen Aspekt gilt es bei der Entwicklung einer Lehmabauindustrie zu berücksichtigen und vorteilhaft zu nutzen. Durch die Vermeidung der derzeit doppelten Aushebung von Lehmrohstoffen auf Baustellen und angelegten Lehmgruben können Energieeinsparungen erreicht werden. Zusätzlich würden Transportwege verringert und der Flächenbedarf für separate Lehmgruben sowie die Deponierung von Aushub reduziert werden.

1.1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung

In der Herstellung von Lehmabaustoffen besteht ein großer Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeit, um die verlorenen Jahre durch die Fokussierung auf industrielle Baustoffe aufzuarbeiten. Die aktuellen Techniken der Lehmabauindustrie für eine industrielle Baustoffherstellung bieten bereits neue Möglichkeiten der Lehmabau, die sich vom historischen Lehmabau unterscheiden. Es gibt nicht den einen Lehm, der nur für einen Baustoff geeignet ist. Die Nutzungsmöglichkeiten von Lehm sind deutlich breiter aufgestellt und bietet Raum für weitere Entwicklungen. Daher eignet sich der jetzige Zeitpunkt, um die Entwicklung der Lehmabauindustrie aktiv zu beeinflussen. Es geht darum, die entstehenden industriellen Strukturen der Lehmabauindustrie nachhaltig auszurichten und die gegebenen Vorteile und Potenziale von Lehm zu nutzen, anstatt aktuelle Defizite von weiter fortgeschrittenen Industriezweigen zu übernehmen.

Auch wenn Lehm im Überfluss vorhanden scheint, ist es eine Verpflichtung, verantwortungsbewusst mit dem über Jahrtausende hinweg entstandenen Naturprodukt umzugehen. Der erste Schritt wäre damit getan, Lehm nicht zu Abfall zu deklarieren. Damit ist er nicht nur rechtlich unverwertbar, sondern wird auch materialbedingt für den Lehmabau langfristig unnutzbar gemacht.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Grundlagenuntersuchung der Aushubnutzung im Lehmabau, um deren Potenziale aufzuzeigen. Durch die Analyse aktueller Zustände der Bereiche Lehmabau und Aushubverwertung sollen zielführende Ansätze sowie Problemstellung aufgezeigt werden.

ANMERKUNG

Das anfängliche Konzept der Arbeit der Entwicklung eines „Toolkits“ für die niederschwellige Anwendung von Aushub durch den einfachen „Häuslebauer“ wurde verworfen. Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, Lehm als ernstzunehmenden Baustoff zu behandeln und seinen Platz im Baugeschehen zu festigen. Die suggerierte Einfachheit des Materials entspricht nicht der Realität. Lehm ist ein komplexer Baustoff, den es materialgerecht mit der erforderlichen Intensität zu erforschen gilt.

1.1.3 Aufbau der Arbeit

Die behandelte Thematik ist bisher wenig erforscht und historische Kenntnisse können nur eingeschränkt auf das aktuelle Bauwesen angewendet werden. Daher beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit den Grundlagen einer möglichen Verwertung von Aushub im Lehmbau.

Zu Beginn wird ein historischer Rückblick angeführt. Er hebt hervor, warum die Nutzung von Aushub zum einen eine Selbstverständlichkeit in der Geschichte darstellt, zum anderen jedoch auch eine relativ neuzeitliche Erscheinung ist. Durch Referenzprojekte sollen Ansätze und Möglichkeiten im gegenwärtigen Kontext aufgezeigt werden.

Die Behandlung des rechtlichen Kontextes ist unumgänglich, da dieser aktuell divergente Absichten verfolgt, welche die Verwertung von Aushubmaterial nicht berücksichtigen. Hier müssen Strategien entwickelt werden, welche die Verwertung von Aushubmaterial nicht nur zulassen, sondern diese idealerweise fördern. Nach Erörterung der Problemstellung aus verschiedenen Perspektiven werden potenzielle Herangehensweisen zur Verbesserung des Zustands diskutiert.

Im Anschluss werden theoretische Kenntnisse zu geologischen Gegebenheiten in Österreich behandelt. Das Material Lehm wird bis zur Nanoebene aufgearbeitet, um einen grundlegenden Wissenstand für den Hauptteil der Arbeit zu schaffen. In diesem Zusammenhang werden auch lehmbautechnische Aspekte erörtert.



Abb. 1.01 | Ablagerung von Baustellenaushub

Das Kernstück der Arbeit bildet die praktische Durchführung verschiedener Verfahren aus der Eigenungsprüfung von Baulehm. Diese Verfahren stellen den derzeitigen Stand der Prüfung von Rohmaterial für den Lehmbau dar. Unter Einbezug möglicher Szenarien für die Verwertung von Aushub, werden die Prüfverfahren bezüglich ihrer Praxistauglichkeit, vorhandener Problemstellungen und zielführender Ansätze analysiert. Dafür werden jeweils die Zielstellungen der Prüfungen definiert und der theoretische Hintergrund behandelt. Nach der Beschreibung der entsprechenden Prüfmethodiken folgt die Dokumentation der praktischen Durchführung mit anschließender Darstellung und Auswertung der Prüfergebnisse. Anschließend werden verschiedene Aspekte der jeweiligen Prüfverfahren in einer Diskussion erörtert. Teilweise werden Alternativen aufgeführt, die auf Empfehlungen aus der Fachliteratur basieren oder durch interdisziplinäre Recherche erprobt wurden. Das Kapitel wird mit einer gesamtheitlichen Evaluation der Prüfverfahren und einer exemplarischen Handlungsempfehlung abgeschlossen.

In der Conclusio werden die Erkenntnisse der Arbeit konsolidiert und ein Ausblick für die künftige Nutzung der Potenziale von Aushub im Lehmbau gegeben.

1.2 Tradition Lehm- und Aushubbau

1.2.1 Lehm- und Aushubbau in Österreich

Lehm hat in Österreich eine lange Baugeschichte. Im 19. Jahrhundert waren fast in jeder Ortschaft des Alpenvorlands und den ehemaligen Beckengebieten des Neogens Lehmgruben vorhanden. Heute geben zahlreiche Straßennamen Hinweise auf das Lehmvorkommen.

Ein Beispiel ist der Wiener Stadtbezirk namens Laimgrube, welcher eine ehemalige Vorstadt Wiens war. Er liegt hauptsächlich im 6. Wiener Gemeindebezirk (Mariahilf) und zum kleinen Teil im 7. Wiener Gemeindebezirk (Neubau). Der erste Nachweis für die Namensgebung der Ortschaft lässt sich auf eine Urkunde aus dem Jahr 1291 zurückverfolgen. Grund für die Namensgebung war die Bekanntheit der Lehmgrube, welche zur Ziegelgewinnung herange-

zogen wurde. Durch die Eingemeindung um 1850 in Wien verlor die Ortschaft ihre Namen, jedoch blieben bis heute Hinweise auf die ehemalige Vorstadt bestehen. Ein Teil der heutigen Mariahilfer-Straße hieß um 1830 Laimgrube-Hauptstraße. Die ehemals dort gelegene Laimgrubenkirche (auch St. Josef ob der Laimgrube oder Pfarrkirche Mariahilf-St. Josef) geht namentlich auf die Vorstadt zurück. Sie wurde Anfang des 20. Jahrhunderts versetzt bzw. an anderem Standort neu erbaut, behielt jedoch den Namen bei.⁴ Heute sind noch immer namentlich Spuren der ehemals bauwirtschaftlich genutzten Region zu finden. So gibt es beispielsweise die Laimgrubengasse, die Laimäckergasse und ein Lokal namens Laimgrube.

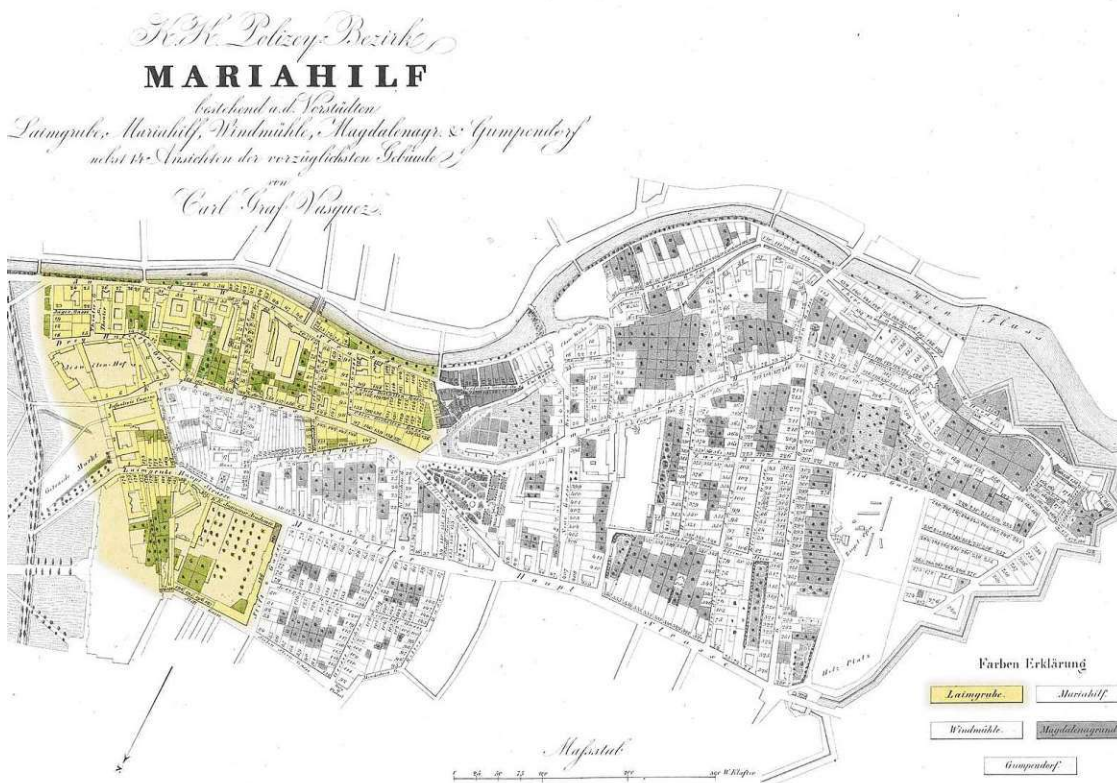


Abb. 1.02 | Karte der Eingemeindung der Laimgrube in Wien um 1830

4 vgl. Stadt Wien: Laimgrube (Vorstadt)

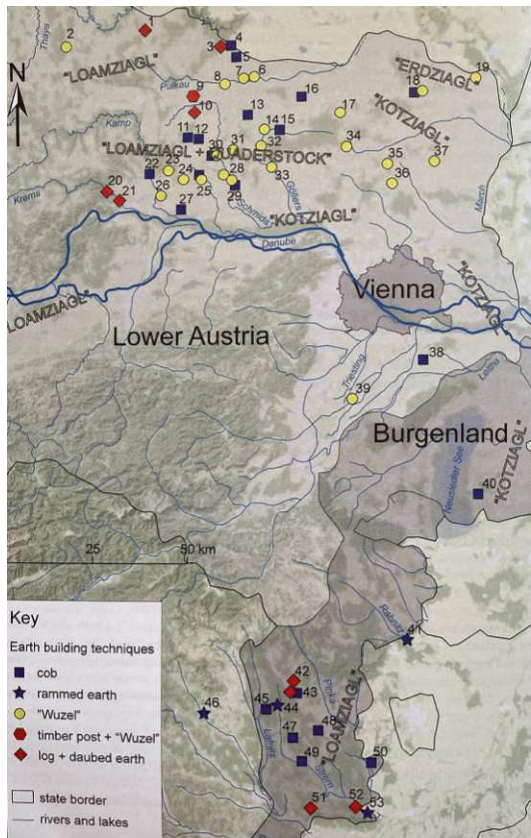


Abb. 1.03 | Lehmbautechniken ausgerichtet auf den lokal verfügbaren Lehm

Historische Lehmbauten sind unter anderem in Niederösterreich und dem Burgenland zu finden. Mineralogische Untersuchungen einiger Bauten durch die Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) konnten einen Zusammenhang zwischen der Qualität von lokal verfügbarem Lehm und den bestehenden Lehmbauweisen nachweisen.⁵ Im Burgenland sind vermehrt Holz-Lehm-Bauweisen zu finden, welche den mageren Lehm vor Ort nutzen. Das Weinviertel weist hingegen lösshaltiges Lehmorkommen auf und damit verbundene Massivbautechniken, wie das g'satze Mauerwerk oder das Wuzelmauerwerk.



Abb. 1.05 | Massivbauweise Weinviertel



Abb. 1.04 | Hybridbauweise Burgenland

Lehmbau war historisch betrachtet immer durch das lokal verfügbare Material bestimmt. Bei den im ländlichen Raum vertretenen Lehmbauten schien die Nutzung von Baugrubenaushub nicht relevant zu sein, da Unterkellerungen recht selten waren und Fundamente oftmals minimalistisch ausfielen oder gar nicht vorhanden waren.⁶ Das Material stammte zumeist aus den bereits erwähnten Lehmgruben der Ortschaften. Im städtischen Kontext wurden bereits geziegelte Gewölbekeller angelegt; bei Großbauprojekten war es nicht unüblich, dass der Aushub vor Ort zu Ziegeln gebrannt wurde.

Die historische Mitschrift einer Besprechung der ersten Ausbauphase der Basteien von Wien im 16. Jahrhundert weist die Nutzung von Aushub für Mauerwerk auf. Der Bauleiter Hermesan Schallautzer (1503 – 1561) und der für die Finanzierung verantwortliche Graf Niklas Salm der Jüngere (1503 – 1550) besprechen die Fortschritte des Festungsbaus und gehen die verfügbaren sowie geplanten Ziegelöfen auf der Baustelle durch. Nach Protokoll waren derzeit sechs Ziegelöfen zeitgleich in Betrieb, vier weitere befanden sich im Bau.

„Sollen Ziegloffen in den Stattgraben zunechst der angefangenen Pasteien aufgerichtet, auch Holz zur Brennung derselben unverzüglich gemaisen (geschlägert) und gefüredt werden.“⁷



Abb. 1.06 | Baubesprechung zum Erbau der Wiener Basteien und strategische Platzierung der Ziegelöfen

Auch eine der bedeutendsten Wiener Sakralbauten entstand zum Teil aus ihrem Aushub:⁸

„Ich denke an die Erbauung der Karlskirche im 17. Jahrhundert. Dort wurde der Aushub gemischt und in Models reingegeben. Die Grünlinge wurden am Karlsplatz getrocknet und daneben war ein Brennofen - Direkt vor Ort am Karlsplatz. Die Karlskirche ist also genau aus dem Material, das man für sie ausgehoben hat, gebaut.“⁹

Franz Ottner

Der Leiter des Wiener Ziegelmuseums, Dr. Gerhard Zsutty, bestätigt die Aushubnutzung im historischen Kontext:

„[...] da man in Wien (südlich der Donau) nach Abräumung der meist nicht sehr mächtigen Oberflächenschichten schnell auf einen zum Ziegeln überaus gut geeigneten marinen Ton stößt, ist es nicht weiter verwunderlich, dass dieser Aushub an Ort und Stelle in Feldöfen oder Luftbränden zu Ziegeln verarbeitet wurde und die Bauten gleichermaßen „aus ihrem eigenen Untergrund emporgewachsen“. Damit konnte man auch längere und kostspielige Transportwege ersparen. Das ist sicher öfters und nicht nur bei so prominenten Bauten wie der Karlskirche geschehen.“⁶

Dr. Gerhard Zsutty |
 Mailaustausch | 29.04.2024

In der Regentschaft der österreichischen Kaiserin Maria Theresia kam es Mitte des 18. Jahrhunderts zu einem zunehmenden Bedarf an Baustoffen. 1750 wurde durch die Kaiserin das Privileg gebrannter Ziegel ausschließlich für Adel, Klerus und Städte aufgehoben, wodurch der gebrannte Ziegel Einzug in das breite Bauwesen erhielt.¹⁰ Allerdings waren diese recht kostenintensiv, weshalb Lehm weiterhin zum Bau verwendet wurde – allerdings vermehrt durch den finanziell schwachen Anteil der Bevölkerung. Dadurch erlangte der Baustoff Lehm das Image als „Baustoff der Armen“. Heute sind diverse Mischmauerwerke zu finden, wo der teure gebrannte Ziegel mit Lehmziegeln kombiniert wurde.



Abb. 1.07 | Gemischtes Mauerwerk

⁷ Historische Schrift aus dem Hofkammerarchiv von 1549
⁸ vgl. Mitchell, 2011 | S. 4 f.
⁹ Interview, Franz Ottner
¹⁰ vgl. Ramml, 2014 | S. 4

Eine Besonderheit bezüglich der Aushubnutzung bilden die österreichischen Kellergassen, welche auf eine lange Tradition in weingeprägten Regionen Österreichs zurückblicken. Kellergassen sind nicht nur ein wichtiger Bestandteil der vernakulären Architektur, sondern auch ein Kulturerbe Österreichs, welches in dieser Form weltweit einzigartig ist. In Niederösterreich gibt es annähernd 1.100 Kellergassen mit ca. 40.000 Objekten, deren Erbauungsdaten zum Teil bis ins 17. Jahrhundert zurückreichen.¹¹ Viele Kellergassen liegen in Hohlwegen der Weinbergregionen, welche durch natürliche Wasserrinnen in der Landschaft entstanden. Die Weinbauer nutzten diese, um entsprechende Lagerungsmöglichkeiten für die Weine zu schaffen. Hierfür wurden höhlenartige Keller zu den Seiten der abgesenkten Hohlwege

in den lehmhaltigen Boden gegraben – eine Art Negativarchitektur. Die Gewölbe wurden zum Teil ausgemauert, wobei auch mauerlose Keller zu finden sind, die durch den Tongehalt im Boden bestehen. Die Vermutung liegt nahe (auch wenn es nicht offiziell bewiesen ist), dass das entstandene Aushubmaterial oftmals im angrenzenden Presshaus baulich verwertet wurde. Presshäuser wurden den Kellern vorgesetzt, wobei sie oftmals um eine Holzpresse für die Verarbeitung der Weintrauben errichtet wurden. Während die erdberührten Wandteile der Presshäuser aus gebrannten Ziegeln bestehen, sind die freistehenden Teile oft aus verschiedenen Lehmbautechniken gefertigt, wie Quaderstock, Wuzelmauerwerk oder g'setztem Mauerwerk.

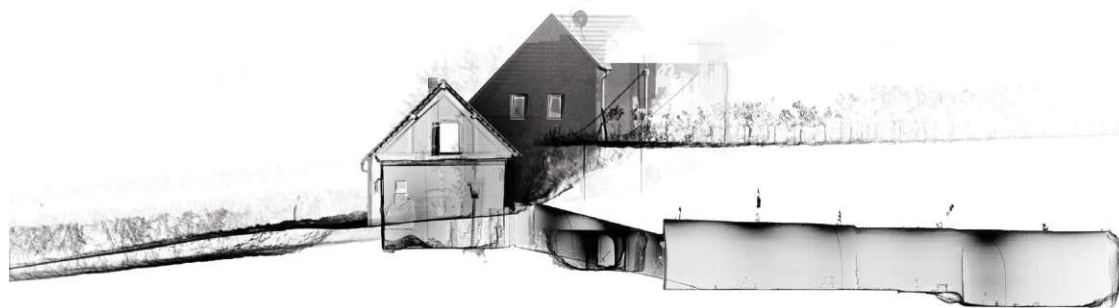


Abb. 1.08 | Laserscan eines Kellers mit dazugehörigem Presshaus

1.2.2 Historische Verwertung von Aushub

Lehm gilt als einer der ältesten Baustoffe der Menschheit und blickt daher auf eine Vielfalt von traditionellen und historischen Lehmbauweisen zurück, die über die ganze Welt verteilt sind. Die Nutzung von lokalem Aushubmaterial war in der Vergangenheit so selbstverständlich, dass dieser Aspekt kaum bis gar nicht dokumentiert ist. Durch die begrenzten Transportmöglichkeiten war die Materialnutzung auf den verfügbaren Lehm limitiert.

Nördlich des Äquators erlitt der Lehmbau mit der radikalen Veränderung des Bauwesens Anfang des 19. Jahrhunderts einen massiven Einbruch; durch die Erfindung von industriell gefertigten Baustoffen wurde der Lehmbau weitestgehend vom Markt verdrängt. Wie eingangs beschrieben ist die Regelmäßigkeit von anfallendem Aushub ebenfalls eine Erscheinung der Industrialisierung, weshalb die Nutzung von Baustellen-aushub im Rückblick bis zu dieser Epoche besonders signifikant ist.

Lehmbau stellt in diesem Teil der Baugeschichte eine Notlösung in Krisensituationen dar, was die Architektur des Ersten und Zweiten Weltkriegs bezeugt. Die Kriege äußerten sich im Bauwesen durch den dringenden Bedarf, eine große Anzahl kriegszerstörter Gebäude schnell wieder aufzubauen. Gleichzeitig waren die industriellen Kapazitäten zur Herstellung von Baustoffen sowie die Infrastruktur für deren Transport ebenfalls stark beschädigt. Lehm fand als Ersatzbaustoff erneuten Einzug in das Bauwesen; im stark beschädigten Deutschland wurde dies vermehrt dokumentiert. Zwischen 1919 und 1924 wurden dort über 20.000 Gebäude in Lehmbauweise errichtet.¹² Adolf Loos warb ebenfalls für die Lehmbauweise und verwies auf die Einbringung traditioneller Baumethoden in die Moderne. *„Selbst wenn sie auf eine jahrhundertalte Tradition zurückblicken, so sind ihre Wahrheiten doch von einer wesentlich stärkeren Bedeutung als manch andere verlogene Versprechung aus der jüngsten Zeit.“*¹³ Auch die oft zitierten Worte des österreichischen Architekten Josef Frank stammen aus dieser Zeit.



Abb. 1.09 | Zweigeschossige Siedlung Mülcheln

Während des Zweiten Weltkriegs kam es in Deutschland zu erheblichen Einschränkungen im Baugeschehen. Der nationalsozialistische Architekt Albert Speer ordnete in seinem Amt als Reichsminister für Rüstung und Kriegsproduktion an, dass Zement und Stahl primär für militärische Zwecke verwendet werden sollten. Als Konsequenz gewann Lehm als Baumaterial im Hochbau an Bedeutung. Diese Entwicklung veranlasste staatlich geförderte Forschungen im Bereich des Lehmbaus, in deren Folge 1951 auch spezifische Lehmbaunormen in Deutschland veröffentlicht wurden.¹⁴ Ab 1953 musste durch Verordnungen des Bodenreform-Bauprogramms jedes Bauvorhaben in Deutschland auf seine Lehmbautauglichkeit geprüft werden. Der Lehmbau erfuhr dadurch in den 50ern seinen vorerst letzten Aufschwung. Ganze Siedlungen wurden unter Verwendung der bevorzugten Stampflehmtechnik in Lehmbauweise errichtet.¹⁵ Es gibt diesbezüglich Hinweise zur direkten Verwertung von Baugrubenaushub vor Ort.

*„Ich habe einen Schriftwechsel von einer Baufirma und der dortigen Baubehörde gelesen, indem es hieß: „Liebe Baubehörde, wir könnten uns auch vorstellen, dreistöckig in Lehmbauweise zu bauen – wir trauen uns das jetzt zu.“ Da hat die Baubehörde geantwortet, dass das gute Neuigkeiten wären, aber der Aushub eines Kellers reiche nur für genau für zwei Geschosse – Also wurden weiterhin zwei Geschossen gebaut. Sie haben das, was sie für die Keller ausgehoben haben im Hochbau eingebracht.“*¹⁶

Christof Ziegert

Mineralogische Untersuchungen von Christof Ziegert ergaben zudem, dass auch bei Wellerlehmbauten in Westdeutschland aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts der Aushub von Keller und Fundamenten verwertet wurde. In den Wänden und dem Boden des Grundstücks waren die gleichen Materialzusammensetzungen nachzuweisen, was Verwertung des Aushubs ohne mineralische Zuschlagstoffe belegt.¹⁷

- 12 vgl. Dethier, 2019 | S. 299
- 13 Dethier, 2019 | S. 299
- 14 vgl. Dethier, 2019 | S. 299
- 15 vgl. Wir!-Bündnis GoLehm: Lehmhaus des Monats, September 2023
- 16 Interview, Christof Ziegert
- 17 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 241

Während der letzten Hochphase des Lehmbaus im 20. Jahrhundert entstanden zudem Lehmbauschulen sowie Beratungsstellen, in welchen private Bauherr:innen ihren Aushub auf die Eignung im Lehmbau prüfen und sich hinsichtlich seiner Verwertung beraten lassen konnten. Jedoch muss es auch damals schon Engpässe in der Beratung gegeben haben, wie aus Schriftwerken des damaligen Lehmbauexperten Richard Niemeyer hervorgeht.

*„Der Verfasser [Richard Niemeyer] hat bis vor kurzem die bei der Lehr- und Beratungsstelle Lehmbau in Posen, Grünberger Straße 9, eingehenden zahlreichen Lehmproben mit Hand und Auge untersucht und jedem Einsender die für die Anwendung seines Lehmes notwendigen Angaben gemacht. Diese, nur auf den praktischen Erfahrungen eines Einzelnen beruhende Methode ließ sich auf die Dauer nicht aufrecht erhalten. Der Verfasser hat daher nunmehr ein einfaches Verfahren entwickelt, das es jedem Fachgenossen ermöglicht, ohne Anwendung lauter Geräte die Untersuchung und Beurteilung der Lehme selbst vorzunehmen.“*¹⁸

Richard Niemeyer

Damals entstanden erste Versuche zur Verbesserung bzw. Erweiterung der Nutzung von Aushub im Lehm-
bau.

Bereits gegen Ende der 1950er Jahre führte die zunehmende Verwendung industrieller Baustoffe zu einem erneuten Rückgang des Lehmbaus. Die bestehenden Strukturen für Forschung und Ausbildung im Bereich des Lehmbaus schwächten sich ab und wenige Architekt:innen setzten die Tradition des Lehmbaus fort.¹⁹ In der Geschichte war die effiziente Nutzung von anfallendem Aushub hauptsächlich durch ökonomische Anreize motiviert. Heute hingegen sind es vorrangig ökologische Überlegungen, die den Einsatz von Lehmbau rechtfertigen.

*„Lehm ist kein Baumaterial, sondern eine Weltanschauung, und seine Zauberkraft wird immer dann beschworen, wenn die Not groß ist.“*²⁰

Josef Frank (1885 – 1967)

1.3 Referenzprojekte

Die Verwendung von Aushubmaterial gewinnt im Lehm- und Tonbau an Bedeutung, da die lokale Nutzung des Materials einen großen Vorteil gegenüber anderen Baumaterialien darstellt. Dies wurde bereits für einige Bauprojekte wiederentdeckt, die ganz unterschiedliche Maßstäbe aufweisen.

Grundsätzlich kann in zwei Vorgehensweisen unterschieden werden; Einige wenige Herstellerfirmen von Lehm- und Tonbaustoffen beziehen Bauaushub aus der Umgebung und verarbeiten diesen in ihren Produktionsstätten. Zusätzlich gibt es Bauprojekte, die ihren Bauaushub in der Gebäudeerstellung direkt vor Ort verwerten.

Die französische Organisation cycle terre nutzt anfallenden Aushub aus Paris zur Herstellung von Lehmziegeln. Der Aushub stammt beispielsweise vom Erweiterungsbau der Metro (Grand Paris Express). Der Produktionsstandort befindet sich in Sevran, ein Vorort von Paris, welcher ein rasantes Wachstum erfährt, sodass die produzierten Ziegel vor Ort Verwendung finden.²¹ Das EU-geförderte Projekt hat sich zum Ziel gesetzt jährlich 8.000 Tonnen Aushubmaterial in der Demonstrationsphase zu verarbeiten. In der Region Île-de-France fallen jährlich 20 bis 35 Mio. Tonnen an, während die Erweiterung des Metrosystems insgesamt allein 43 Mio. Tonnen Aushub zutage bringt.²²

Des Weiteren gibt der Inhaber des Lehm- und Tonbauunternehmens Conluto, Jörg Meyer, an, dass die produzierten Lehm- und Tonbaustoffe der Firma ebenfalls aus Aushubmaterial von umliegenden Baustellen hergestellt werden.

„Wir verarbeiten bei uns im Werk nur Aushub aus Baustellen aus dem näheren Umkreis von 10 bis 15 Kilometern. Das machen wir sowieso schon seit 29 Jahren so. Es geht um Aushub von Großbaustellen, bei denen große Mengen anfallen. Das ist teilweise schon in den Ausschreibungen geregelt. Der Bauherr oder der Architekt kontaktiert uns schon vorab, ob wir etwas gebrauchen könnten und der Bauherr spart sich dadurch die Kosten der Entsorgung.“²³

Jörg Meyer

Weitere bekannte Lehm- und Tonbaustoffproduzenten, wie Lehm Ton Erde und BC Materials, werben ebenfalls mit der Verwertung von Aushub.

Neben der großmaßstäblichen Aushubverwertung gibt es Bauvorhaben, die anfallendes Aushubmaterial in das direkt in das Projekt vor Ort einbeziehen. Im Folgenden werden drei Projekte präsentiert, die unterschiedliche Ansätze zur Verwertung von Aushubmaterial demonstrieren.



Abb. 1.10 | BC Materials, Aufbereitungsanlage

21 vgl. Flassak, Interview mit Silvia Devescovi (Cycle Terre)

22 mehr dazu s. cycle terre | <https://www.cycle-terre.eu/cycle-terre/le-projet/> [21.04.2024]

23 Interview, Jörg Meyer

1.3.1 Rudolf Steiner-Schule, Wien

Projekt	Erweiterungsbau (Neubau an Bestandsbau)
Standort	Wien, Mauerbach
AuftraggeberIn	Rudolf Steiner-Schule, Wien-Mauerbach
Architektur	ARGE ANDIBREUSS und Dietrich Untertrifaller Architekten ZT GmbH
LehmbauexpertIn	Andi Breuss
Ausführende Lehmbaufirma	pro Lehm Frauwallner GmbH & Co KG
Bauzeit	2022 – 2024
Anfallender Aushub	ca. 5.000 m ³
Verwertung	Oberputz

Bei dem Projekt handelt es sich um einen Erweiterungsbau der Waldorfschule Rudolf Steiner-Schule mit Kindergarten und Hort im 23. Wiener Gemeindebezirk. Der Neubau grenzt unmittelbar an ein historisches Bestandsgebäude und inkludiert eine Turnhalle, eine Mensa mit Speisesaal, diverse Klassen- und Funktionsräume sowie Räumlichkeiten für den Hort.

Das Ziel der Schule, vorrangig ökologische Baustoffe einzusetzen, resultierte in einer nachhaltigen Bauweise, weshalb der Neubau in Holzbauweise ausgeführt wurde. Die Turnhalle ist in den Boden eingelassen, so dass im Zuge der Aushebung für den Neubau ca. 5.000 m² Material anfielen. Auf Anraten des Lehmbauexperten Andi Breuss wurde ein Teil des Aushubs vom Baugrundstück speziell für den Oberputz im Innenausbau verwendet, wobei Lehm- bauplatten sowie Unterputz die Grundlage bilden.²⁴ Andi Breuss prüfte das Aushubmaterial vorab auf dessen Eignung im Lehm- bau und entwickelte daraus eine Rezeptur für den Lehmputz. Der Aushub

wurde der österreichischen Lehmbaufirma proLehm Frauwallner GmbH & Co KG zugeführt, welche den erdfuchten Lehm durch Siebung aufbereitete. Der resultierende Ausgangsstoff des Lehmputzes mit einer maximalen Korngröße von 2 mm wurde auf der Baustelle nach Rezeptur mit Sand vermischt und angebracht. Die begrenzten Möglichkeiten der Aufbereitung und dem damit bedingten Transport des Materials sind auf die bisher einmalige Durchführung dieses Vorhabens zurückzuführen. Zugleich gilt es hervorzuheben, dass diese Vorgehensweise realistische Ansätze bezüglich Zwischenlagerungs- und Aufbereitungsflächen von Projekten im urbanen Kontext abbildet. Zudem entstand der Vorteil, dass der Rückstand der Siebung als Stampflehm in einem anderen Projekt verwendet werden kann.

Das Referenzprojekt ist ein einzigartiges Beispiel für den niederschweligen Zugang zur Verwertung von Aushub. Das Resultat präsentiert sich nicht nur durch ein ästhetisches Raumbild, sondern wirkt sich auch spürbar positiv auf Raumklima und Akustik aus.



Abb. 1.11 | Lehmputz

²⁴ vgl. Rudolf-Steiner-Schule Wien-Mauer: Aktuelles vom Bauplatz auf 113 | vgl. Dietrich-Untertrifaller: Rudolf Steiner-Schule, Wien (AT)

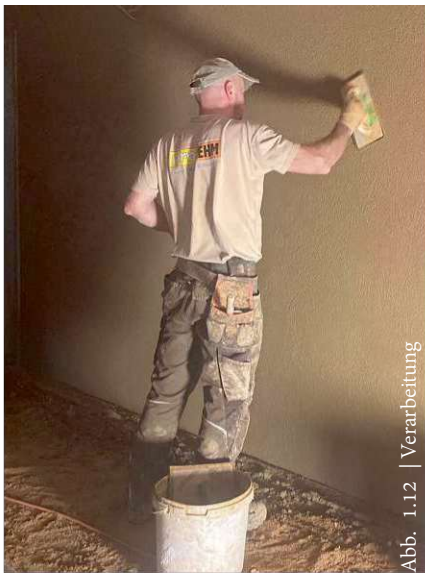


Abb. 1.12 | Verarbeitung



Abb. 1.13 | Baugrube



Abb. 1.14 | Mensa in Bauausführung



Abb. 1.15 | Siebung des Aushubs



Abb. 1.16 | Materialbild



Abb. 1.17 | Siebrückensand

1.3.2 Musterhaus, Mitterretzbach

Projekt	Neubau Musterhaus (Forschungsprojekt)
Standort	Mitterretzbach
Architektur / Lehm- bau / Ausführung	ANDIBREUSS
Bauzeit	2023 – 2024
Anfallender Aushub	50 m ³ (ca. 30 m ³ in Verwendung)
Verwertung	Wandschichten, Lehmestrich, Lehmschlämme, Lehmputz

Der Lehm- bau- experte Andi Breuss errichtet aktuell ein Forschungsmusterhaus aus einem von ihm entwickelten Holz- Lehm- Verbundsystem. Dieses innovative System kombiniert die beiden ökologischen Baumaterialien Holz und Lehm. Das Gebäude umfasst vier Wohneinheiten, die durch ein flexibles Raumkonzept auch zu zwei größeren Einheiten zusammengelegt werden können.

Der Standort in der niederösterreichischen Ortschaft Mitterretzbach weist einen lehmhaltigen Boden auf und bildet die Grundlage für verschiedenste Lehm- baustoffe. Gewonnen wird das verwendete Aushubmaterial aus einer angelegten Lehmgrube auf dem Grundstück. Der Lehm wurde zur Aufbereitung ausgewintert, weshalb das Material keinen weiteren energieaufwändigen Prozessen vor der Mischung unterzogen werden muss.

Der tragende Holzrahmenbau ist mit Wandschichten aus Lehm in zweierlei Ausführung umgesetzt.

Die Innenwandschicht setzt sich aus Lehm, Sand und Kies zusammen und bringt somit die benötigte Speichermasse in den Holzrahmenbau. In dieser Schicht sind zudem Flächenheizungen und Elektrik verlegt. Die äußere Lehmschicht ähnelt einer Leichtlehm- mischung mit Holzschnitzel und dient vorrangig als Dämmebene. Durch eine schlammartige Lehmschicht im Wandaufbau ist zudem eine winddichte Ebene geschaffen. Zusätzlich wird der Lehm im Bodenaufbau als Lehmestrich sowie als Lehmputz im Innen- und Außenbereich verwendet.

Andi Breuss entwickelt im Zuge des Projekts nicht nur verschiedenste Lehmmischungen, welche die vielfältigen Einsatzbereiche von Lehm zeigen, sondern beschäftigt sich auch mit innovativen Fertigungsprozessen. Diese sollen das System für das großmaßstäbliche Bauen anwendbar machen. Das Musterhaus stellt ein Pionierprojekt für die Verwendung von Aushub im Lehm- bau dar.



Abb. 1.18 | Ausgewintertes Baulehm



Abb. 1.23 | Zwangsmischer für die Lehmischung



Abb. 1.21 | Einbringung der Lehmschicht



Abb. 1.19 | Wandschicht aus Lehm



Abb. 1.20 | Aufgestellte Wandsysteme



Abb. 1.22 | Abziehen der Lehmoberfläche



Abb. 1.24 | Lehmgrube vor Ort

1.3.3 Weleda-Lagerhalle, Schwäbisch Gmünd

Projekt	Neubau Logistikzentrum, Hochregallager
Standort	Schwäbisch Gmünd (Deutschland)
AuftraggeberIn	Weleda
Architektur	Michelgroup GmbH
Tragwerksplanung (Lehmbau)	Christof Ziegert, ZRS Ingenieure GmbH
LehmbauexpertIn	Christof Ziegert (ZRS), Jörg Meyer (Conluto)
Ausführende Lehmbaufirma	Conluto® – Vielfalt aus Lehm
Bauzeit:	2021 - 2024
Anfallender Aushub	18.000 m ³ (nur Hochregallager)
Verwertung	3.000 m ³ im Stampflehmbau und Lehmputz, 15.000 m ³ für Geländemodellierung

Die Produktionsfirma für Naturkosmetik legt großen Wert auf eine ökologische Bauweise, was in der Materialwahl der Baustoffe für das neue Logistikzentrum in Schwäbisch Gmünd deutlich wird. Insgesamt entstehen an dem Standort drei Gebäude, darunter ein Hochregallager mit Abmessungen 82 auf 38 m.

Für das Hochregallager wurden 18.000 m³ Bodenmaterial ausgehoben; 3.000 m³ fanden Verwendung im Gebäude, während der Rest der Geländemodellierung auf dem Grundstück zugeführt wird. Der Einsatz von Stampflehmwänden im Hochregallager geht auf die Reduktion der Gebäudetechnik zurück. Das vollautomatisierte Regalsystem besteht hauptsächlich aus Holz, während die umherfahrenden Greifer in den schmalen Gängen für Luftzirkulation sorgen. Die diffusionsoffenen Stampflehmwände sollen in Kombination dazu die Luftfeuchtigkeit und das Raumklima regulieren.²⁵ Die tragenden Stampflehmwände sind insgesamt 8 m hoch und grenzen vertikal an die anschließende Holzfassade. Der Lehmbauexperte Christof Ziegert fertigte die Tragwerksplanung für die Stampflehmwände an. Er entwickelte erste

Rezepturen, an welchen das Material auf dessen Verwendung als tragender Stampflehm geprüft wurde. Die finale Rezeptur für den Baustoff legte der Inhaber der Firma Conluto, Jörg Meyer, fest und entwickelte eine Mischmaschine eigens für das Bauprojekt. Sie besteht aus zwei Kammern, in welche jeweils Lehm und Gestein eingefüllt und anschließend vermisch wurden. Danach wurde der Mischung noch ein wenig Wasser zugeführt. Während des Baubetriebs wurde die Lehmmischung zudem alle 50 m³ einer Qualitätskontrolle durch Überprüfung der Druckfestigkeit unterzogen. Für die Kontrolle des richtigen Wassergehalts wurde die Kugelfallprobe angewendet. Das Material wurde wannenweise in Schichten von 10 bis 12 cm eingebracht und mit Elektrostampfern verdichtet.²⁶

Die Dimension des Bauprojekts sowie die Ausführung vor Ort sind im Bau des Hochregallagers derzeit einzigartig. Die Voraussetzungen für den Lehmbau waren nicht nur durch den lehmhaltigen Boden, sondern auch durch die zur Verfügung stehende Fläche gegeben. Das Projekt weist viele Ansätze für das Bauen vor Ort im großen Maßstab auf und macht dessen Vorteile sichtbar.



Abb. 1.25 | Baustellenaushub zur Geländemodellierung

vgl. Michelgroup: Logistikzentrum Weleda | vgl. Weleda: Europas größte Lehmabstufung der Weleda Logistik-Campus vgl. Interview, Christof Ziegert | vgl. Interview, Jörg Meyer



Abb. 1.29 | Stampfen



Abb. 1.27 | Materialeinbringung



Abb. 1.26 | Materiallage (Combit)



Abb. 1.28 | Fertige Lagerhalle



Abb. 1.30 | Rohbau

Die approbierte deutsche Originalversion dieser Publikation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.





Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek

2. Momentaufnahme: Bodenaushub in Österreich

2.1 Gesetzgebung und Regelungen in Österreich

2.1.1 Übersicht zu den rechtlichen Rahmenbedingungen

Die rechtlichen Rahmenbedingungen haben einen großen Einfluss auf den Umgang mit Aushub, weshalb nachfolgende Rechtsschriften im weiteren Verlauf der wissenschaftlichen Arbeit herangezogen werden, um aktuelle Handhabungen und Entwicklungen zu erläutern. Alle Rechtsschriften haben zur Grundlage, dass Aushub aus gesetzlicher Sicht Abfall ist und bei dessen Anfall die Entsorgungspflicht besteht.

Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates (2008) über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

Die Abfallrichtlinie schafft landesübergreifend Rahmenbedingungen zur Abfallvermeidung, Umweltschutz und Ressourcenschonung.¹ Mitgliedstaaten sind dazu aufgefordert die Richtlinie in ihre nationalen Gesetzgebungen einzubinden, wie es auch in Österreich im AWG der Fall ist. Auf nationaler Ebene gibt es geringfügige Abweichungen von der EU-Richtlinie, wobei die festgelegte Abfallhierarchie, welche die Grundlage für die Abfallwirtschaft bildet, zur Gänze übereinstimmt.

Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002)

Das Abfallwirtschaftsgesetz entstand im Jahr 2002 und legt den Umgang mit Abfall jeglicher Art fest. Es inkludiert damit auch anfallenden Aushub mit einigen wenigen Ausnahmen. Gemäß Inhalt orientiert sich die Gesetzgebung dabei an dem Vorsorgeprinzip und der Nachhaltigkeit.²

Deponieverordnung 2008 (DVO 2008)

Infolgedessen ist die Deponieverordnung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BML) rechtsgebend für den Verbleib von Aushub. Ziel der Verordnung ist die Vermeidung der Umweltverschmutzung durch die Lagerung von Abfällen sowie die Schaffung eines Konsenses von Abfall- und Kreislaufwirtschaft.³

Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 (BAWP)

Das Abfallwirtschaftsgesetz sieht vor, dass alle sechs Jahre ein Bundes-Abfallwirtschaftsplan vom Bundesminister für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie erstellt wird.⁴ Der letzte BAWP wurde im Januar 2023 veröffentlicht. Grundsätzlich dient der BAWP zur Überprüfung der Umsetzung des AWGs und beinhaltet neben informativen Daten und Fakten zur österreichischen Abfallwirtschaft auch gegenwärtige Strategien, Programme und Maßnahmen. Eine rechtliche Bindung ist durch den BAWP nicht gegeben.⁵ Darüber hinaus umfasst der BAWP das Abfallvermeidungsprogramm (AVP, Teil 3 des BAWP), welches der steigenden Tendenzen des Abfallaufkommens durch das Wirtschaftswachstum entgegenwirken soll. Als Grund werden die Umweltauswirkungen der Abfallwirtschaft aufgeführt, wobei die Thematik Aushub im AVP kaum behandelt wird.⁶

Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2023

Auch die Dokumentation und statistische Aufarbeitung des aktuellen Geschehens der österreichischen Abfallwirtschaft ist im AWG geregelt und findet alle zwei Jahre in Form eines Statusberichtes statt. Der letzte Statusbericht wurde 2023 mit dem Bezugsjahr 2021 vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) veröffentlicht.

Abfallnachweisverordnung 2012 (AVN)

Die Abfallnachweisverordnung aus dem Jahr 2012 bestimmt die Dokumentation, Meldung und Nachweisführung über den Verbleib von Abfällen. Sie hat zum Ziel eine umweltgerechte Beseitigung oder Verwertung dieser zu gewährleisten.⁷

¹ vgl. Richtlinie 2008/98/EG | Kapitel 1, Artikel 1
vgl. AWG 2002 | §1 Abs. 1
vgl. DVO 2008 | §1 Abs. 1 und Abs. 2
vgl. AWG 2002 | §8 Abs. 1
vgl. BKM, BAWP 2023, Teil 1 | S. 13
vgl. AWG 2002 | §9a
vgl. AVN | §1



Abb. 2.01 | Österreich unterliegt dem Stufenaufbau der Rechtsordnung

Abfallverzeichnisverordnung 2020 (AVO)

Die Abfallverzeichnisverordnung beinhaltet das Abfallverzeichnis, welches auf dem EDM-Portal (Elektronisches Datenmanagement) regelmäßig aktualisiert wird und öffentlich einsehbar ist. Darin sind alle Abfallarten mit Abfallbezeichnung, Schlüsselnummer, Spezifizierung sowie der Global Trade Item Number (GTIN) aufgeführt.⁸

Abfallbilanzverordnung 2020

Die Abfallbilanzverordnung regelt seit dem Jahr 2020 die Verpflichtung zur jährlichen Meldung der Abfallströme. Ziel ist die bundesweite Vereinheitlichung dieser und die Verbesserung der Datenerfassung mit dem Hintergrund der EU-Berichtspflichten.⁹

2.1.2 Begrifflichkeiten

Um das Potenzial von Aushub in Österreich zu analysieren, ist es maßgeblich die grundlegenden Voraussetzungen auf nationaler Ebene zu analysieren. Hierfür ist es notwendig gewisse Begrifflichkeiten zu erläutern und in den gesetzlichen Kontext zu setzen.

Definition ‚Aushubmaterial‘

Gemäß der Definition der DVO bezeichnet Aushubmaterial im Allgemeinen Material jeglicher Art, welches aus dem Boden ausgehoben wird.

‚Aushubmaterial ist Material, welches durch Ausheben oder Abräumen des Bodens oder des Untergrundes anfällt.‘¹⁰

Im BAWP ist die Zusammensetzung von Aushubmaterialien beschrieben und führt ‚Kies, Sand, Lehm, Steine, etc.‘¹¹ als Hauptbestandteile auf. Zudem werden weitere variable Bestandteile aufgeführt, wie humose Komponenten und bodenfremde Materialien, welche beispielsweise durch Untergrundverfüllungen vergangener Baumaßnahmen in den Boden gelangten.

Definition ‚Bodenaushubmaterial‘

Da sich die wissenschaftliche Arbeit auf lehmhaltigen Aushub bezieht, muss die Begrifflichkeit im rechtlichen Rahmen spezifiziert werden. In der DVO ist diese als Bodenaushubmaterial definiert, welches sich auf Aushub von natürlichem Boden beschränkt.

‚Bodenaushubmaterial ist Material, das durch Ausheben oder Abräumen von im Wesentlichen natürlich gewachsenem Boden oder Untergrund – auch nach Umlagerung – anfällt.‘¹²

Die Zusammensetzung des Bodenaushubmaterials ist von zentraler Bedeutung. Der Grenzwert von bodenfremden Materialien ist in der DVO in Volumsprozent festgelegt und umfasst mineralische sowie organische Bestandteile.

8 ebd.

9 ebd.

10 DVO 2008 | §3 Abs. 5

11 BKM, BAWP 2023, Teil 1 | S. 253

12 DVO 2008 | §3 Abs. 9

*„Der Anteil an mineralischen bodenfremden Bestandteilen [...] darf dabei nicht mehr als fünf Volumsprozent betragen, der Anteil an organischen bodenfremden Bestandteilen [...] darf insgesamt nicht mehr als ein Volumsprozent betragen; [...]“*¹³

Damit trifft die Definition von Bodenaushub auch auf lehmhaltige Böden zu, welche für den Lehmabbau herangezogen werden könnten.

Definition ‚Abfall‘

Das AWG definiert Abfälle als Sachen, die von Personen zur Entsorgung freigegeben oder im Interesse der Öffentlichkeit weiteren Beseitigungs- und Verwertungsprozessen unterzogen werden. Der BAWP unterscheidet zudem nach den genannten zwei Ursachen:

Der subjektive Abfallbegriff bezeichnet Abfälle, welche durch die Entledigungsabsicht des/der Abfallbesitzer:in entstehen.¹⁴ Gemäß AWG sind dies:

*„Abfälle im Sinne dieses Bundesgesetzes sind bewegliche Sachen, [...] deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat [...]“*¹⁵

Der objektive Abfallbegriff gilt für Sachen, deren Entledigung für Umwelt und Gesellschaft notwendig sind und oftmals gefährliche Abfälle inkludieren.¹⁶ Die betrifft gemäß AWG:

*„Abfälle im Sinne dieses Bundesgesetzes sind bewegliche Sachen deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen.“*¹⁷

Aushub erfährt zumeist die Entledigungsabsicht des/der Abfallbesitzer:in, wodurch dieser offiziell zu Abfall wird und demnach der gesetzlich geregelten Entsorgungspflicht unterliegt. Bei der baulichen Verwendung von nicht verunreinigtem Aushub vor Ort, greift eine Ausnahmeregelung, wodurch das Material nicht in die Kategorie Abfall fällt.

*„Keine Abfälle im Sinne dieses Bundesgesetzes sind [...] nicht kontaminierte Böden [...], die [...] in ihrem natürlichen Zustand an dem Ort, an dem sie ausgehoben wurden, für Bauzwecke verwendet werden.“*¹⁸

Damit sind für das entsprechende Aushubmaterial sämtliche Vorschriften der Abfallwirtschaft nichtig und es ist als Baumaterial einsetzbar. Sobald der Bodenaushub jedoch bewegt wird, ändert sich dessen Dasein existenziell, denn ab diesem Zeitpunkt ist er aus gesetzlicher Sicht Abfall.

An der Abfallwirtschaft beteiligte Personen

Die Gesetzgebung definiert verschiedene Personengruppen innerhalb der Abfallwirtschaft: Die Abfallerzeuger:innen stellen die Quelle des Abfallaufkommens dar, während die Abfallbesitzer:innen die Personengruppe beschreibt, welche aktuell im Besitz des Abfalls und damit dafür verantwortlich ist. Darüber hinaus gibt es Abfallsammler:innen, welche Abfälle von den bereits aufgeführten Personen übernehmen. Abfallbehandler:innen betreiben wiederum Anlagen für die Abfallverwertung oder -beseitigung.¹⁹

Earth is never lost, and is never waste.

BC Materials²⁰

2.2 Aushub als Abfall

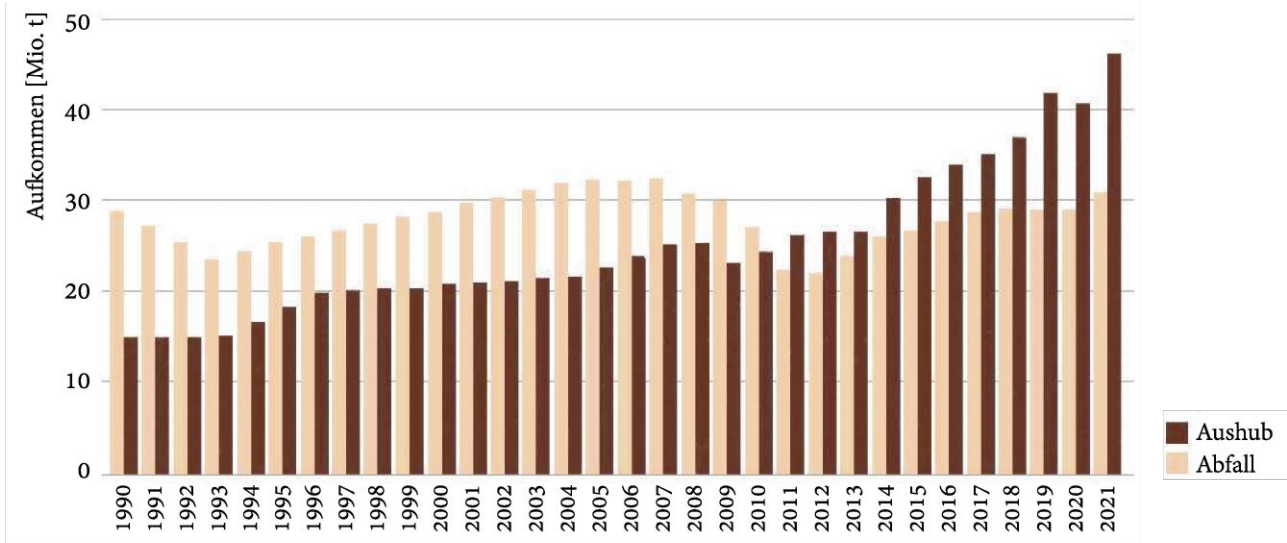


Abb. 2.02 | Abfallaufkommen von 1990 bis 2021

2.2.1 Aushub- und Abfallaufkommen

Das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) regelt die Aufzeichnung der Abfallströme durch Abfallsammler:innen und -behandler:innen.²¹ Diese werden an das Elektronische Datenmanagement (EDM) übermittelt, wodurch sich die Dokumentation von Herkunft, Art und Menge von Aushub sowie dessen Verbleib in den letzten Jahrzehnten verbessert hat.

Der Statusbericht 2023 gibt Einblicke in die aktuelle Situation des Abfallaufkommens sowie dessen Verbleib in Österreich und setzt die Aspekte jeweils in zeitlichen Kontext. Der Bericht verdeutlicht die Sonderstellung von Aushub in der Abfallwirtschaft. Er macht den Hauptteil des gesamten österreichischen Abfallaufkommens aus und stellt in der Dokumentation stets eine gesonderte Kategorie dar. Rückblickend auf den zeitlichen Verlauf des Abfallaufkommens ab dem Jahr 1990 sind zwei gegensätzliche Entwicklungen von Aushub und dem herkömmlichen Abfall zu beobachten (siehe Abb. 2.02).

Das Abfallaufkommen exklusive der Aushubmaterialien bewegt sich in einem Schwankungsbereich von ca. 10 Mio. Tonnen, was ungefähr einem Drittel seiner

Masse entspricht. In dem betrachteten Zeitraum sind Steigungen als auch Rückgänge zu verzeichnen. Dies ist auf historische Ereignisse, wie die Wirtschaftskrise in den Jahren 2008/2009, und die Anpassung der Definition von Abfall im Jahr 2011 zurückzuführen.²² Im Gegensatz dazu zeigt das Aufkommen von Aushubmaterialien seit 1990 eine kontinuierlich steigende Tendenz mit Ausnahme von dem pandemiegeprägten Jahr 2020. Während Aushub 1990 nur ein Drittel des gesamten Abfallvorkommens ausmacht, stellt er im Jahr 2021 knapp 60 Prozent dessen dar (siehe Abb. 2.03). Das wiederum entspricht ungefähr der dreifachen Menge des Aushubmaterials im Jahr 1990 und erreicht damit einen Rekordwert von ca. 46 Mio. Tonnen. Insgesamt sind das rund 4 Mio. Tonnen mehr als im zuvor mengenreichsten Jahr 2019.²³

Im Zeitraum von 2015 bis 2021 verzeichnen die Aushubmaterialien eine Steigerung von 41 Prozent, was zusätzlichen 13,4 Mio. Tonnen entspricht. Die im Statusbericht 2021 angeführten Gründe für die steigenden Zahlen bis zum Jahr 2019 sind Großbauprojekte sowie verbesserte Mittel zur statistischen

²¹ vgl. AWG 2002 | § 21 Abs. 1

²² vgl. BKM, Statusbericht 2023 | S. 12

²³ vgl. BKM, Statusbericht 2023 | S. 19

Aushubmaterialien
 Bau- / Abbruchabfälle
 Sonstige Abfälle

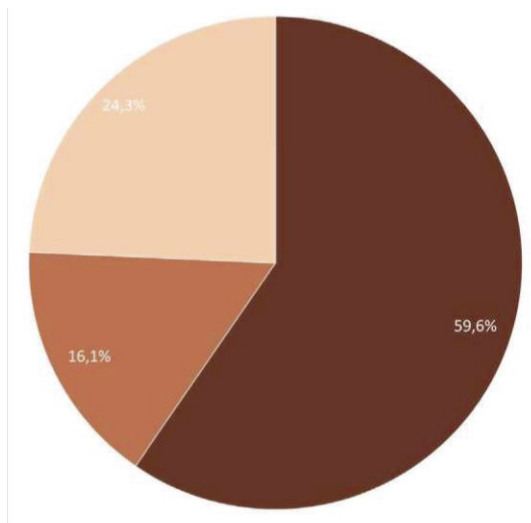


Abb. 2.03 | Abfallgruppen im Jahr 2021

Erfassung der Daten.²⁴ Aufgrund der Covid19 Pandemie und den damit verbundenen Einbruch von Bauaktivitäten ging im Jahr 2020 das Aufkommen von Aushub zurück, um im Folgejahr 2021 um 14 Prozent zu steigen. Der hierfür aufgeführte Grund ist die Wiederaufnahme der Tätigkeiten der Baubranche.²⁵ Vergleicht man die Höchstwerte von den Jahren 2019 (pre-Covid19) und 2021 ist dennoch eine Steigerung von 10% zu verzeichnen.

Basierend auf der Abfallrichtlinie der EU prognostizieren Abschätzungen für das Jahr 2026 ein Wachstum von knapp 7 Prozent für Aushubmaterialien in Vergleich zum Jahr 2019. Anlass für die Annahme sind das stetig ansteigende Aufkommen in der österreichischen Historie sowie der wachsende Bevölkerungsstand.²⁶

2.2.2 Aushubherkunft

Die Herkunft der Aushubmaterialien ist statistisch nicht erfasst, jedoch hat das Bundesumweltamt im Jahr 2016 einen Report über Aushubmaterialien veröffentlicht, in dem unter anderem diese Thematik dargelegt wird. Basierend auf Bautätigkeiten

der vorangehenden Jahre erstellt die Studie Mengenabschätzungen für das Aushubaufkommen von verschiedenen Bautypen. Parameter wie verbaute Fläche, Fundamenttiefe und Gebäudegröße spielen in die Schätzungen mit ein.

Aushubaufkommen
 Abweichung
 Aushubaufkommen
 Abweichung
 Abfallaufkommen
 Abweichung
 Abfallaufkommen

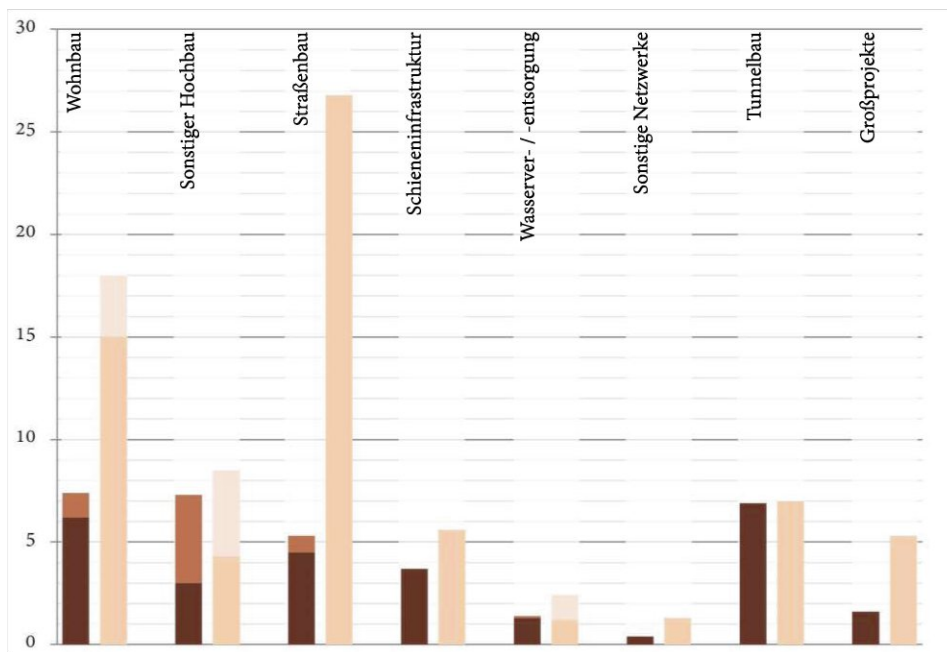


Abb. 2.04 | Herkunft von Aushub (Mengenabschätzung)

Straßenbau

Gemäß der Studie fällt im Straßenbau mengenmäßig der meiste Aushub an. Die Wiedereinbaurrate liegt hierbei zwischen 60 und 90 Prozent, wodurch im Straßenbau auch mit Abstand das meiste Material wieder eingebaut wird. Ein Grund dafür könnten beispielsweise Angleichungen der topografischen Gegebenheiten in Form von Verfüllungen sein, wodurch nur ein kleiner Teil des Aushubs als Abfall entsorgt wird.

Die Wiedereinbaurrate wird positiv im Aushubvorkommen angeführt. Im Report wird angegeben, dass „Ein großer Teil des Bodenaushubs [...] vor Ort wieder eingebaut“²⁷ wird, was im Fall des Straßenbaus wohl zutreffend ist.

Wohnbau

Gemäß den Mengenabschätzungen des Bundesumweltamts sind Wohnbauten die zweite Hauptquelle für das Aushubaufkommen, wobei auch hier über die Hälfte dessen innerhalb des Baus wieder eingebaut wird. Nur 40 Prozent des anfallenden Aushubs werden demnach zu Abfall, was durch den Prozess der Bauerstellung erklärbar wäre. Die Baugrube für Fundamente und Kellergeschosse fällt in Vergleich auf das Bauvolumen immer größer aus und daher wird ein großer Teil der Fläche nach Baufertigstellung wieder verfüllt. Die Voraussetzung ist geeignetes Aushubmaterial, welches in den meisten Fällen vorhanden ist oder durch Zumischen von Gesteinskörnung hergestellt werden kann.

Zur Unterstreichung dieser Vermutung folgt ein rechnerisches Beispiel:

Der Großteil der fertiggestellten Neubauten im Jahr 2021 waren Wohnbauten mit ein bis zwei Wohnungen. Die durchschnittliche Wohnfläche von Einfamilienhäusern beträgt in Österreich 144,7 Quadratmeter²⁸. Vereinfacht kann von einer Grundfläche von 150 Quadratmetern und daraus resultierenden Gebäudemmaßen von 10 auf 15 Metern ausgegangen werden. Die angenommene Tiefe wird wie in der Studie des Bundesumweltamtes bei 3 Meter festgelegt. Der Böschungswinkel wird für nicht bindigen (Beispiel 1) und bindigen Boden (Beispiel 2) berechnet:

Eckdaten für Beispiel 1 (nicht bindiger Boden):

- 0,6 m Arbeitsbereich in der Baugrube
- Böschungswinkel: 45°
- Aushubgewicht (durchschnittliche Annahme): 1,6 t / m³

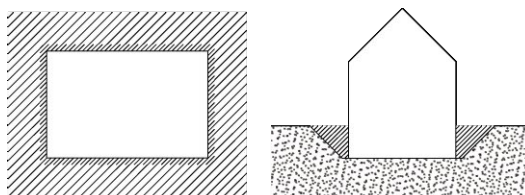


Abb. 2.05 | Beispiel 1

Die Verfüllung liegt bei 47 Prozent des anfallenden Aushubes.

Eckdaten für Beispiel 2 (bindiger Boden):

- 0,6 m Arbeitsbereich in der Baugrube
- Böschungswinkel: 60°
- Aushubgewicht (durchschnittliche Annahme): 1,8 t / m³

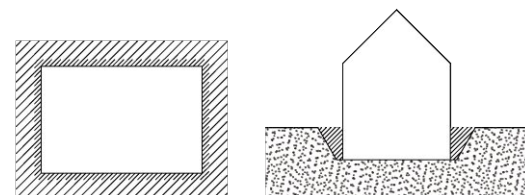


Abb. 2.06 | Beispiel 2

Die Verfüllung liegt bei 36 Prozent des anfallenden Aushubes.

Demnach wird bei Einfamilienhäusern ein Drittel bis zu knapp die Hälfte des entstandenen Aushubs für die Verfüllung der Baugrube herangezogen, womit sich die Wiedereinbaurrate sich im Bereich der Wohngebäude hauptsächlich auf Untergrundverfüllungen bezieht und nicht auf die Verwertung im Hochbau.

Bei größeren Wohnbauprojekten ist die Wiedereinbaurrate schwieriger nachzuvollziehen, jedoch sind Geländemodellierungen oder ähnliche Unterfangen bei diesen Maßstäben nicht untypisch.

24 vgl. BKM, Statusbericht 2021 | S. 11

25 vgl. BKM, Statusbericht 2023 | S. 13

26 vgl. BKM, BAWP 2023, Teil 1 | S. 57

27 Umweltbundesamt, Aushubmaterialien | S. 37

28 vgl. Statistik Austria, Wohnsituation

Sonstiger Hochbau

Die Kategorie ‚sonstiger Hochbau‘ beinhaltet Verwaltungs-, Bildungs-, Industriegebäude und weitere Nichtwohn-Bauten. Die Wiedereinbaurrate fällt mit 15 bis 30 Prozent recht gering aus. Plausible Gründe hierfür könnten zum einen das Verhältnis zwischen Baugrube und Anteil der Wiederverfüllung und zum anderen die Bauweise der Gebäudetypen sein.

Großprojekte

Bei Großprojekten, die wiederum eine hohe Einbaurrate vorweisen, ist dies eindeutig auf die begutachteten Bauvorhaben zurückzuführen. Bei Errichtungen von Skigebieten und Windparks, als auch im Deponiebau bietet sich der Einbau großer Aushubmengen in Form von Geländemodellierung an. Auch in näherer Vergangenheit, wie beispielsweise die Großbauprojekte aus dem Jahr 2019, handelte es sich überwiegend um Tunnelbauten (Semmering- und Brenner-Basistunnel, sowie der Koralmbahntunnel). Bei Projekten dieser Art fällt überwiegend gesteinhaltiger Aushub an, der in der Baubranche oftmals Abnehmer:innen findet.

Netzwerke und Wasserleitungen

Das Bauen von Netzwerken und Wasserleitungen erzeugen kaum Abfall, da Aushub nach der Einbau dort wieder fast vollständig verfüllt wird.²⁹

2.2.3 Aushubkategorien und Aushubqualitäten

Grundsätzlich wird Aushub zunächst in nicht verunreinigtes und verunreinigtes Bodenaushubmaterial unterschieden. Bereits die Begriffswahl gilt es kritisch zu hinterfragen, da Synonyme für „nicht verunreinigt“ eventuell eine andere Auswirkung auf das Meinungsbild von Aushub haben könnte, wie beispielsweise „sauberer“ oder „reiner“ Bodenaushub.

Für die Verwertung im Bauwesen ist besagtes nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial vorzuziehen, da Schadstoffbehandlungen vorab ausgeschlossen werden können. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf nicht verunreinigten Bodenaushubmaterialien gelegt.

In der DVO sind die Probenentnahme, die durchzuführenden Untersuchungen und die zu erfül-

lenden Kriterien festgelegt. Dafür werden die Böden in Aushubkategorien eingeteilt, nach entsprechender Untersuchung in Qualitätsklassen gegliedert und anschließend mit Schlüsselnummern und Spezifikationen versehen. Auf diesen basiert wiederum das weitere Verfahren mit dem Aushubmaterial - wie die Beseitigung, Behandlung oder Verwertung.

Für die Ermittlung der Aushubqualität findet zuerst eine grundlegende Charakterisierung der Aushubmaterialien statt. Diese wird von registrierten befugten Fachpersonen oder Fachanstalten durchgeführt. Sie beinhaltet die Auswertung der Informationslage, die Anfertigung eines Probenahmeplans, die Umsetzung dessen sowie die daraus hervorgehende Beurteilung und Schlussfolgerung. Die Vorgehensweise der einzelnen Schritte ist in der Norm detailliert vorgegeben.³⁰ In der Erstuntersuchung wird das Material zunächst in Aushubkategorien unterteilt:

- **Aushubkategorie I** bezieht sich auf nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial außerhalb von Siedlungsstrukturen und auf Distanz zu Infrastrukturbauten oder tiefer liegende ungestörte Schichten.
- **Aushubkategorie II** umfasst nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial innerhalb von Siedlungsstrukturen und nahe Infrastrukturbauten sowie nicht verunreinigtes technisches Schüttmaterial. Hier ist die dreifache Menge der Probenentnahme gefordert, was wohl auf die Einflussnahme der intensiven Flächennutzung zurückzuführen ist.
- **Aushubkategorie III** steht für nicht gefährlich verunreinigtes Bodenaushubmaterial, technisches Schüttmaterial und sonstigen Aushub.
- **Aushubkategorie IV** beinhaltet jegliches Aushubmaterial mit Verdacht auf Kontamination.

Während eine Erstanalyse für Material der Aushubkategorien I und II ausreichend ist, sind für die beiden anderen Kategorien jeweils umfangreiche Vollanalysen notwendig, um den Grad der Verunreinigung und die benötigte Behandlung und Beseitigung zu beurteilen.

Im BAWP sind genaue Angaben für die Erstuntersuchung ‚Erstanalyse Boden‘³¹ der ersten beiden Kategorien enthalten. Durch die Festlegung von Grenzwerten für Schadstoffgehalte im Aushub resultiert daraus die Zuordnung in Qualitätsklassen. Diese bestimmen wiederum, ob sich das Material für eine Verwertung eignet.

Das Bodenaushubmaterial der Qualitätsklasse A1 stellt das am besten geeignete Material für die Verwertung dar, da dessen Einsatz fast komplett uneingeschränkt möglich ist. Die Qualitätsklassen A2 und A2-G werden überwiegend für Untergrundverfüllungen sowie Bodenrekultivierungsschichten verwendet, die nicht zur landwirtschaftlichen Nutzung gehören, wie Grünflächen oder Straßenböschungen.³²

Gemäß Recycling-Baustoffverordnung eignen sich zudem alle Qualitätsklassen für den ungebundenen Einbau. Daher wären für die Verwertung von Bodenaushubmaterial im Lehm- und Schluffbau alle Qualitätsklassen in Betracht zu ziehen, da diese im herkömmlichen Sinn aufgrund der Vermeidung von hydraulischen Bindemitteln ebenfalls zur ungebundenen Bauweise zählen.

Qualitätsklasse	Aushubkategorie	Verwertung
A1	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial	Fast uneingeschränkte Verwertung - Bodenrekultivierung (auch landwirtschaftlich) - Erdbaumaßnahmen - Recycling-Baustoffe
A2	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial	Hauptsächlich für Untergrundverfüllung - Bodenrekultivierung (nicht landwirtschaftlich) - Erdbaumaßnahmen - Recycling-Baustoffe
A2-G	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial	Im Grundwasserschwankungsbereich - Bodenrekultivierung (nicht landwirtschaftlich) - Erdbaumaßnahmen - Recycling-Baustoffe
BA	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial mit Hintergrundbelastung	In Bereichen mit vergleichbarer Belastung - Bodenrekultivierung (auch landwirtschaftlich) - Erdbaumaßnahmen - Recycling-Baustoffe

Tab. 2.01 | Aushubkategorie und Qualitätsklassen von Aushub

2.2.4 Spezifizierung

Aushub kann als Gesamtheit oder als Bestandteile dessen bewertet werden. Bodenbestandteile sind Fraktionen des Aushubes, welche durch entsprechende Prozesse, wie beispielsweise Siebung, aus der Gesamtmasse gewonnen werden. Die Qualitätsklassen zwischen dem verbliebenen Material und den gesonderten Bodenbestandteilen kann hierbei auch variieren. Im Sinn der Verwertung von Aushub bedeutet das, dass Bodenbestandteile eine andere Zusammensetzung aufweisen können und sich damit besser für den Einbau eignen.

In der Abfallverzeichnisverordnung (AVO) werden Abfälle gemäß ihrer Abfallart mit Schlüsselnummern versehen. Zusätzlich erfolgt die Abfallbezeichnung und Spezifizierung innerhalb der zugeordneten Abfallarten, welche in Anhang 1 der AVO aufgelistet sind.

Aushubmaterialien werden entsprechend ihrer Art, Herkunft und Qualität unterteilt.³³ Für nicht verunreinigte Bodenaushubmaterialien sind folgende Schlüsselnummern und Spezifikationen für eine Verwertung relevant:

32 vgl. Umweltbundesamt, Aushubmaterialien | S. 33
 33 vgl. AVO 2020 | Anhang 2 Abs. 12

1. Nicht verunreinigtes Aushubmaterial

SN	SP	Abfallbezeichnung	Spezifizierung
31411	29	Aushubmaterial	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial der Qualitätsklasse BA und daraus gewonnene, nicht verunreinigte Bodenbestandteile
31411	30	Aushubmaterial	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial der Qualitätsklasse A1 und daraus gewonnene, nicht verunreinigte Bodenbestandteile
31411	31	Aushubmaterial	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial der Qualitätsklasse A2 und daraus gewonnene, nicht verunreinigte Bodenbestandteile
31411	32	Aushubmaterial	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial der Qualitätsklasse A2-G und daraus gewonnene, nicht verunreinigte Bodenbestandteile
31411	45	Aushubmaterial	Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial eines Bau- oder Aushubvorhabens gemäß Kleinmengenregelung

Tab. 2.02 | Schlüsselnummern und Spezifikation von nicht verunreinigtem Aushubmaterial

2. Sonstiges, nicht gefährliches Aushubmaterial

SN	SP	Abfallbezeichnung	Spezifizierung
31411	38	Aushubmaterial	Sonstige, nicht verunreinigte Bodenbestandteile der Qualitätsklasse A2
31411	39	Aushubmaterial	Sonstige, nicht verunreinigte Bodenbestandteile der Qualitätsklasse BA

Tab. 2.03 | Schlüsselnummern und Spezifikation von nicht gefährlichem Aushubmaterial

2.2.5 Kleinmengenregelung

Im BAWP ist eine Sonderregelung für Kleinmengen definiert, welche Aushub einer Baustelle von bis zu 2.000 Tonnen umfasst, was ca. 1.100 Kubikmetern entsprechen.³⁴ Sie begrenzt sich auf nicht verunreinigten Bodenaushub, wenn dies aufgrund von Wissen zu belegen oder augenscheinlich gegeben ist.³⁵ Aushubmaterial dieser Art kann ohne Prüfung deponiert oder verwertet werden. Hierfür ist lediglich das Formular ‚Aushubinformaton für Kleinmengen Bodenaushubmaterial‘ von dem/r Abfallerzeuger:in auszufüllen. Die ausführende Firma für Erdarbeiten führt zusätzlich die Überprüfung des Materials nach visueller Beurteilung durch und bestätigt diese. Kleinmengen dürfen daher ohne weitere Prüfungen als Rekultivierungsschicht und Untergrundverfüllung sowie als Recycling-Baustoff für Bauvorhaben herangezogen werden. Voraussetzungen sind die Beschränkung des Materials auf maximal 2.000 Tonnen und die Vermeidung des Einbaus in oder unmittelbar über dem Grundwasser. Das inkludiert Bodenaushubmaterial der Qualitätsklasse BA (mit Hintergrundbelastung), solange es im selben Umfeld der bekannten Hintergrundbelastung verbaut wird.³⁶

Im Jahr 2021 wurden insgesamt 24.163 Gebäude errichtet;³⁷ 15.846 davon sind Wohngebäude mit einer oder zwei Wohneinheiten, bei welchen man von Einfamilienhäusern ausgehen kann. Diese machen ungefähr 65 Prozent der Neubauten aus und fallen gewöhnlich in die Kleinmengenregelung.

Nach Angaben des Bodenausdeponiebetreibers Hans-Heimo Gänger GmbH machen Kleinmengen jährlich 10 bis 20 Prozent der gesamten Masse des Unternehmens aus, was vergleichbar mit den zuvor berechneten Werten ist.³⁸ Daraus ist zu schließen, dass bereits ein Teil des Bodenaushubs ohne Untersuchungen auf anderen Baustellen verbaut werden darf, sogar in Form von Recycling-Baustoffen.³⁹

Diese Aussage zielt nicht darauf ab, dass vermehrt Kleinmengen in den Bau fließen sollten, sondern auf die Tatsache, dass bereits etwa ein Zehntel des Gesamtaushubes nicht den Regelungen der Prüfung und Dokumentation durch die Gesetzgebung unterliegt. Für Kleinmengen ist das Erreichen des Endes der Abfalleigenschaft vereinfacht. Es sind jedoch weder finanziell noch mengenmäßig Anreize zur Verwertung vorhanden.

2.3 Abfallströme von Aushubmaterialien

Die Abfallströme der österreichischen Abfallwirtschaft macht die Gewichtung von Aushub erkenntlich. Im Statusbericht 2023 sind zwei Abbildungen zu finden – die erste bildet die Abfallströme mit Aushubmaterialien ab und die zweite ohne sie.

Anhand der Grafiken ist erkennbar, dass sich Aushub

auch in der Verwertung bzw. Beseitigung stark von den sonstigen Abfällen in Österreich unterscheidet. Ein großer Teil der „tatsächlichen“ Abfälle werden recycelt. Unter Einbezug der Aushubmaterialien konkurrieren Recycling und Beseitigung durch Deponierung um die Hauptanteile.

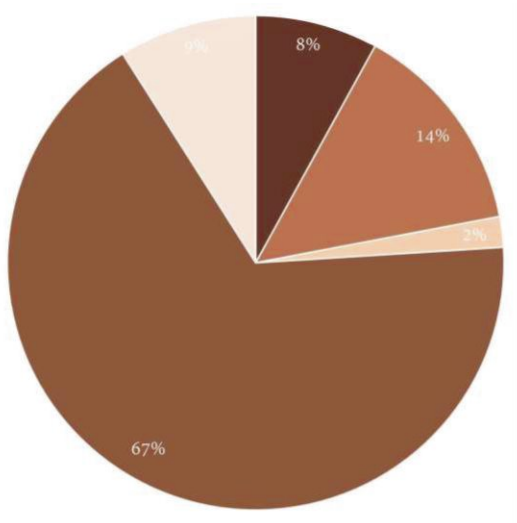


Abb. 2.07 | Abfallbehandlung ohne Aushubmaterialien im Jahr 2021

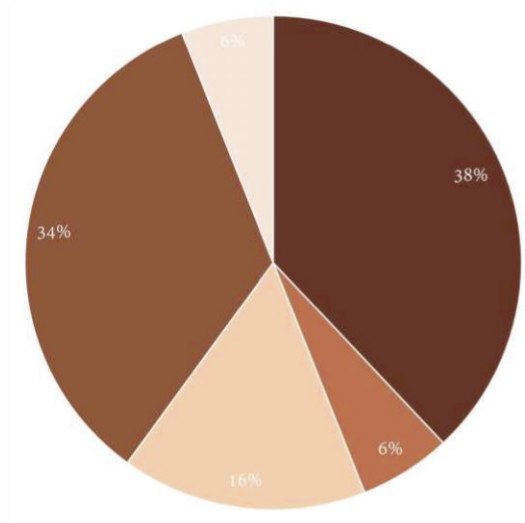


Abb. 2.08 | Abfallbehandlung mit Aushubmaterialien im Jahr 2021



Im Statusbericht 2023 ist zudem der Verbleib von Aushubmaterial im Jahr 2021 detailliert dokumentiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich ein Teil des Aufkommens der statistischen Erfassung entzieht, was hauptsächlich auf nicht abgelagerte Aushubmaterialien zurückzuführen ist. Darunter fällt Aushub, der direkt vor Ort verwertet wird oder in die Landwirtschaft und Ökologie fließt. Außerdem gibt es Sonderregelungen für Aushubaufkommen von Großbauvorhaben. Die Statistik exkludiert zudem Aushub, welcher unter die Kleinmengenregelung (SN 31411 45) fällt.

In Abb. 2.09 ist erkennbar, dass der Großteil des im Statusbericht aufgeführten Aushubmaterials den Qualitätsklassen A1, A2, A2-G und BA zugehörig ist und eignet sich daher für die Verwendung im Bau (vgl. Recycling-Materialien). Nur ein kleiner Anteil von 6

Prozent entspricht nicht den Anforderungen der Qualitätsklassen. Es handelt sich bei diesem Material um Aushubkategorie III (nicht gefährlich verunreinigtes Bodenaushubmaterial) oder Aushubkategorie IV (verunreinigtes Bodenaushubmaterial). In Abb. 2.10 wird dieser Anteil nicht berücksichtigt.

Über die Hälfte der Aushubmaterialien in Österreich werden deponiert. Deponierung fällt unter den Begriff „Beseitigung“. Diese beschreibt gemäß AWG Verfahren, die „keine zulässige Verwertung“⁴⁰ sind. In Anhang 2 des AWGs wird Deponierung als „Ablagerung in oder auf dem Boden (z. B. Deponien usw.)“⁴¹ definiert und ist unter den möglichen Beseitigungsverfahren an erster Stelle angeführt.

Behandlungsanlagen sind im AWG als „ortsfixe oder mobile Einrichtungen, in denen Abfälle behandelt wer-

40 AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 8

41 AWG 2002 | Anhang 2 Teil 2

den [...] ⁴² festgelegt. Die Art der Abfallbehandlung wird dabei nicht näher spezifiziert, welche im selbigen Gesetz „jedes Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren, einschließlich der Vorbereitung vor der Verwertung oder Beseitigung“ ⁴³ beschreibt. Die Behandlungsverfahren umfassen daher Schadstoffbehandlungen für eine anschließende Beseitigung und Aufbereitungsprozesse für die Verwertung von Aushub. Der in Abb. 2.10 gezeigte behandelte Aushub von rund 4 Mio. Tonnen bezieht sich ausschließlich auf Anlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle.

Untergrundverfüllung und Rekultivierung zählen zu den Verwertungsprozessen. Während der Anteil der Rekultivierung die kleinste Position der Aushubverwertung erhebt, macht die Untergrundverfüllung 18 Prozent dessen aus. Dieser Aspekt ist durch den hohen Einsatz von Aushub als Verfüllungsmaterial im Straßenbau erklärbar. Im AWG werden beide Prozesse unter dem Begriff Verfüllung zusammengefasst. Es definiert ein „Verwertungsverfahren, bei dem geeignete nicht gefährliche Abfälle zum Zweck der Rekultivierung von Abgrabungen oder zu bautechnischen Zwecken bei der Landschaftsgestaltung verwendet werden“ ⁴⁴.

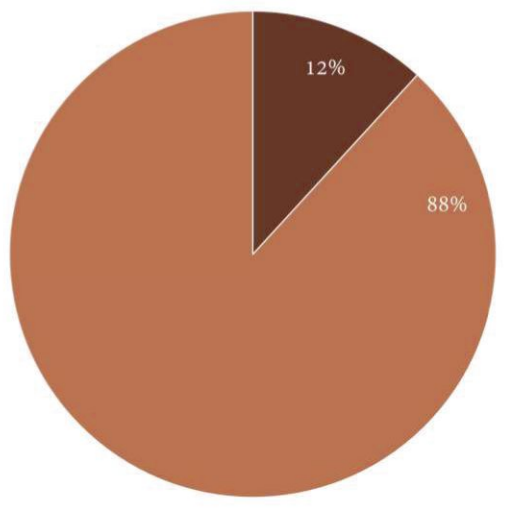


Abb. 2.09 | Massenbilanzierung des Aushubmaterials*

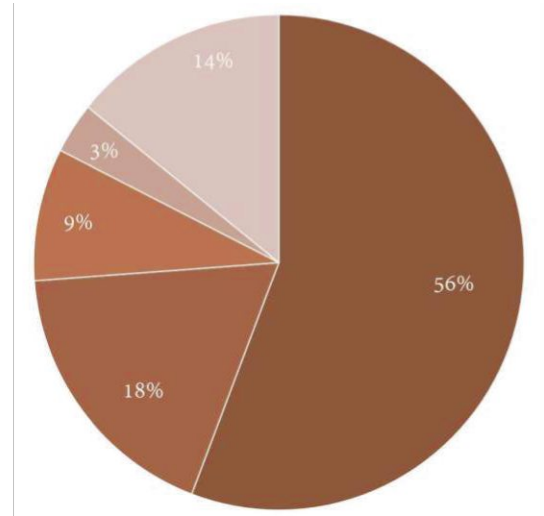


Abb. 2.10 | Abfallströme der Qualitätsklassen A1, A2, A2-G und BA



Die Differenz in der Statistik macht als drittgrößte Position einen relativ hohen Anteil aus. Angeführte Gründe hierfür sind Lageraufbau und -abbau sowie die Änderung von Schlüsselnummern bei bestimmten Prozessen, worunter beispielsweise die Recyclingbaustoffe zählen. Auch Geländeanpassungen in kleinerem Umfang werden nach Angaben des Statusberichtes teilweise nicht verzeichnet. ⁴⁵ Gerade diese sind jedoch

problematisch, da sie beispielsweise landwirtschaftliche Fläche über Jahre zu einer Brachfläche machen können aufgrund des fehlenden Oberbodens (siehe Abb. 2.11). Die Pfeilgrafik (siehe Abb. 2.12) vom Bundesumweltamt visualisiert die Abfallströme in Österreich und macht damit auch den Massenverlust erkenntlich:*

* Die Abweichung der dort befindlichen Zahlen im Vergleich zu den hier aufgeführten Grafiken (Abb. 2.10) und Zahlen (Tab. 2.05) kommt durch einen Miteinbezug weiterer Schlüsselnummern zustande, die jedoch für diese Arbeit nicht relevant sind. Darunter fallen beispielsweise verunreinigte Böden und technisches Hüttmaterial.

In der Grafik wird der Input in Behandlungsanlagen als Abzweigung vom Hauptstrom unter dem Begriff ‚Vorbehandlung‘ zusammengefasst. In diesem Prozess, sei es zur Schadstoffbehandlung oder Aufbereitung zur Verwertung, ist ein Verlust zu verzeichnen, jedoch fällt dieser verhältnismäßig gering aus. Im weiteren Verlauf der Beseitigung oder Verwertung ist ein wesentlich stärker ausgeprägter Massenverlust des Abfallstroms erkennbar.

Die Begrifflichkeit der stofflichen Verwertung sollte in diesem Zuge genauer beleuchtet werden. Im AWG ist der Hauptzweck dieser ‚die Abfälle oder die aus ihnen gewonnenen Stoffe unmittelbar für die Substitution von Rohstoffen oder von aus Primärstoffen erzeugten Produkten zu verwenden‘⁴⁶. Ersteres bezieht sich wohl auf die Untergrundverfüllung und Rekultivierung, welche im Vergleich zu den im Statusbericht 2023 befindlichen Zahlen über 90 Prozent der in der Grafik aufgeführten Menge ausmachen sollten. Zweites beschreibt die Herstellung von Recycling-Baustoffen, was wiederum die Frage aufwirft, ob die für die Recycling-Baustoffe verwendeten Aushubmaterialien tatsächlich bereits im Prozess der ‚Vorbehandlung‘ aus der Abfallwirtschaft scheiden.

Die Grafik macht ersichtlich, dass der hohe Anteil der Differenz nicht aus dem Ende der Abfalleigenschaft von Aushub resultiert, wie es beispielsweise bei Herstellung von Recycling-Baustoffen passieren würde.



Abb. 2.11 | Aushubaufschüttung als Geländeanpassung auf landwirtschaftlicher Fläche

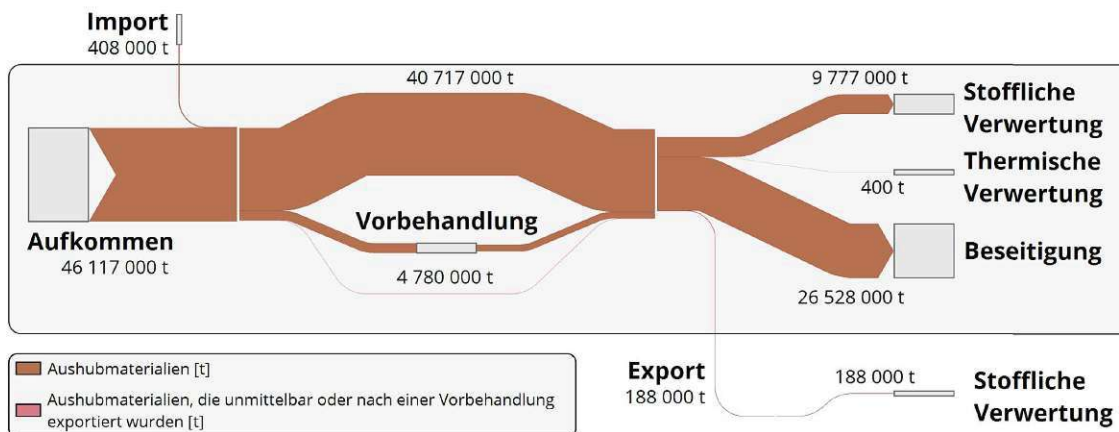


Abb. 2.12 | Abfallströme Aushub 2021 (Bundesumweltamt)

42 AWG 2002 | §2 Abs. 7, Z. 1
 43 AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 1
 44 AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 7a
 45 vgl. BKM, Statusbericht 2023 | S. 226
 46 AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 2

2.4 Deponierte Aushubmaterialien

Die Deponiedatenbank des Umweltamtes zeigt ab dem Jahr 2009 zunächst ein rapides, dann ein stetiges Wachstum der gelagerten Massen von Bodenaushub auf Deponien und erreicht im Jahr 2019 ihren Höhepunkt (siehe Abb. 2.19). Wie zuvor erläutert, spiegelt sie aufgrund der direkten Parallelen zwi-

schen Aufkommen und Ablagerung den Anstieg des Abfallaufkommens wider. Die Ausnahme bildet das Jahr 2021, welches ein höheres Aufkommen als das Jahr 2019 aufweist, während die Deponierung verhältnismäßig geringer ausfällt. Auch in dieser Statistik werden Kleinmengen nicht erfasst.⁴⁷

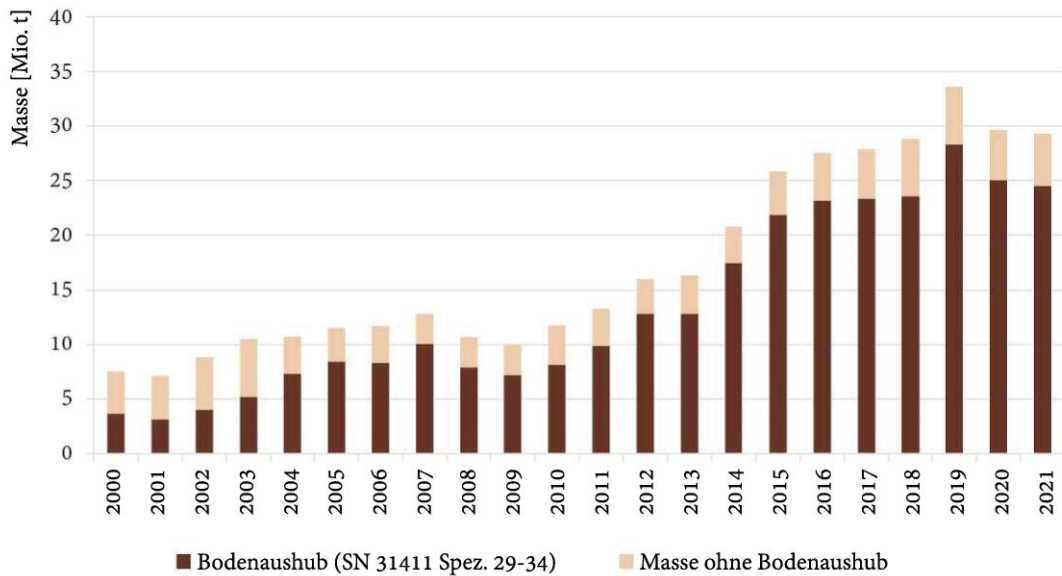


Abb. 2.13 | Abgelagerte Massen auf Bodenaushubdeponien

SN	Qualitätsklasse	Aufkommen [t]	Behandlung [t]	Rekultivierung [t]	Untergrund [t]	Deponierung [t]	Differenz [t]
29	BA	23.540.000	1.454.000	98.000	1.199.000	17.919.000	2.870.000
30	A1	2.269.000	45.000	159.000	586.000	1.382.000	97.000
31	A2	8.596.000	988.000	238.000	1.727.000	5.600.000	43.000
32	A2-G	1.205.000	100.000	62.000	613.000	430.000	0
Summe		35.610.000	2.587.000	557.000	4.125.000	25.331.000	3.010.000
Prozent [%]			7,3	1,6	11,6	71,1	8,5

Tab. 2.04 | Aufkommen, Verwertung und Beseitigung von nicht verunreinigtem Aushub im Jahr 2019



Abb. 2.14 | Bodenaushubdeponie, Aufschüttung

Die Tabellen geben einen vergleichenden Überblick der Jahre 2019 und 2021, welche die höchsten Aushubaufkommen aufweisen. Berücksichtigt werden nur die nicht verunreinigten Bodenaushubmaterialien der Qualitätsklassen BA, A1, A2 und A2-G. Wie auch in der statistischen Grafik (siehe Abb. 2.13) erkennbar, ist anhand der Tabellen nachweisbar, dass die Deponierung im Jahr 2021 trotz erhöhtem Aushubaufkommens geringer ausfällt. Im Verhältnis zum Gesamtaufkommen macht dieser Anteil nur 56 Prozent aus. Betrachtet man die Verwertungsprozesse ‚Behandlung‘ und ‚Rekultivierung‘ ist in beiden Kategorien eine Steigerung zu verzeichnen, während die Nutzung des Materials zur Untergrundverfüllung sich um ein Drittel erhöht. Der Posten ‚Differenz‘ erfährt eine annähernde Verdopplung im Vergleich zum Jahr 2019. Die hierfür bereits genannten Hintergründe lassen Spielraum für den Verbleib dieser Aushubmaterialien.

2.4.1 Bodenaushubdeponien in Österreich

Eine Deponie ist nach Definition des AWGs eine Anlage, „die zur langfristigen Ablagerung von Abfällen oberhalb oder unterhalb [...] der Erdoberfläche errichtet oder verwendet werden“⁴⁸. Zudem wird eine Anlage als Deponie bezeichnet, wenn sie temporäre Bestände für eine Dauer von mindestens einem Jahr vor der Beseitigung und von mindestens drei Jahren vor der weiteren Verwertung lagert.

Im Jahr 2021 existierten in Österreich 1.170 Deponien, die sich in drei der vier Deponieklassen unterteilen: Auf den Inertabfalldeponien werden Abfälle von Abbruch- und Bautätigkeiten abgelagert, wovon 2021 32 Deponien dieser Art betrieben wurden. Zudem gibt es Deponien für nicht gefährliche Abfälle, welche die Ablagerung von gering verunreinigten (Baurestmassendeponie), verunreinigten (Reststoffdeponie) und nicht gefährlichen Böden (Massenabfalldeponie) gewährleisten. Deponien für gefährliche Abfälle existieren in Österreich nicht.

SN	Qualitätsklasse	Aufkommen [t]	Behandlung [t]	Rekultivierung [t]	Untergrund [t]	Deponierung [t]	Differenz [t]
29	BA	20.934.000	1.442.000	178.000	2.638.000	14.462.000	2.214.000
30	A1	3.351.000	46.000	339.000	643.000	1.745.000	578.000
31	A2	14.307.000	1.854.000	446.000	3.419.000	6.082.000	2.506.000
32	A2-G	2.082.000	179.000	386.000	643.000	398.000	476.000
Summe		40.674.000	3.521.000	1.349.000	7.343.000	22.687.000	5.774.000
Prozent [%]			8,7	3,3	18,1	55,8	14,2

Tab. 2.05 | Aufkommen, Verwertung und Beseitigung von nicht verunreinigtem Aushub im Jahr 2021

48 AWG 2002 | §2 Abs. 7, Z. 4

Mit Abstand den größten Teil der Anlagen machen die Bodenaushubdeponien aus: Während im Statusbericht 994 Anlagen als Bodenaushubdeponien in Österreich aufgeführt sind, verzeichnet das Elektronische Datenmanagement (EDM) ungefähr 1.670 Standorte (Stand: 11.04.2023). Die Differenz resultiert möglicherweise daraus, dass einige Anlagenbetreiber:innen mehrere Standorte besitzen. Das EDM unterscheidet bezüglich der Größe der Standorte in drei Kategorien: Bodenaushubdeponien mit weniger als 35.000 Kubikmeter, bis 100.000 Kubikmeter und ab 100.000 Kubikmeter Fassungsvermögen, wobei zweitgenannte den Hauptteil ausmachen.⁴⁹ Im Vergleich der letzten beiden Statusberichte kamen innerhalb der Jahre 2019 bis 2021 ganze 111 neue

Anlagen zu den österreichischen Bodenaushubdeponieren hinzu. Während der Bedarf dieser mit dem Aushubaufkommen steigt, zeigen andere Deponieklassen rückläufige Zahlen.⁵⁰

Das auf Bodenaushubdeponien abgelagerte Material bildet mit knapp 85 Prozent die eindeutige Mehrheit aller deponierten Abfälle.⁵¹ Zudem ist hervorzuheben, dass auf Bodenaushubdeponien ausnahmslos nicht kontaminierter Bodenaushub und -bestandteile abgelagert werden darf.⁵² Darunter fallen vor allem die Qualitätsklassen A1, A2, A-2 und BA, welche wiederum im Jahr 2021 mit 22.687.000 Tonnen über 80 Prozent des gesamten abgelagerten Aushubmaterials ausmachen, exklusive der Kleinmengen.

SN	Abfallbezeichnung	Aufkommen [t]	Deponierung [t]	Deponierung vers. Aufkommen
31411 29	Bodenaushub Qualität BA	20.934.000	14.462.000	69,1 %
31411 30	Bodenaushub Qualität A1	3.351.000	1.745.000	52,1 %
31411 31	Bodenaushub Qualität A2	14.307.000	6.082.000	42,5 %
31411 32	Bodenaushub Qualität A2-G	2.082.000	398.000	19,1 %

Tab. 2.06 | Deponierter nicht verunreinigter Bodenaushub im Jahr 2021 (SN 31411 29 – 32)

Aus der Tab. 2.06 ist ersichtlich, dass es sich bei der großen Mehrheit des Bodenaushubs um Material mit Hintergrundbelastung der Qualitätsklasse BA handelt. Davon werden wiederum knapp 70 Prozent abgelagert. Es macht somit nicht nur den Mehrheit des deponierten Bestands aus, sondern wird im Verhältnis seines Aufkommens auch am meisten beseitigt. Die zweitgrößte Qualitätsklasse im Aufkommen ist Bodenaushub A2, wovon ca. 40 Prozent deponiert werden. Das Material der Qualität A1, der besten Qualitätsklasse, macht nur annähernd ein Viertel vom A2-Aushubaufkommen aus. Davon wird nur etwa die Hälfte abgelagert. Die Qualitätsklasse A2-G weist den kleinsten Anteil im Aufkommen auf, wovon nur ein kleiner Teil von knapp 20 Prozent abgelagert wird.

2.4.2 Vermischungsverbot

Für Bodenaushub gilt nach der DVO das Vermischungsverbot, wenn das Material von einem oder mehreren Standorten auf derselben Deponie abgelagert wird.⁵³ Im AWG sind die Rahmenbedingungen des Vermischungsverbots definiert. Die Vermischung von Abfällen, die Aushub inkludieren, ist rechtswidrig, wenn, *abfallrechtlich erforderliche Untersuchungen oder Behandlungen erschwert oder behindert*, *„abfall-[...] oder anlagenspezifische Grenzwerte*⁵⁴ nicht mehr eingehalten werden können oder es nicht dem öffentlichen Interesse entspricht.

Ein Verbot der Vermischung von Bodenaushub verschiedener Zusammensetzung und Herkunft ist auf Deponien nicht gegeben, wenn die festgelegten Grenzwerte eingehalten werden. Im Gespräch mit

⁴⁹ vgl. edm.gv.at, Stand: 11.04.2023

⁵⁰ vgl. BKM, Statusbericht 2021 | S. 150 / BKM, Statusbericht 2023 | S. 84

⁵¹ vgl. BKM, BAWP 2023, Teil 1 | S. 106

⁵² vgl. DVO 2008 | § 5 Abs. 1

⁵³ vgl. DVO 2008 | § 3 Abs. 9

⁵⁴ AWG 2002 | § 15 Abs. 2

dem Bodenaushubdeponiebetrieb Hans-Heimo Gänger GmbH wird dies bestätigt. Die Ablagerung findet im Allgemeinen in Abschnitten statt, welche jeweils behördlich angeordnet und kontrolliert werden. Die Kontrolle bezieht sich ebenfalls auf die Einhaltung der erlaubten Grenzwerte.

Eine Dokumentation der Beschaffenheit und Zusammensetzung des deponierten Bodenaushubmaterials ist daher nicht vorhanden. Im Fall des oben genannten Unternehmens wurde die Aussage getroffen, dass die Bodenaushubdeponien überwiegend, *mit sandigem und schluffigem Material*⁵⁵ befüllt werden. Das Unternehmen befindet sich in Stasshof nahe Wien und bezieht nach eigenen Angaben Aushub aus einem Umkreis von 50 km, welches zusammen abgelagert wird; Eine Ausnahme bildet Aushubmaterial, welches sich für Recycling-Baustoffe eignet und dem Bauwesen zugeführt wird.⁵⁶

Trotzdem gilt für Bodenaushubdeponien eine strenge Aufzeichnungs- und Meldepflicht der abgelagerten Materialien, welche in der DVO definiert sind. Diese fordern beispielsweise die genaue Aufzeichnung der Eingangskontrolle sowie die Einbaustelle und Datum des Einbaus in einem Raster von 50 auf 50 Metern.⁵⁷

2.4.3 Finanzielle Aspekte von Bodenaushubdeponien

Für Abfallbehandler:innen bzw. Bodenaushubdeponien:

Im Allgemeinen ist die Deponierung von Abfall jeglicher Art in Österreich beitragspflichtig. Deponiebetreiber:innen zahlen vierteljährlich den Altlastenbeitrag, welcher im Altsanierungsgesetz (ALSAG-Novelle 2017) geregelt ist. Grund *„[...] ist die Finanzierung der Sicherung und Sanierung von Altlasten [...]“*⁵⁸ und bezieht sich auf die Ablagerung von Abfällen gemäß der Definition des AWGs §2 Abs. 1 bis 3. Damit würde es ebenfalls Aushubmaterialien betreffen. Seit Januar 2012 fällt für Bodenaushub-, Inertabfall- und Baurestmassendeponien ein Beitrag von 9,20 Euro pro angefangene Tonne an.⁵⁹ Jedoch sind ebenfalls Ausnahmen definiert, die von den Beitragskosten befreit sind, wie auch der „natürliche“ Bodenaushub:

„Aushubmaterial, das durch Ausheben oder Abräumen von natürlich gewachsenem Boden oder Untergrund [...] anfällt und nicht mehr als 30 Volumsprozent an

*mineralischen bodenfremden Bestandteilen [...] sowie nicht mehr als drei Volumsprozent an organischen bodenfremden Bestandteilen [...] enthält, [...]“*⁶⁰

Im Vergleich zur Definition von Bodenaushub in der DVO zählt demnach jeglicher nicht verunreinigter Bodenaushub, welcher im Jahr 2021 über 43 Millionen Tonnen betrug, zur Ausnahme und ist damit beitragsbefreit. Auch bei der Verwertung von Aushubmaterialien sind die Beitragskosten hinfällig.⁶¹

Die DVO schreibt jedoch im Rahmen der Deponieaufsicht mindestens einmal jährlich umfangreiche Überprüfungen und Wartungen vor, die Kosten aufwerfen.⁶² Zudem gilt es in Abhängigkeit des Standorts auch eine geeignete Nutzung der geschlossenen Deponie zu etablieren.⁶³ Nach Angaben des Deponiebetriebs Hans-Heimo Gänger GmbH dauert die Deponieaufsicht 10 Jahre an, weshalb die Wiederverwertung von Aushubmaterial für Deponiebetriebe lukrativer wäre als die Ablagerung.⁶⁴

Für Abfallerzeuger:innen:

In Betrachtung des aktuellen Marktes entstehen für Abfallerzeuger:innen nur niedrige Kosten für die Deponierung, wenn es sich bei dem Aushubmaterial um nicht verunreinigtes Material handelt. Die Kosten variieren je nach Deponiebetrieb und hängen nach Angaben des Unternehmens Hans-Heimo Gänger GmbH von Menge pro Zeitraum, Stecke und freies Schüttvolumen ab.⁶⁵ Die aktuellen Betriebe vergleichend liegt der Preis für Abfallerzeuger:innen bei 4 bis 8 Euro pro Tonne. Die Entsorgungskosten von Aushub fallen im Vergleich zu den Errichtungskosten eines Gebäudes gering aus. Ein finanzieller Anreiz, das Material vor Ort zu verwenden ist dadurch nicht gegeben.



Abb. 2.15 | Bodenaushubdeponie, Verfüllung

55 Interview, Christopher Jakubiec

56 vgl. Interview, Christopher Jakubiec

57 vgl. DVO 2008 | § 41 Abs. 2

58 ALSAG, 02.23 | § 1

59 vgl. ALSAG, 02.23 | § 6 Abs. 4, Z. 1

60 ALSAG, 02.23 | § 3 Abs. 1, Z. 5a

61 vgl. ALSAG, 02.23 | § 3 Abs. 1a, Z. 6 + 6a

62 vgl. DVO 2008 | § 37 Abs. 1, Abs. 2

63 vgl. DVO 2008 | § 39 Abs. 1

64 vgl. Interview, Christopher Jakubiec

65 vgl. ebd.

2.5 Verwertung von Aushubmaterialien im Bauwesen

Neben der direkten Verwertung von Aushubmaterialien in Form von Untergrundverfüllung und Rekultivierungsschichten, wird ein kleiner Teil des Aufkommens im aktuellen Bauwesen als Baustoff eingebunden.

2.5.1 Behandlungsanlagen

Behandlungsanlagen umfassen nicht nur Schadstoffbehandlungen, sondern auch Aufbereitungsprozesse zur Verwertung, wie beispielsweise Siebung. Diese Anlagen wären auch für eine zukünftige Nutzung des Aushubs im industriellen Kontext notwendig.

Für die Schadstoffbehandlung werden hauptsächlich mechanische, mikrobiologische und chemisch-physikalische Prozesse herangezogen mit dem Zweck der endgültigen Ablagerung des Aushubmaterials. In Österreich existieren im Jahr 2021 14 Anlagen zur Schadstoffbehandlung von verunreinigtem Aushubmaterial. Der Anteil des dort behandelten Aushubs ist jedoch verhältnismäßig klein; Im Jahr 2021 betrug der Anteil des dort behandelten Aushubmaterials rund

191.00 Tonnen, was etwa 0,4 Prozent des Gesamtaufkommens in Österreich ausmacht und somit wiederum eine gute Qualität der Böden in Österreich bezeugt.⁶⁶

Behandlungsanlagen für Baurestmassen sind dagegen breiter aufgestellt. Insgesamt gibt es im Jahr 2021 941 Anlagen dieser Art in Österreich, wovon 165 stationäre Standorte haben (siehe Abb. 2.16).⁶⁷ Bei dem Großteil der Anlagen handelt es sich um mobile Maschinerien, die sich nicht länger als sechs Monate an einem Ort befinden. Darunter fallen beispielsweise Brecher und Siebanlagen. Die Anlagen dienen unter anderem zur Aufbereitung von Aushubmaterialien zur Herstellung von Recycling-Baustoffen, welche entweder direkt als Baustoffe eingesetzt oder als Zuschlagstoffe für andere Baustoffe hinzugezogen werden.⁶⁸

In den Behandlungsanlagen werden im Bereich der Aushubmaterialien aktuell hauptsächlich die Qualitätsklassen BA und A2 behandelt, was wiederum mengenmäßig Parallelen zum Aufkommen und Deponierung ausweist. Im Jahr 2021 betrug die beiden Qualitätsklassen zusammen ungefähr 3,3 Mio. Tonnen (siehe Tab. 2.07),⁶⁹ was in Bezug auf das gesamte Aushubaufkommen ca. 7 Prozent ausmacht.

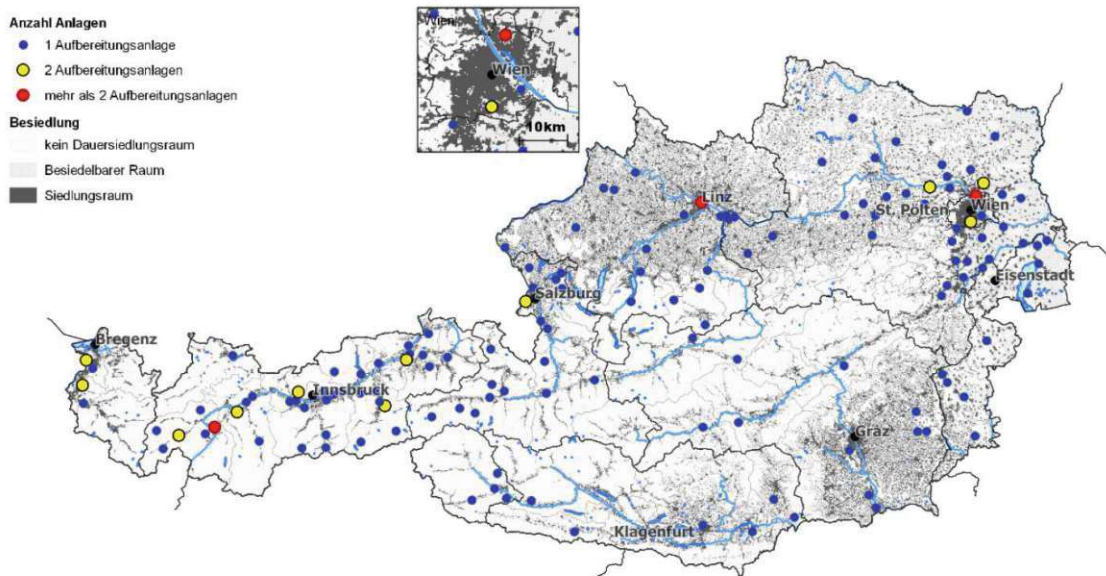


Abb. 2.16 | Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle

Im Vergleich der wesentlichen Input- und Output-Ströme der den Anlagen zugeführten Aushubmaterialien ist jedoch ersichtlich, dass nur ein geringer Teil dieser 7 Prozent tatsächlich in die Verwertung als Recycling-Baustoffe gelangen. Auch im Vergleich zu den für die Recycling-Baustoffe zugeführten Materialien macht Aushub nur einen

geringen Anteil aus. Der Geschäftsführer des Baustoff-Recycling Verbands (BRV) Martin Car bestätigt, dass bei Recycling-Baustoffen ‚schätzungsweise zu über 90 Prozent aus mineralischen Fraktionen von Baurestmassen‘ und ‚nur relativ geringe Fraktionen [...] von Aushubmaterialien, [...]‘ stammen.⁷⁰

SN	Qualitäts- klasse	Input [t]	Output [t]	Verwertung [t]
31411 29	BA	1.442.000	633.000	809.000
31411 31	A2	1.854.000	1.644.000	210.000
31411 33	IN	-	473.000	-
Total		3.296.000	2.750.000	546.000*

* abzüglich des Outputs der SN 31411 33 (IN)

Tab. 2.07 | Wesentliche Input- und Output-Ströme von Aushub in Behandlungsanlagen zwecks Verwertung

2.5.2 Recycling-Baustoffe

Im AWG ist Recycling als Verwertung von Abfällen zu ‚Produkten, Sachen oder Stoffen‘⁷¹ der ursprünglichen oder einer neuen Verwendung definiert. Damit trifft Recycling auch auf die bauliche Verwertung von Aushubmaterialien zu.

Im Jahr 2016 wurde in Österreich die Recycling-Baustoffverordnung (RBV) eingeführt, welche vorrangig die Wiederverwendung von Bau- und Abbruchabfällen regelt. Zweck dieser Verordnung ist ‚die Förderung der Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz‘⁷² durch die Sicherstellung einer hochwertigen Qualität von Recycling-Baustoffen. Neben Bau- und Abbruchabfällen wird ebenfalls die Verwertung von Aushub in der RBV festgelegt. Die Begrifflichkeit Recycling-Baustoff bezieht sich uneingeschränkt auf ‚eine aus Abfällen hergestellte natürliche, industriell hergestellte oder recycelte Gesteinskörnung‘⁷³, die als Rohstoff im Bauwesen verwertet wird.

- Die natürliche Gesteinskörnung wird gemäß RBV aus mineralischen Vorkommen gewonnen und uneingeschränkt durch mechanische Verarbeitungsprozesse aufbereitet. Damit trifft die Beschreibung auf natürlich gewachsenen Boden und Bodenbestandteile zu.
- Recycelte Gesteinskörnung hingegen wird ausschließlich aus anorganischen mineralischen Baustoffen gewonnen, während industriell gefertigte Gesteinskörnung im Zuge von industriellen Prozessen entsteht. Diese Arten der Gesteinskörnung stammen aus Bau- und Abbruchabfällen.⁷⁴



Abb. 2.17 | Gütezeichen für Recycling-Baustoffe

70 Interview, Martin Car
 71 AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 7
 72 RBV, 03.23 | §1
 73 RBV, 03.23 | §3 Abs. 16
 74 vgl. RBV, 03.23 | §3

Qualitäts- klasse	Ungebunden	Ungebunden im / über Grundwasser	Gebunden	Herstellung von Beton**	Herstellung von Asphaltmischgut
A1	ja	nein	ja	ja	ja
A2	ja	nein	ja	Ja	ja
A2-G	ja	ja	ja	Ja	ja
BA	ja*	nein	ja	Ja	ja
IN	nein	nein	ja	ja	ja

Tab. 2.08 | Verwertung von Aushub als Recycling-Baustoff

Aushub als Recycling-Baustoff

In Anhang 1 der RBV sind Abfälle aufgelistet, welche für die Herstellung von Recycling-Baustoffen herangezogen werden dürfen. Darunter fällt Bodenaushub der Qualitätsklassen BA, A1, A2, A2G und IN. Die Einhaltung der Grenzwerte im Rahmen der analytischen Untersuchung, welche in der DVO festgelegt sind, ist die Voraussetzung für die Verwertung des Bodenaushubmaterials.⁷⁵

Zudem gibt es seit 2021 eine Richtlinie zu Recycling-Baustoffen aus Aushubmaterialien vom BRV. Jedoch beschränkt diese sich ebenfalls nur auf „überwiegend oder ausschließlich natürliche[n] Gesteinskörnung“⁷⁶, was lehmhaltigen Boden ausschließt.

Die Ausgangsmaterialien für die Recycling-Baustoffe werden nach Beschreibung von Martin Car vom BRV „zum Beispiel durch Brechen, Sortieren, Klassieren oder durch Reinigungsprozesse wie Sieben und Sichten aufbereitet“⁷⁷. Aushubmaterial findet Verwendung als direkter Baustoff zum Beispiel in Form von Schüttungen oder als Zuschlagstoff für die Produktion von Baustoffen, wobei Aushub vorrangig im Bereich der Zementherstellung eingesetzt wird.⁷⁸ Martin Car bestätigt; „Für Recycling-Baustoffe wird Bodenaushub meist nur als Zumischkomponente verwendet, das heißt zur Verbesserung der technischen Qualität.“⁷⁹ Der hergestellte Recycling-Baustoff hat die Anforderungen und bauphysikalischen Eigenschaften nach dem Stand der Technik (BVT) zu erfüllen.⁸⁰

Im BAWP wird zudem in die ungebundene Anwendung und die gebundene Anwendung unterschieden. Die ungebundene Verwertung inkludiert Schüttungen sowie Beton mit geringen Festigkeitsklassen (bis C12/15, C8/10 Expositionsklasse XC1), während die gebundene Verwertung die Herstellung aller Betone der darüber liegenden Festigkeitsklassen und Asphaltmischungen beinhaltet.⁸¹

Wird Bodenaushub als untergeordnetes Zuschlagsmaterial verwendet bzw. weniger als 50 Prozent des Recycling-Baustoffes beträgt, erhält dieser die Bezeichnung der Qualitätsklasse des hauptsächlich verwendeten Materials. Derzeit gibt es die drei Qualitätsklassen U-A, U-B und U-E für Recycling-Baustoffe aus Bau- und Abbruchabfällen. Ist der Bodenaushub der Hauptbestandteil (über 50 Prozent) des Baustoffes, wird dieser der Qualitätsklasse des verwendeten Aushubs zugeordnet.

⁷⁵ vgl. RBV, 03.23 | Anhang 1, Tabelle 1
⁷⁶ BRV, Richtlinie Recycling-Baustoffe Aushubmaterialien | S. 6
⁷⁷ Interview, Martin Car
⁷⁸ vgl. BKM, Statusbericht 2023 | S. 51
⁷⁹ Interview, Martin Car
⁸⁰ vgl. BKM, BAWP 2023, Teil 1 | S. 313
⁸¹ vgl. BKM, BAWP 2023, Teil 1 | S. 314

2.5.2.1 Abfallende für Recycling-Baustoffe

Der Recycling-Baustoff selbst ist jedoch noch immer Abfall, woraus wiederum das sogenannte ‚Recycling-Baustoff-Produkt‘⁸² hergestellt wird. Erst dann ist das Abfallende für das Material offiziell gültig. Martin Car führt den Ursprung dafür auf: ‚Aufgrund der Abfallrahmenrichtlinie gilt in ganz Europa, dass die Abfalleigenschaft endet, wenn der Stoff verwertet und anschließend wieder einer Verwendung zugeführt wurde. Das ist der Grund dafür, warum die Abfalleigenschaft von Recycling-Baustoffen nicht mit der Produktion endet. Die Produktion von einem Baustoff ist nicht die Verwendung.‘⁸³

Das Abfallende ist für eine bauliche Verwertung von Abfällen rechtlich notwendig. Bei

Recycling-Baustoffen der Qualitätsklasse U-A, was der umweltverträglichste Recycling-Baustoff darstellt, ist unter Einhaltung der definierten Grenzwerte das Abfallende mit der Übergabe an einen Dritten erreicht.⁸⁴ Gemäß Martin Car handelt es sich dabei um 90 bis 95 Prozent aller Recycling-Baustoffe um die Qualitätsklasse U-A, was wiederum bedeutet, dass Bodenaushub hier nur untergeordnet verwendet werden kann.⁸⁵ Für die restlichen Recycling-Baustoffe ist die Verarbeitung zu Recycling-Baustoff-Produkten notwendig, welche dem Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie unter Einhaltung des Vermischungsverbots zu melden sind.⁸⁶



Abb. 2.18 | Bodenaushubdeponie

82 RBV, 03.23 | §3 Abs. 17

83 Interview, Martin Car

84 vgl. RBV, 03.23 | §14 Abs. 1

85 vgl. Interview mit Martin Car

86 vgl. RBV, 03.23 | §14 Abs. 2

2.6 Der Weg aus der Abfallwirtschaft?

Zur Verwendung von Aushub im Lehm- bau ist es alternativlos, dass lehmhaltiger Boden nicht als Abfall eingestuft wird. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Die Vermeidung der Erlangung der Abfalleigenschaft direkt bei der Gewinnung des Aushubes oder das Herbeiführen eines Abfallendes.

2.6.1 Gesetzliche Zielsetzung: Abfall- hierarchie

Das AWG legt bereits im ersten Abschnitt die Ziele und Grundsätze der österreichischen Abfallwirtschaft fest und definiert eine Abfallhierarchie.⁸⁷ Diese dient als Orientierung für den Umgang mit dem Abfallaufkommen und hat in der unten dargestellten Abfolge zur Reduzierung von Abfällen zu erfolgen. Voraussetzung für die Anwendung der Hierarchie sind Verhältnismäßigkeiten zu den ökologischen, technischen als auch wirtschaftlichen Aspekten, wobei der die Entscheidung darüber immer zugunsten des Umweltschutzes ausfallen sollte.⁸⁸

Abfallvermeidung
Vorbereitung zur Wiederverwendung
Recycling
sonstige Verwertung
Beseitigung

In Bezug auf das Verfahren mit Bodenaushubmaterialien stellt sich die Frage, welche Stufe den Ansatz für die Anwendung der Abfallhierarchie bildet:

1. Die Vermeidung von anfallenden Bodenaushubmaterialien im Bau ist nur bedingt möglich. Bei einigen Bauvorhaben im Hochbau, aber vor allem im Straßenbau sind Ausgrabungen des Untergrunds alternativlos. Jedoch besteht die Möglichkeit bei kleineren Bauvorhaben, wie Einfamilienhäusern, Unterkellerung einzuschränken sowie Fundamente einzusetzen, die weniger

bis keinen Aushub verursachen (beispielsweise Schraubfundamente). Zudem besteht die Möglichkeit, dass Aushub durch die Verwendung vor Ort nicht zu Abfall wird, wodurch es mit der aktuellen Rechtsgrundlage zur Abfallvermeidung beiträgt.

2. Wird Bodenaushub zu Abfall, ist der nächste Ansatz die Vorbereitung zur Wiederverwendung. Diese beschränkt sich jedoch laut Definition des AWGs auf Materialien, die *ohne weitere Vorbehandlung wiederverwendet werden*⁸⁹ kann. Auf Bodenaushub bezogen liegen dieser Formulierung zwei Problematiken zugrunde: Zum einen reduziert sie den Anwendungsbereich auf Bodenaushub, der nicht aufbereitet werden muss, was hauptsächlich nur auf Untergrundverfüllung zutrifft. Zum anderen beschränkt sich die Begrifflichkeit Wiederverwendung gemäß AWG auf Stoffe, die zuvor Produkte waren sowie deren anschließenden Einsatz für den ursprünglichen Zweck und ist daher für Bodenaushub nicht zutreffend.⁹⁰
3. Das Verwertungsverfahren Recycling inkludiert die Aufbereitung des Materials vor dessen Verwendung und ist nicht durch Zweckgebundenheit beschränkt.⁹¹ Demnach wäre dieses Verwertungsverfahren für den Umgang mit anfallendem Bodenaushub nach der Abfallvermeidung zu priorisieren. Jedoch ist hier nochmals anzumerken, dass Recycling von Bodenaushub nicht ausreicht, um dessen Abfalleigenschaft zu beenden, sondern eine Produktherstellung benötigt (vgl. 5.2. Recycling-Baustoffe).
4. Der Punkt sonstige Verwertungen inkludieren Bodenaushubmaterialien, die zur Verfüllung herangezogen werden und trifft damit auf den Großteil des verwerteten Bodenaushubs zu.⁹²
5. Deponierung als Beseitigung gehört zur letzten Stufe der Abfallhierarchie, was jedoch in der österreichischen Abfallwirtschaft aktuell mit Abstand den Hauptbestandteil des Umgangs mit Bodenaushub darstellt.

⁸⁷ vgl. AWG 2002 | §1 Abs. 2 / vgl. EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG | Art. 4, Abs. 1

⁸⁸ vgl. AWG 2002 | §2a AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 6

⁸⁹ vgl. AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 4

⁹⁰ vgl. AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 7

⁹¹ vgl. AWG 2002 | §2 Abs. 5, Z. 5

Des Weiteren sind im AWG Zielvorgaben von 2020 bis 2035 definiert, die durch die Orientierung an der Abfallhierarchie erreicht werden sollen. Während jedoch Abfälle wie Siedlungs-, Bau- und Abbruchabfall sowie Einwegkunststoff-Getränkeflaschen durch klar definierte Ziele zur Förderung der Kreislaufwirtschaft beitragen sollen, gibt es keine Zielsetzung für den massenstromreichsten Abfall Bodenaushub.⁹³

Gleichzeitig sind im AWG *„wirtschaftliche Instrumente und andere Maßnahmen zur Schaffung von Anreizen für die Anwendung der Abfallhierarchie“*⁹⁴ gelistet, welche ebenfalls keinen direkten Bezug auf Bodenaushubmaterialien nehmen. Jedoch führen sie Gebühren und Beschränkungen für Deponien an als Förderung der Abfallvermeidung und des Recyclings. Die Ablagerung auf Deponien soll *„die am wenigsten bevorzugte Abfallwirtschaftsoption“*⁹⁵ sein. Die Widersprüchlichkeit dieser Angaben unterstreichen, dass die Verwendung von lehmhaltigen Böden im Bauwesen aktuell nicht in Betracht gezogen wird.

2.6.2 Aushub als Nebenprodukt

Die Deklaration von Aushub als Nebenprodukt eines Bauprozesses würde bedeuten, dass dieser gar nicht erst als Abfall eingestuft werden würde. Dadurch wäre die Voraussetzung der direkten Verwendung im Bau gegeben – ohne zunächst die Abfalleigenschaft beenden zu müssen.

EXKURS Am 17. November 2022 fällte der Europäische Gerichtshof (EuGH) ein Urteil im Rechtsstreit zwischen der österreichischen Firma Porr Bau GmbH und der Bezirkshauptmannschaft (BH) Graz-Umgebung. Hintergrund für das Verfahren ist die Anlieferung von Bodenaushub der Qualität A1 durch die Firma Porr an landwirtschaftliche Betriebe. Dies geschah aufgrund der Nachfrage von mehreren Landwirt:innen bei dem Bauunternehmen.

Die BH Graz-Umgebung vertrat den Standpunkt, dass aufgrund der Definition des Begriffs *„Abfall“* des Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) eine Verwertung des Materials im landwirtschaftlichen Betrieb unzulässig ist. Dadurch sei die Baufirma der Beseitigungspflicht oder dem Herbeiführen des Abfallendes verpflichtet. Das Landverwal-

tungsgericht Steiermark verwies jedoch auf die europäische Richtlinie 2008/98, auch bekannt als Abfallrahmenrichtlinie. Da es auf nationaler Ebene nicht zur Einigung kam, entschied der Europäische Gerichtshof im anschließenden Verfahren, dass es sich bei dem Bodenaushub nicht um Abfall handelte. Das Bauunternehmen unterlag keiner Entledigungsabsicht, sondern vielmehr der vorteilhaften Nutzung des Materials für das Unternehmen. Gemäß Absatz 5 der Richtlinie stellt das Bodenaushubmaterial damit ein Nebenprodukt dar⁹⁶

Zudem wies die Generalanwältin der Verhandlung darauf hin, dass das Erlangen des Abfallendes auf nationaler Ebene so auszulegen ist, dass die Ziele der EU-Richtlinie nicht behindert werden. Dazu gehören die Anwendung der Abfallhierarchie, die Verwertung von Abfällen sowie die Schaffung einer Recycling-Wirtschaft.⁹⁷ Die aktuelle Gesetzlage in Österreich macht das Abfallende insbesondere für Bodenaushub nur unter schwierigen Bedingungen möglich, weshalb auch in diesem Fall die Anerkennung des Bodenaushubes als Nebenprodukt notwendig war.

EXKURS

In der Abfallrahmenrichtlinie als auch im AWG sind die Anforderungen für die Anerkennung eines Nebenprodukts festgelegt, wobei die klare Abgrenzung zu Abfall gezogen wird. Ein Nebenprodukt entsteht demnach durch ein Herstellungsverfahren, dessen Veranlassung nicht auf die Anfertigung dessen abzielt, sondern dieses innerhalb des Prozesses anfällt. Ob dies auf das Aushubaufkommen bei der Herstellung eines Gebäudes zutrifft, ist nicht geregelt und bewegt sich aufgrund der herkömmlichen Vorstellung einer *„Produktherstellung“* in einem Graubereich. Mit der Deklaration von Aushub als Nebenprodukt wäre jedoch die Situation gegeben, dass Aushub gar nicht erst die Abfalleigenschaft erlangen würde und somit in die Bauwirtschaft überlaufen könnte.

Der Artikel zu den Anforderungen an ein Nebenprodukt stimmt beiden genannten Rechtsschriften weitgehend überein, wobei vor allem der zweite Punkt für die Verwendung von Bodenaushub relevant ist. Dieser legt fest, dass Materialien als Nebenprodukte *„direkt und ohne Weiterverarbeitung, die über die normalen industriellen Verfahren hinausgeht,“*⁹⁸ verwendet werden müssen. Dies schließt Rekulti-

93 vgl. AWG 2002 | Anhang 1a

94 AWG 2002 | Anhang 1b
95 ebd.

96 vgl. Rechtssache C-238/21, „Zu den Vorlagefragen“

97 vgl. Gerichtshof der Europäischen Union, Pressemitteilung Nr. 109/22

98 AWG 2002 | §2 Abs. 3a / Richtlinie 2008/98/EG | Art. 5

vierungsschichten und Untergrundverfüllungen aus Bodenaushub ein, könnte jedoch bei der Herstellung von Baustoffen problematisch sein.

Die europäische Abfallrahmenrichtlinie verfügt über einen zusätzlichen Absatz, welcher die Erlangung des Status ‚Nebenprodukt‘ für festgelegte Materialien beinhaltet. So *„[...] können Maßnahmen getroffen werden, um die Kriterien zu bestimmen, nach denen bestimmte Stoffe oder Gegenstände als Nebenprodukt und nicht als Abfall im Sinne des Artikels 3 Nummer 1 anzusehen sind. [...]“*⁹⁹, womit im Prinzip Ausnahmeregelungen unter bestimmten Voraussetzungen möglich wären.

Ob der Status ‚Nebenprodukt‘ für Bodenaushub jedoch angestrebt werden sollte, ist fraglich. Roland Starke, Experte im Feld Abfallwirtschaft, verweist auf damit einhergehende Schwierigkeiten mit den Nebenproduktbedingungen, die nicht auf Bodenaushub ausgelegt seien. Trotzdem erwähnt Starke, dass in einigen europäischen Ländern Bodenaushub als Nebenprodukt anerkannt ist, wobei er auch auf die Problematik der entfallenen Entsorgungspflicht aufmerksam macht.¹⁰⁰

2.6.3 Potenzielles Abfallende für Aushub

Aktuell ist die Verwertung von bewegtem Bodenaushub im Bauwesen erst nach Erlangen des Abfallendes möglich. Dieses tritt gemäß AWG ein, sobald die Bodenaushubmaterialien oder deren Bestandteile *„als Substitution von Rohstoffen oder von aus Primärstoffen erzeugten Produkten verwendet werden“*¹⁰¹. Das entspricht der Definition von Recycling und inkludiert Aufbereitungsprozesse.

Das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie kann individuelle Ausnahmeregelungen vornehmen und das Abfallende zeitlich beschleunigen. Die Voraussetzungen dafür sind im Fall der Bodenaushubverwendung ein existierender Markt, ein bestimmter Verwendungszweck, die Erfüllung festgelegter Qualitätskriterien und die Vermeidung einer erhöhten Umweltbelastung.¹⁰² Ein vorzeitiges Abfallende für Aushub aus der rechtlichen Perspektive ist demnach nur möglich, wenn die Baubranche ebenfalls den entsprechenden Markt im Lehmabbau bietet. Zudem sollte Aushub auch nur dann verwertet

werden, wenn der Aufbereitungsprozess im Verhältnis zum Energieaufwand steht. Außerdem müssen Qualitätskriterien festgelegt werden, um Aushub für die Verwertung im Lehmabbau bewerten zu können.

Roland Starke weist darauf hin, dass die Verwendung von Aushub trotz der Abfalleigenschaft möglich ist, jedoch mit erhöhtem Arbeitsaufwand.¹⁰³ Martin Car vom Baustoff-Recycling-Verband erläutert die Problematiken bei der Verwertung. Selbst nach Herstellung eines Baustoffes aus Aushub mit Abfalleigenschaft, gilt dieser bis zu dessen Einbau als Abfall. Demnach dürfen nur Abfallsammler:innen den Baustoff verwerten, wodurch *„der Markt [...] eingeschränkt wird“*¹⁰⁴. Auch der Abfallwirtschaftsbeauftragte der Bodenaushubdeponie Hans-Heimo Gänger GmbH, Christopher Jakubiec, schildert die Erschwerung der Verwertung von Aushub durch die Gesetzgebung. Er berichtet von dem enormen Arbeitsaufwand der Dokumentationspflicht, welche seiner Meinung nach *„überreguliert“*¹⁰⁵ ist und deshalb Aushub vorzugsweise nicht verwertet wird – trotz der wirtschaftlichen Vorteile für Bodenaushubdeponien bei Verwertung von Aushub. Roland Starke macht wiederum auf die Fragestellung aufmerksam, ob die niedrigen Deponierungskosten Ursache für die hauptsächliche Ablagerung von Aushub sein könnten. Er verweist auf Preiserhöhung sowie ein mögliches Deponierungsverbot bei entsprechender Marktnachfrage, um die Verwertung von Aushub zu fördern. Auch er räumt aktuelle Schwierigkeiten zur Erlangung des Abfallendes für Aushub ein und schlägt eine Abfallende-Verordnung vor, die im Sinne der Kreislaufwirtschaft *„wertvoll“*¹⁰⁶ wäre.

2.6.4 Aussichten für die Verwendung von Aushub im Bauwesen

Aushub ist mit über 40 Mio. Tonnen pro Jahr der größte Massenstrom in Österreich. Zwar wird ein alternativer Umgang mit dem Material diskutiert, jedoch gibt es derzeit keine konkreten Lösungsansätze dafür.

Im **Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023** werden die Potenziale von Aushub erläutert, wobei die Verwertung im Lehmabbau nicht aufgeführt wird. Die erwähnten ‚*vielfältigen Verwertungsmöglichkeiten*¹⁰⁷ beschränken sich auf Erdbauarbeiten, Bodenrekultivierung und die Produktion von Gesteinskörnung. Diese Darstellung spiegelt das aktuelle Baugeschehen wider, in dem Lehmabbau aktuell noch keinen Platz findet. Stattdessen wird die Betonherstellung als Beispiel für eine ‚*möglichst hochwertige Verwertung*‘ und ‚*ökologische[r] [...] ökonomische[r] Idealfall*¹⁰⁸ angeführt. Das hohe Aufkommen von kostengünstigen Bodenaushubdeponien sowie die geringen Anschaffungskosten von Rohstoffen werden als aktuelle Problematiken thematisiert. Auch der Transport der Massen an Aushub wird als klimaschutzrelevant eingestuft. Als umgesetzter Lösungsansatz wird auf das Deponierungsverbot für technisches Schüttmaterial und Gleisaushubmaterial verwiesen und dem Vorhaben ein Konzept für ein ‚*vorzeitiges Ende der Abfalleigenschaft (Produktstatus) für Recycling-Baustoffe aus nicht verunreinigtem Bodenaushubmaterial*¹⁰⁹ zu erarbeiten.

In der **EU-Deponierichtlinie** von 2018 legt eine schrittweise Verringerung der Ablagerung von ungefährlichen Abfällen fest, um die Kreislaufwirtschaft zu fördern. Verwiesen wird dabei auf die Anwendung der Abfallhierarchie. Ab 2030 sollen Ablagerungsbeschränkungen in Kraft treten, um recyclingfähige Materialien in die Kreislaufwirtschaft einzubinden.¹¹⁰ Zwar wird Aushub in dieser Richtlinie nicht gesondert aufgeführt, jedoch erfüllt dieser, sofern es sich um nicht verunreinigten Bodenaushub handelt, die angeführten Kriterien.

Im **Masterplan Rohstoffe 2023** des Bundesministeriums Landwirtschaft, Region und Tourismus werden Maßnahmen zum Schutz der österreichischen Rohstoffe festgelegt. Aushub wird darin zwei Mal thematisiert; Eine ‚*geordnete[n] und regionale[n]*

*Verwertung*¹¹¹ von Aushubmaterialien sollen Transporte und Deponierung vermeiden. Zudem wird empfohlen nicht verunreinigten Bodenaushub aus der Abfallwirtschaft auszuschließen.¹¹²

Auch in der **Österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie** des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie aus dem Jahr 2022 thematisiert die Ressourcenschonung im Bauwesen. Bezüglich Bodenaushubmaterials empfehlen sie die vermehrte Zuführung in die stoffliche Verwertung.¹¹³

Im **Bericht der Ressourcennutzung in Österreich** vom Jahr 2020 darauf hingewiesen, dass eine Knappheit von Baurohstoffen schon seit 2014 ermittelt wurde. Diese betrifft zunehmend die Ressource Sand. Zusätzlich wird auf die Flächennutzung für die Baurohstoffgewinnung verwiesen, welche ‚*in Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen wie landwirtschaftlicher Produktion, Freizeitaktivitäten oder auch Naturflächen zum Erhalt ökosystemarer Prozesse*¹¹⁴ stehen.

Die aufgeführten Analysen und Empfehlung sind jedoch keineswegs neue Erkenntnisse; bereits 1989 wurde im **Umweltbericht Abfall** vom Österreichischen Bundesinstitut für Gesundheitswesen mit klarer formuliert, ‚*zu verhindern, daß relevante Erd-aushubmengen zum Abfall werden*.¹¹⁵ Eine getrennte Ablagerung von Aushubmaterial und dessen Verwertung wurde damals schon dringlich empfohlen.

Das Bewusstsein für die Potenziale von Aushub durch die bauliche Verwertung scheinen in Bereichen der Abfall- und Bauwirtschaft durchaus vorhanden zu sein. Der Übergang von Analysen und Empfehlungen in Richtung aktiver Handlungsansätze wurden bisher nicht getätigt. Möglichkeiten wie Aushub als Nebenprodukt zu deklarieren, eine vereinfachte Erlangung eines Abfallendes für nicht verunreinigtes Aushubmaterial oder die Schaffung einer gesonderten Abfallkategorie mit angepassten Regelungen scheinen von aktuellen Strukturen blockiert zu sein.

107 BKM, BAWP, Teil 1 | S.258 - 259

108 ebd.

109 ebd.

110 vgl. Richtlinie (EU) 2018/850 des Europäischen Parlaments und des Rates | Abs. 2, Abs. 8

111 Masterplan Rohstoffe 2030 | S. 52

112 vgl. Masterplan Rohstoffe 2030 | S. 60

113 vgl. Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie | S. 53

114 Ressourcennutzung in Österreich 2020 – Band 3, 2020 | S. 34 - 35

115 Umweltbericht Abfall, 1989 | S. 235





Die autorisierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved printed version of this thesis is available at TU Wien Bibliothek.



3. Lehm – Vorkommen und Zusammensetzung

3.1.1 Entstehung von Lehm in Österreich

Die Entstehung ist ein immer fortwährender Prozess der Neu- und Umbildung von mineralogischen Strukturen und kann noch an der bewitterten Lehmwand stattfinden.¹ Auf die Entstehung von Tonmineralen nehmen verschiedene Faktoren Einfluss, wie Temperatur, Wassergehalt, Druck, pH-Wert, etc. Sie wirken auf Gesteine ein, die damit eine Zersetzung in Mineralstrukturen erfahren, wie beispielsweise Tonminerale. Das Stadium eines Tonminerals ist jedoch nicht endgültig, sie zeichnen nur eine Momentaufnahme des Verwitterungsprozesses ab und weisen daher eine umfangreiche Diversität auf.

In Österreich sind unterschiedliche Entstehungsprozesse der Tonminerale nachweisbar. Unter Einfluss von Wasser bildeten sich marine Sedimente im Salz-

wasser, brackische Sedimente an Flussmündungen und limnische Sedimente in Süßwassergebieten. Zudem sind äolische Sedimente vorhanden, welche sich durch Windeinwirkung gebildet haben.

Die Entstehung der österreichischen Tone geht auf unterschiedliche geologische Epochen zurück. Sie reichen bis ins sogenannte Paläogen zurück, welches vor 66 bis 23 Mio. Jahren herrschte. Auch in der jüngsten geologischen Epoche, dem Postglazial, entstehen noch immer Tonminerale.

Tonvorkommen* in Österreich ist hauptsächlich in der Molassezone sowie dem Inneralpinen Becken, worunter auch das Wiener Becken zählt, vorhanden. Die Molassezone entstand während der alpinen Gebirgsbildung als tektonisches Becken entlang der Alpen.

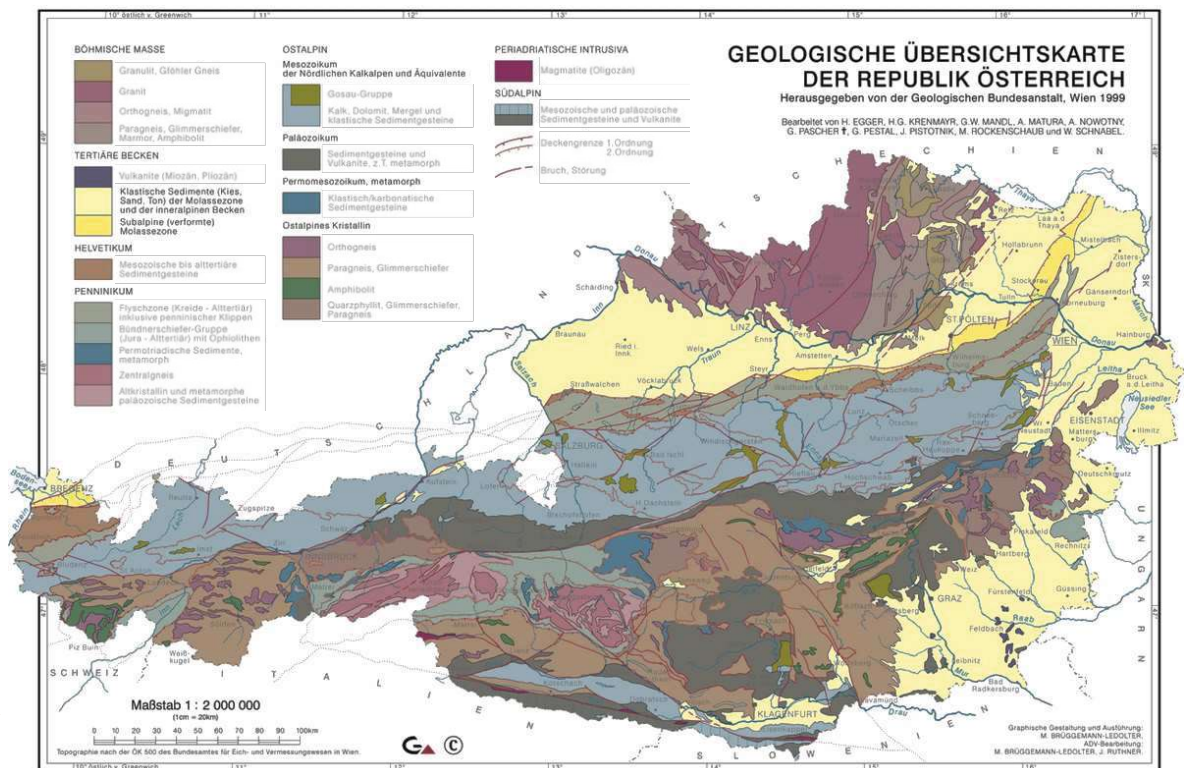


Abb. 3.01 | Geologische Übersichtskarte

Im Neogen (vor 23 Mio. Jahr bis 2,6 Mio. Jahre) bildete die Fläche einen Teil des Paratethys-Meers aus, weshalb Ablagerungen von ton- und schluffhaltigen Sedimenten in den Beckentiefen stattfanden. Die Sedimente stammen hauptsächlich aus den Alpen, während geringe Anteile aus der Böhmisches Masse hervorgingen.

Das Inneralpine Becken umfasst neben dem Wiener Becken auch das Weinviertel, das Burgenland und die Steiermark. Die Beckenbildung erfolgte im Zuge der plattentektonischen Dehnung in Richtung Osten. Mit der Rückbildung des Paratethys-Meers entstand ein weitläufiges Binnensee-System des Pannonischen Sees. An den Beckenrändern erfolgte die Ablagerung von Kiesen und Sand, während Schluff und Ton in

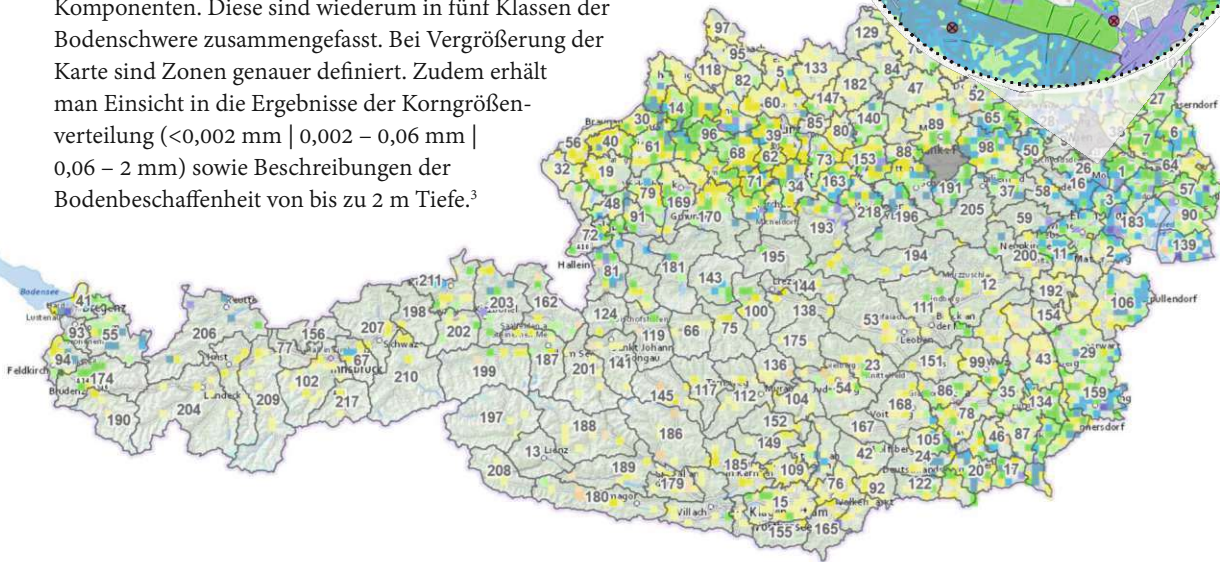
den Beckentiefen sedimentierten. Dies führte unter anderem zur hohen Tonkonzentration im Wiener Becken in Form des Wiener Tegels.²

3.1.2 Lehmvorkommen in Österreich

Es gibt einige geografische Wissensquellen und Datenbanken zum Lehmvorkommen in Österreich. Die geologischen Gegebenheiten können für den Nachweis von Lehmvorkommen herangezogen werden und bilden die Grundlage für eine potenzielle Nutzung von Aushub.

eBod von Naturland Niederösterreich | digitale Bodenkarte

Die wohl hilfreichste Informationssammlung hinsichtlich der Nutzung von Aushub stellt die digitale Bodenkarte von Naturland Niederösterreich dar. Diese wurde aufgrund von landwirtschaftlich nutzbaren Flächen erstellt, liefert jedoch auch für den Lehmabbau hilfreiche Hinweise. Darin werden Bodenarten anhand der Korngrößenzusammensetzung analysiert und nach den Anteilen von Sand, Schluff und Ton bewertet. Zur Auswertung wird das Österreichische Bodendreieck der ÖNORM L 1050 hinzugezogen und unterscheidet in 13 verschiedene Klassen je nach Mischverhältnis der drei Komponenten. Diese sind wiederum in fünf Klassen der Bodenschwere zusammengefasst. Bei Vergrößerung der Karte sind Zonen genauer definiert. Zudem erhält man Einsicht in die Ergebnisse der Korngrößenverteilung (<0,002 mm | 0,002 – 0,06 mm | 0,06 – 2 mm) sowie Beschreibungen der Bodenbeschaffenheit von bis zu 2 m Tiefe.³



Bodenart:	
[Orange]	Sand
[Light Orange]	schluffiger Sand
[Yellow-Orange]	lehmiger Sand
[Yellow]	sandiger Schluff
[Light Green]	Schluff
[Green]	toniger Sand
[Dark Green]	sandiger Lehm
[Light Blue]	lehmiger Schluff
[Blue]	Lehm
[Dark Blue]	schluffiger Lehm
[Purple-Blue]	lehmiger Ton
[Dark Purple]	Ton

Abb. 3.02 | Digitale Bodenkarte (eBod)

Tonvorkommen in Österreich der Geologischen Bundesanstalt | Karte

Aktuell gibt es in Österreich etwa 40 aktive Tongruben, die den Rohstoff für die Ziegelproduktion, Feinkeramik und feuerfeste Werkstoffe liefern. Sie fördern jährlich über 2 Mio. Tonnen Ton. Das Tonarchiv der Geologischen Bundesanstalt umfasst aktuell ungefähr 2.500 Einträge zu Tonvorkommen, die zum Teil auf aktive sowie ehemalige Ton- und Lehmgruben zurückgehen. Zudem liegen bei einigen Einträgen tieferegehende Materialanalysen im Bereich Mineralogie und Geochemie vor.⁴

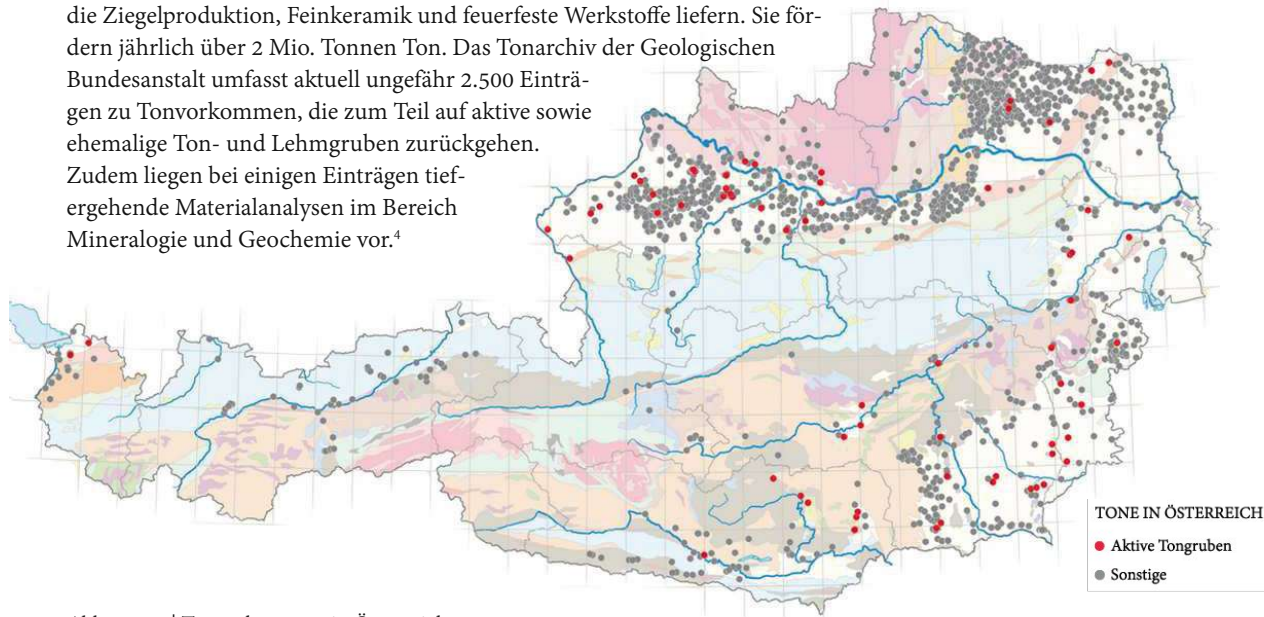


Abb. 3.03 | Tonvorkommen in Österreich

IRIS der GeoSphere Austria | Interaktive Karte

Auf dem *Interaktiven RohstoffInformationssystem (IRIS)* der GeoSphere Austria⁵ sind unter anderem Zonen mit Tonvorkommen definiert. Durch punktuelle Probenahmen sind vertiefende Information über das Bodenmaterial abrufbar.

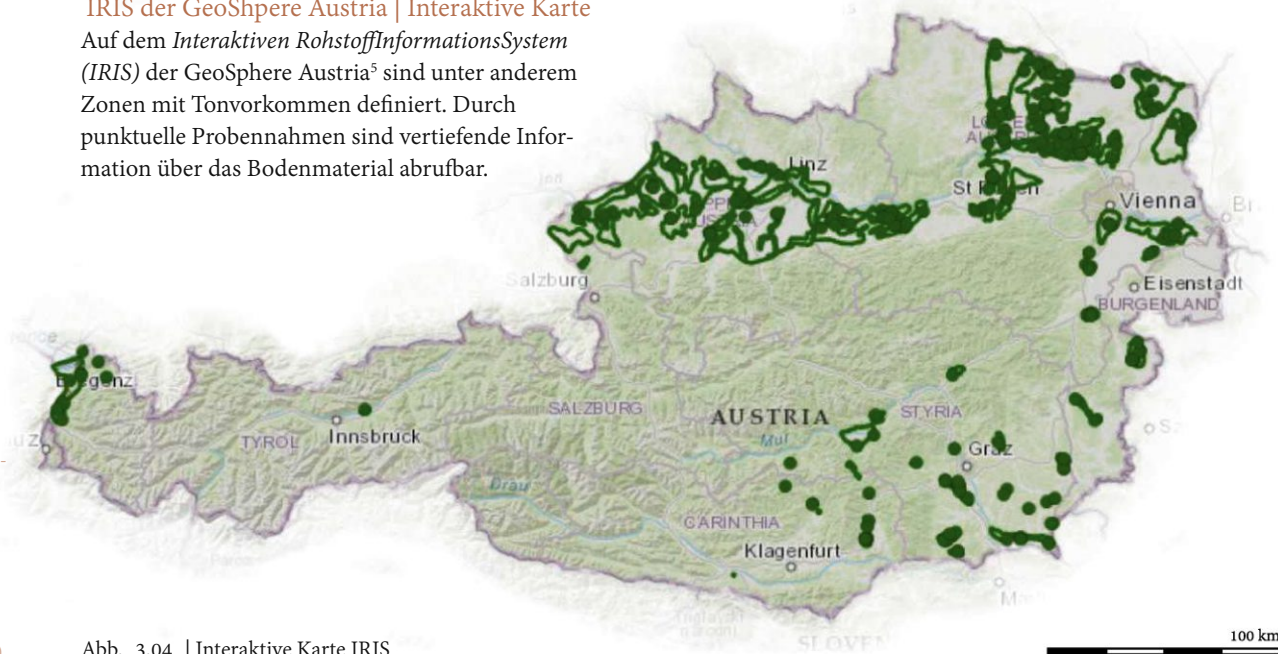


Abb. 3.04 | Interaktive Karte IRIS

⁴ vgl. Rabeder, Julia, Geologische Bundesanstalt: Tonrohstoff in Österreich: Von der Steinzeit bis zur Forschung, 2022
⁵ s. GeoSphere Austria: Interaktives RohstoffInformationssystem (IRIS)

3.2 Was ist Lehm?

3.2.1 Bestandteile

Lehm ist die Zusammensetzung von Sand, Schluff und Ton sowie gegebenenfalls Anteile von Kies und organischen Stoffen. In der Mineralogie fällt Lehm unter die Begrifflichkeit Ton und beschreibt die Zusammensetzung von Ton- und Begleitmineralen, welche in Böden mit Sand und Kies vorkommen können.⁶ Die Tonminerale sind die elementare Komponente von Lehm und geben ihm seine spezifische Eigenschaft der Bindigkeit.

Lehm ist ein Verwitterungsprodukt von Gesteinsschichten der Erdkruste. Er entsteht durch natürliche Massenbewegungsprozesse, wie Fließgewässer, Windströme und Gletscherbewegungen, Wassereinwirkung, Temperatur und Druck. Auch chemische Reaktionen in den Erdschichten können Einfluss nehmen.⁷ Lehm zeichnet sich durch die Verformung im plastischen Zustand aus und ist in vielfältigen Ausprägungen zu finden. Durch die genannten Naturprozesse kann er beispielsweise in feinkörnigen bis grobkörnigen Erscheinungsformen auftreten oder unterschiedlich ausgeprägte Bindekräfte aufweisen. Im Lehmabbau sind die materialbedingten Parameter für daraus resultierende bauphysikalische Eigenschaften relevant.

Nichtbindige Bestandteile

Nichtbindige Bestandteile im Lehm sind Schluff, Sand und gegebenenfalls Kies. Schluff ist in den Korngrößen von 2 µm bis 63 µm vertreten. Sand stellt die nächste Größe dar und liegt in dem Korngrößenbereich 63 µm bis 2 mm vor. Bestandteile größer 2 mm zählen zur Komponente Kies. Schluff, Sand und Kies entstehen durch natürliche Verwitterungsprozesse aus dem sogenannten Urgestein. Abhängig von den Prozessen sind sie in kantiger oder gerundeter Form vorhanden.⁸ Auf Mineralebene <2 µm sind nichtbindige Minerale, wie Quarz, Kalzit oder Feldspäte, ebenfalls vertreten. Im Lehmabbau wird nach Korngrößen

ausgewertet, wodurch diese nichtbindigen Minerale in die Tonfraktion fallen. Die Tonfraktion ist eine Korngrößenklasse von 0 µm bis 2 µm, deren Begrifflichkeit fälschlicherweise das ausschließliche Vorkommen von Tonmineralen impliziert.⁹

Je nach Zusammensetzung der nichtbindigen Komponenten und Tonminerale entstehen Lehme mit unterschiedlichen Eigenschaften. Oftmals sind nichtbindige Minerale ausschlaggebend für die Farbe eines Lehms. Der Wiener Tegel weist aufgrund seines erhöhten Pyritgehalts oftmals eine Graufärbung auf, während Goethit für eine gelbliche und Hämatit für eine rötliche Farbgebung verantwortlich sind.

Tonminerale

Tonminerale sind das natürliche Bindemittel von Lehm und machen diesen zu einem baustofffähigen Material. Sie bewegen sich in einem Größenbereich von etwa 0,1 bis 4 µm und generieren die Kohäsion im Lehm. Tonminerale zählen aufgrund ihrer Entstehung zu den Sekundärmineralen. Primäre Minerale sind in Magma* enthalten und werden durch Eruptionen an die Erdoberfläche oder in die Erdschicht befördert. Sekundärminerale, wie die Tonminerale, entstehen wiederum vollständig aus Verwitterungsprozessen der Primärminerale. Sie erfahren eine Art Entwicklung durch den ständigen Zerfall in kleinere Elemente.¹⁰ Das Ursprungsgestein sowie der Verwitterungsgrad bestimmen die chemische Zusammensetzung der Tonminerale.¹¹

Die Kohäsion beschreibt die gegenseitige Anziehungskraft von Tonmineralen. Sie ist bereits im plastischen Zustand messbar. Sie verringert sich durch Wasserzugabe, jedoch kann sie in stark abgeschwächter Form auch in flüssigen Suspensionen auftreten bzw. nachgewiesen werden^{**}. Die volle Entfaltung erfährt die Kohäsion im getrockneten bzw. festen Zustand nach Entweichung der Wassermoleküle.

*Magma ist flüssige Gesteinssubstanz, welche sich unterhalb der Erdkruste befindet

** Für die Auflösung dieser werden Dispersionsmittel genutzt, welche durch die Zugabe bestimmter chemischer Substanzen die Kohäsion aussetzen bzw. blockieren.

- 6 vgl. Ottner, 2009 | S. 1
- 7 vgl. Minke, 2022 | S. 16
- 8 ebd.
- 9 vgl. Ottner, 2009 | S. 1
- 10 vgl. Vorlesung von dem Kurs Tonminerale und Tone – natürliche Nanomineralien mit besonderen Eigenschaften (BOKU)
- 11 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 12

Primär setzen sich Tonminerale aus den Hauptelementen Silizium (Si), Aluminium (Al) oder Magnesium (Mg) zusammen. Die darauf aufbauende mineralogische Struktur kann in zwei elementare Gruppen unterteilt werden: Tetraeder und Oktaeder. Das zentrale Ion der Tetraeder ist Silizium (Si^{4+}), welches von vier Sauerstoffionen (O^{2-}) umgeben ist, und somit die chemische Struktur SiO_4 ausbildet. Die Strukturbildung entsteht durch gemeinsame Sauerstoffionen der Tetraeder und kann unterschiedlichen Formen vorliegen. Die Bildung von einer flächenartigen Struktur (siehe Abb. 3.06 (h)) ist die Ausgangsform für Tonminerale.¹²

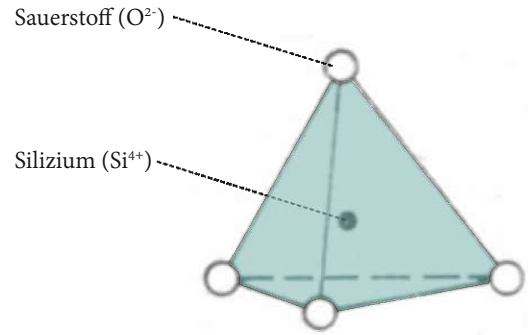


Abb. 3.05 | Strukturelle Zusammensetzung von Tetraedern

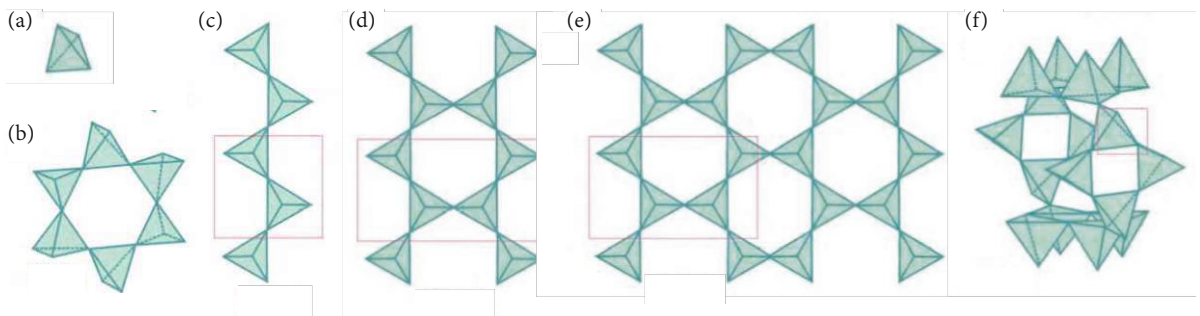


Abb. 3.06 | Strukturbildung von Silikaten | (a) Inselsilikate (Olivine) | (b) Ringsilikate | (c) Kettensilikate (Pyroxene) | (d) Bandsilikate (Amphibole, Hornblende) | (e) Schichtsilikate (Tonminerale) | (f) Gerüstsilikate (Quarz, Feldspäte)

Oktaeder weisen zumeist ein Aluminium- (Al^{3+}) oder Magnesiumion (Mg^{2+}) als zentrales Hauptelement auf und sind von sechs Hydroxyl- (OH) oder Sauerstoffionen (O^{2-}) umgeben. Durch Verbindungen über gemeinsame Ionen entstehen ebenfalls flächenartige Ausbildungen.¹³

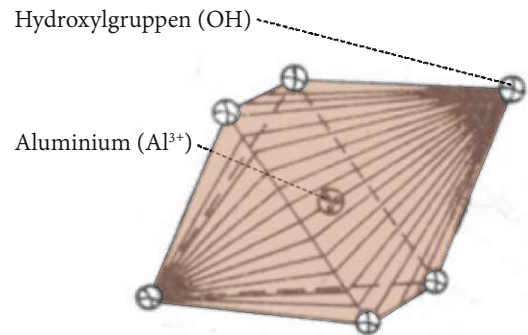


Abb. 3.07 | Strukturelle Zusammensetzung von Oktaedern

vgl. Ottner, 2009 | S. 5f ebd.

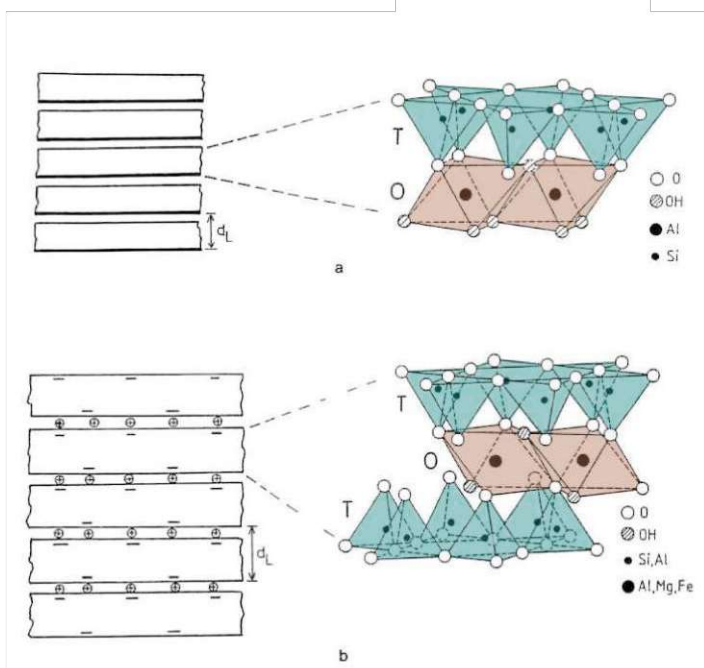


Abb. 3.08 | Zweischnitt- und Dreischichtsilikate

Die einzelnen Flächen schließen sich wiederum über gemeinsame Ionen zu schichtenartigen Gebilden zusammen, wobei in zwei Sequenzen unterschieden wird. Die Zweischnittsilikate (auch 1:1-Mineralen) bestehen aus jeweils einer Tetraederschicht und einer Oktaederschicht (T – O), während die Dreischichtsilikate (auch 2:1 Mineralen) eine zusätzliche Tetraederschicht (T – O – T) aufweisen.

Während die Tetraeder und Oktaeder durch ionische Verbindungen zusammengehalten werden, wirken zwischen Zweischnitt- und Dreischichtsilikaten Anziehungskräfte (Van-der-Waalskräfte). Diese verringern sich bei zunehmendem Wassergehalt bis hin zum Ausbleiben der Anziehungskräfte. Dieses Phänomen ist auf das Eindringen der Wassermoleküle in die Zwischenschichten der Tonminerale zurückzuführen. Bei Trocknung entziehen sich die Wassermoleküle, wodurch die Anziehungskraft zwischen den Tonmineralen erneut einsetzt.¹⁴ Die reversible Anziehungskraft der Schichtsilikate ist ausschlaggebend für den Lehm- und Zementbau.

Bei Brennvorläufen ab etwa 550 °C entweichen die Hydroxylgruppen (-OH) aus den Strukturen der Tetraeder- und Oktaederschichten. Dadurch entsteht eine irreversible Bindung, welche in der Ziegel- und Zementindustrie genutzt wird.

Der beschriebene Schichtaufbau ist bei Glimmer ohne optische Hilfsmittel erkennbar und zieht sich bis in die Nanoebene durch. Glimmer ist ein gut spaltbares Mineral, das in verschiedensten Größenordnungen vorliegt. Durch Verwitterungsprozesse können daraus Tonminerale, wie Illite, entstehen.



Abb. 3.09 | Glimmer

¹⁴ vgl. Ziegert, Röhlen, 2020 | S. 12

Dreischichtsilikate verfügen über eine zusätzliche Zwischenschicht aus temporär gebundenen Kationen. Die Bindung entsteht durch negative Ladungen an den Schichtoberflächen. Die Ursache hierfür liegt im isomorphen Ersatz innerhalb der Schichten, bei dem das zentrale Hauptelement ausgetauscht wird. Daher ist bei Dreischichtsilikaten das sogenannte Ionenaustauschvermögen durch die Mobilität der Kationen gegeben.

Bei den Dreischichtsilikaten Smektite und Vermikulite können die Kationen hydratisieren, wodurch sich die Tonminerale aufweiten. Dadurch differenzieren sich diese Dreischichtsilikate in ihrer Anziehungskraft sowie dem Quell- und Schwindverhalten.

Durch die schichtartige Struktur verfügen Tonminerale über eine außerordentlich große spezifische Oberfläche. Diese beschränkt sich nicht nur auf die äußere Hülle des Tonminerals, sondern besteht durch die Zwischenschichten auch im Inneren. Bei dem Tonmineral Smektit kann diese bis zu 800 m² pro Gramm ausmachen.¹⁵

Aus der spezifischen Oberfläche resultiert eine hohe intrakristalline Reaktivität, welche die Aufnahme von anorganische sowie organische Verbindungen beschreibt. Damit kann Lehm neben der Regulation von Luftfeuchtigkeit zusätzlich Gerüche und Schadstoffe aufzunehmen und diese temporär oder dauerhaft binden.¹⁶

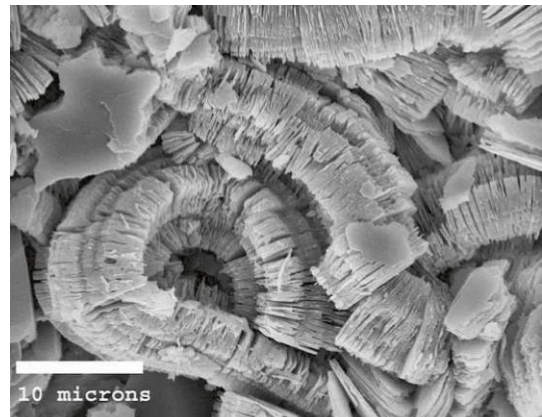


Abb. 3.10 | Kaolinit

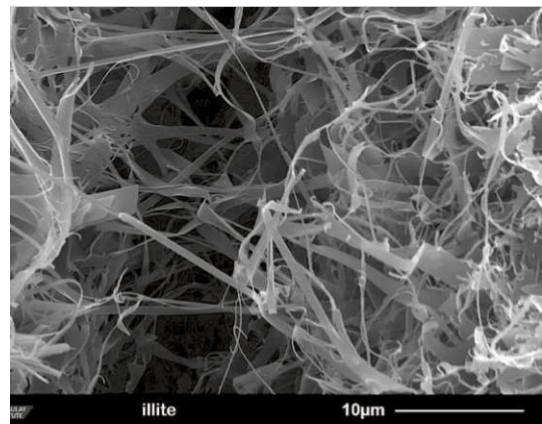


Abb. 3.11 | Illit

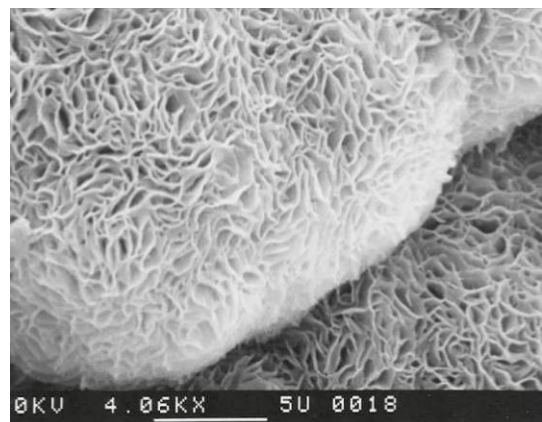


Abb. 3.12 | Smektit

3.2.2 Vorstellung der wesentlichen Tonminerale

Zweischichttonmineral

Kaolinit

Kaolinit ist ein Zweischichtmineral, das aus 20 bis 100 Schichtsequenzen von Tetraedern und Oktaedern besteht und damit eine Größe von 0,5 µm bis zu 4 µm aufweisen kann.¹⁷ Kaolinit kann daher über die Tonfraktion hinaus in den definierten Feinschluffbereich reichen. Das Tonmineral weist aufgrund der kaum vorhandenen Isomorphie eine hohe chemische Stabilität auf, wodurch ein geringes Quell- und Schwindverhalten vorliegt. Die spezifische Oberfläche fällt bei Kaolinit sehr klein aus (ca. 10 m²/g) und auch die Ladungsdifferenzen auf den Schichtoberflächen sind schwächer ausgeprägt, wodurch Kaolinit zu den schwachen Tonmineralen mit geringer Bindekraft zählt.

Dreischichttonminerale

Illit

Illite kommen sehr häufig in Lehmen vor. Es handelt sich hierbei um verwitterte Glimmer im Größenbereich <2 µm. Durch ihre Abstammung weisen Illite eine große Vielfalt auf, weshalb die Begrifflichkeit „Illitic materials“ für die Tonmineralgruppe angedacht ist. Trotz des dreischichtigen Aufbaus sind Illite nicht quellfähig.

Smektit

Der ursprüngliche Name der Tonmineralgruppe war „Montmorillonit“, benannt nach dem Standort der Entdeckung in Frankreich. Heute bilden die Montmorillonit nur mehr einer Untergruppe der vielfältigen Smektite ab, wenn auch eine der bekanntesten.

Smektite weisen eine niedrige Schichtladung auf, die geringer ausfällt als bei Illiten. Dadurch ist eine höhere isomorphe Einbindung möglich, woraus wiederum eine erhöhte Quell- und Schwindeigenschaft besteht. Die spezifische Oberfläche von Smektiten liegt zwischen 600 und 800 m²/g.¹⁸

Vermikulit

Vermikulite gehören zu einer eher seltenen und schlecht definierten Gruppe von Tonmineralen. Ihre Schichtladung liegt zwischen denen der Smektite und der Illite. Aufgrund ihrer Eigenschaft, sich bei Hitze stark auszudehnen, finden Vermikulite in Dämmmaterialien mit Brandschutzeigenschaften Anwendung. Ihre hohe Quellfähigkeit macht sie darüber hinaus für andere Einsatzgebiete interessant, wie beispielsweise Katzenstreu.

Chlorit

Chlorite sind auch als Vierschichtminerale bekannt, da sie sich durch eine fixierte Zwischenschicht auszeichnen, wodurch keine Quellfähigkeit vorliegt. Grundlegend wird in primäre und sekundäre Chlorite unterschieden; Zweiteres liegt bei Mineralneubildung vor. Chlorite weisen in konzentriertem Vorkommen eine dunkelgrüne Farbe auf und bestehen ebenfalls in großer Vielfalt.

Mixed Layer Minerale

Mixed-Layer-Minerale bestehen aus Strukturausbildungen zwischen mehreren Tonmineralen. Sie entstehen durch die wechselseitige Anordnung und Überlappung von Schichten verschiedener Tonminerale. Ein häufig vertretenes Beispiel ist die Verbindung von Smektit und Illit, die als Rektorit bezeichnet wird. Diese Mixed-Layer-Minerale können eine Vielzahl von Eigenschaften und Anwendungen aufweisen, abhängig von der spezifischen Zusammensetzung und Struktur.¹⁹

17 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 15

18 vgl. chemie.de, Smektit

19 vgl. Ottner, 2009 | S. 6

3.2.3 Lehmarten

Weltweit sind unterschiedliche Lehmarten zu finden. Sie entstehen durch Bewegungen auf der Erdoberfläche und gelangen durch natürliche Transportprozesse von deren primären Lagerstätten zu anderen Orten. Durch den Standortwechsel gehen wiederum Veränderungen des Materials einher, wodurch es die Zugehörigkeit der Lehmart wechseln kann. Lehmarten variieren regional aufgrund ihrer Entstehung und den vollzogenen Transportvorgängen. Daher weisen sie verschiedene Erscheinungsformen in den Bodenprofilen auf und eignen sich für unterschiedliche Einsatzgebiete im Lehmbau.

EXKURS Der Schichtenaufbau der obersten Erdkruste wird grundlegend in drei Bodenhorizonte untergliedert. Der A-Horizont beschreibt den humosen Teil eines Bodenprofils. Er enthält organische Anteile, welche die Grundlage für Flora und Fauna bildet. Dieser kann unterschiedliche Ausprägungen der Schichtdicke aufweisen. Humus sowie organische Bestandteile sind im Lehm- bau zu vermeiden. Daher wird die Entnahme von Bodenmaterial für Bauzwecke ab einer Tiefe von mindestens 0,5 Metern empfohlen, um den A-Horizont bei der Materialgewinnung auszuschließen. Lehme befinden sich in der Regel im B-Horizont des Bodenprofils, welcher den mineralischen Unterboden bildet. Der C-Horizont enthält das unverwitterte Ausgangsgestein.

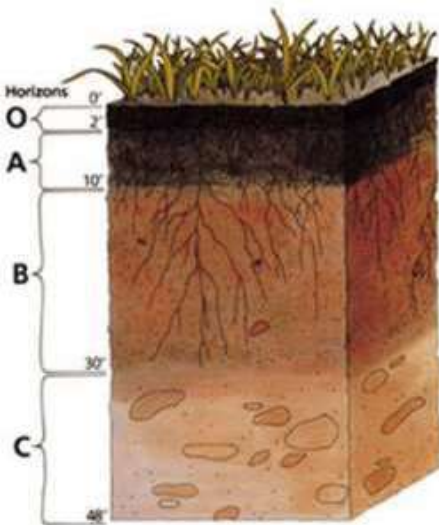


Abb. 3.13 | Bodenprofil Aufbau

Berglehme und Hanglehme

Berglehm ist in Berg- und Hügellandschaften vertreten. Er entsteht aus durch die Verwitterung von tiefliegenden Gesteinsschichten aus u.a. Granit, Gneis, Syenit und stellt deren Verwitterungsrinde dar. Basierend auf den kristallinen Gesteinen weist er vor allem kantige und eckige Gesteinskörner unterschiedlicher Korngrößen auf und kann Durchsetzungen mit größeren Bruchstücken beinhalten.

Hang- oder auch Hängelehme wurden durch Wasser- oder Frosteinwirkung bewegt und befinden sich daher in der Hanglänge, wo sie sich mit bestehenden Schichten verbinden. Die Ordnung nach Korngrößen spielt in den Verbindungsvorgang ein.²⁰

Berg- und Hanglehme eignen sich aufgrund der breiten Korngrößenverteilung und Ausprägung der einzelnen Körner vor allem für die Stampflehmtechnik.

Verwitterungslehm

Verwitterungslehm entsteht durch die Einflussnahme von natürlichen Verwitterungsprozessen, wie Klima und Diagenese. Dabei liegt er ausschließlich an der primären Lagerstätte vor. Der Lehm ist durch ein kantiges Kornbild geprägt und weist zudem eine große Vielfalt an Verwitterungsgraden auf.

Wie der Berg- und Hanglehm eignet sich auch der Verwitterungslehm für Stampflehm.²¹



Abb. 3.14 | Unterschiedliche Lehme im B-Horizont



Abb. 3.15 | Bodenschichten (Kurbadstraße)

Geschiebelehm

Durch die Verlagerung bzw. Gleiten der Gletscher zu den Eiszeiten (Diluvium) entstand die runde Körnung des Geschiebelehms. Ursprünglich ist dieser kalkhaltig (Calciumcarbonat). In den oberen Schichten erfolgte oftmals eine Auswaschung bzw. Auslaugung, was das Eindringen des Calciumcarbonats in tiefere Schichten bewirkte und dort zu erhöhten Konzentrationen führt.²²

Mergel

Mergel ist Geschiebelehm, welcher sich vor allem durch einen erhöhten Kalk- sowie Tonanteil auszeichnet. Oftmals äußert sich der Kalkanteil durch eine weißliche Verfärbung. Bei gleichmäßigen Anteilen der beiden Minerale wird von Mergel gesprochen, bei erhöhtem Vorkommen einer der Komponenten kann zwischen Ton- bzw. Kalkmergel unterschieden werden.

Tonmergel eignet sich als Baulehm und ist aufgrund der erhöhten Festigkeit durch zusätzliche Mineralstrukturausbildung des Calciumcarbonats für druckbelastete Bauteile geeignet. Mergel und Kalkmergel werden als Rohstoff für die Zementherstellung herangezogen.²³

Schwemmlehm

Durch den Wassertransport von Geschiebelehm entstehen Schwemmlehme. Das Wasser bewirkte eine Aufschlammung des Materials an seinem Entstehungsort. Durch das Absinken in stillen Gewässern wurden zum Teil dünne Schichten aus Sand, Kies und Geröll eingeschlossen. Auch Humusanteile können darin vorkommen.²⁴ Durch den Wassertransport und die Lagerstätte unter Wasser ist Schwemmlehm meist weitestgehend kalkfrei.²⁵

Lösslehm

Löss ist ein Sediment mit homogenem und feinem Erscheinungsbild, welches durch Sandstürme während der letzten Eiszeiten entstand. Durch Auslaugung des darin enthaltenen Kalks und dem anschließenden Transport durch Wind zu sekundären Lagerstätten entstand der Lösslehm. Er weist wenig bis keinen Kalkgehalt auf und hat oftmals geringe Tonanteile, was sich in einer niedrigen Bindigkeit des Materials äußert.

Lösslehme sind daher nicht für den Einsatz als statisch belastete Bauteile geeignet, jedoch kann das feine, magere Material oftmals als Lehmputz eingesetzt werden.²⁶

22 vgl. Schneider, Schwimann und Bruckner, 1996 | S. 55

23 ebb.

24 vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 4

25 vgl. Schneider, Schwimann und Bruckner, 1996 | S. 55

26 vgl. Schröder, 2019 | S. 69

3.3.1 Baulehm

Baulehm ist geeignetes Lehmmaterial für die Herstellung von Lehmbaustoffen und weist verschiedene Arten der Gewinnung sowie Zustände bei Anfertigung der Lehmbaustoffe auf. Grundsätzlich wird unterschieden:

Grubenlehm

Als Grubenlehm wird das erdfeuchte Primärmaterial im Lehmbau bezeichnet, welches aus natürlich gewachsenem Boden entnommen wird. Dabei wird zwischen den verschiedenen Lehmarten sowie der Zusammensetzung des Materials nicht unterschieden. Die Voraussetzung für einen Grubenlehm ist der Ausschluss von organischen Bestandteilen, insbesondere Humus, sowie sonstige Verunreinigungen durch Bau-schutt oder Schadstoffe.²⁷

Die Bezeichnung Grubenlehm stammt von der Gewinnung des Materials aus speziellen Lehmgruben, wie es bereits im traditionellen Bau gängig war und auch in der heutigen Lehmgewinnung für die industrielle Fertigung von Lehmbaustoffen gehandhabt wird.

Schröder ordnet Baustellenaushub bei Verwertung im Lehmbau als Sekundärrohstoff der Grubenlehme ein, da dieser nicht primär zur Lehmgewinnung herangezogen wird, sondern als Bauabfall entsteht.²⁸

Trockenlehm und Tonmehl

Trockenlehm stellt das Ausgangsmaterial für viele Lehmbaustoffe dar, welche im getrockneten Zustand - oftmals in Papiertüten - verkauft werden. Trockenlehm wird wie der Grubenlehm als Primärrohstoff aus natürlich gewachsenem Boden gewonnen und wird anschließend künstlich getrocknet.

Tonmehl ist tonhaltiges Material, welches nach der Trocknung gemahlen wird, um in pulverisierter Form als Zuschlagstoff seinen Einsatz zu finden.²⁹

Recyclinglehm

Aus Abbrüchen sowie Sanierungsmaßnahmen gewonnener Lehm wird Recyclinglehm genannt. Dieser liegt bereits in der Rezeptur des Lehmbaustoffes vor, in dem er zuvor seinen Einsatz fand. Verunreinigungen durch Salz, Hausschwammsporen oder Vererdung müssen vor der Wiederverwendung ausgeschlossen werden. Als Aufbereitung des Recyclinglehm müssen gegebenenfalls die Zerkleinerungsprozesse des getrockneten Materials durchgeführt werden.³⁰

Presslehm

Schröder führt zudem als zusätzlich Kategorie den Presslehm auf. Er entsteht als Abfallprodukt bei der Kieswäsche und liegt zunächst in stark aufgeschlammter Form vor. Es handelt sich hierbei um Feinkornanteile im Schluff- und Tonbereich. Bei der

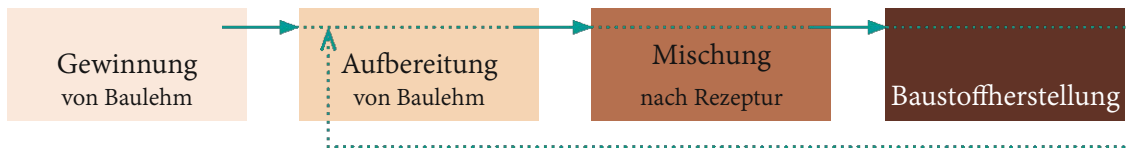


Abb. 3.16 | Baulehm (pro Lehm)

vgl. Schröder, 2019
| S. 79

ebd.
vgl. Schröder, 2019 |
S. 79

vgl. Volhard, Röhlen,
2009 | S. 5



Trockenlegung der Masse muss das Wasser aufgrund der Feinkörnigkeit ausgepresst werden, wodurch die Namengebung des Lehms einhergeht. Derzeit findet diese Art von Lehm keine Anwendung, weder im konventionellen Bauwesen noch im Lehmbau.

Abraumlehm

Aufgrund neuester Entwicklungen im Lehmbau sollte hier eine neue Kategorie entstehen, welche dem sekundären Grubenlehm durch Bodenaushub ähnelt; Es handelt sich um Abraum, welcher bei der Kiesgewinnung anfällt. Viele Kieswerke müssen zunächst metertiefe Schichten von Lehm ausheben, um zu dem eigentlichen Kies zu gelangen.

Im hessischen Kieswerk der deutschen Firma Kimm GmbH & Co. KG liegt eine 10 Meter dicke Schicht aus Lehm bis zur Kiesebene vor. Derzeit stellt die Firma Forschungen zur Herstellung von formgepressten Lehmsteinen* an, wobei bereits erste Produkte auf dem Markt zu finden sind. Für die Materialherstellung wird der anfallende Abraum herangezogen.³¹

A. Natürliche Aufbereitung

Natürliche Aufbereitung ist vorrangig in der Verwertung von Lehm vor Ort zu finden. Für die Aufbereitung ist recht wenig Maschinenaufwand nötig, jedoch bedarf es einer Fläche, die über einen längeren Zeitraum beansprucht wird. Die natürliche Aufbereitung findet unter Wassereinwirkung oder Witterungsbedingungen statt und benötigt teilweise längere Zeitspannen für den Prozess. Energieeinsatz sowie das aktive Eingreifen in die Prozesse sind nicht erforderlich.

A.1 Nasse Aufbereitung

Die Aufbereitung unter Wasserzugabe gewährleistet eine sehr weit fortgeschrittene Dispersion der Tonminerale. Die Homogenisierung kann durch leichtes Rühren stattfinden. Das aufbereitete Material liegt in nasser Form vor. Es eignet sich in erster Linie zur Vermengung mit trockenen Zuschlagstoffen und nicht für den direkten Einsatz – Lehmschlacken bilden die Ausnahme.

* deutsche Bezeichnung für ungebraunten Lehmziegel

SUMPFFEN Beim Sumpfen wird der Lehm für mehrere Tage in Wasser eingeweicht. Das hat zur Folge, dass Wassermoleküle in die Schichten der Tonminerale eindringen und deren Anziehungskräfte aufheben, wodurch sie dispergieren. Diese Aufbereitungsweise eignet sich vor allem für fette Lehme, welche im erdfeuchten Zustand aufgrund der stark ausgeprägten Bindekraft schwer zu verarbeiten sind. Die benötigte Zeit für das Dispergieren ist von den enthaltenen Tonmineralen, dem Feuchtegrad des Lehms sowie dessen Zustand – groß- oder kleinklumpig – abhängig.³³

MAUKEN Mauken ähnelt der Technik des Sumpfens, bezieht jedoch einen Fäulnisprozess durch das Vorhandensein von organischen Bestandteilen mit ein. Der Vorgang findet dementsprechend über einen längeren Zeitraum statt. Durch Algen und Bakterien wird dabei eine Erhöhung der Plastizität bewirkt.³⁴

- 31 Mehr dazu s. Karlhorst Klotz: Industrielle Herstellung große Lehm- bausteine für tragendes Mauerwerk, 05.05.2023 | <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/baustoffe/industrielleherstellung-grosser-lehm-bausteine-fuer-tragendes-mauerwerk/> [15.04.2024]
- 32 Interview, Christof Ziegert
- 33 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 29
- 34 vgl. Schröder, 2019 | S. 135

3.3.2 Aufbereitung von Lehm

„Es ist [...] in den meisten Fällen eine Frage des Aufwandes für die Aufbereitung und nicht der generelle Einsatz.“⁵²

Christof Ziegert

Zielstellung der Aufbereitung ist die Homogenisierung des Materials zu einer verarbeitbaren Masse bzw. die Transformation von Boden zu einem Baustoff. Einige Aufbereitungsprozesse inkludieren bereits die Vermengung des Lehms mit Zuschlagstoffen.

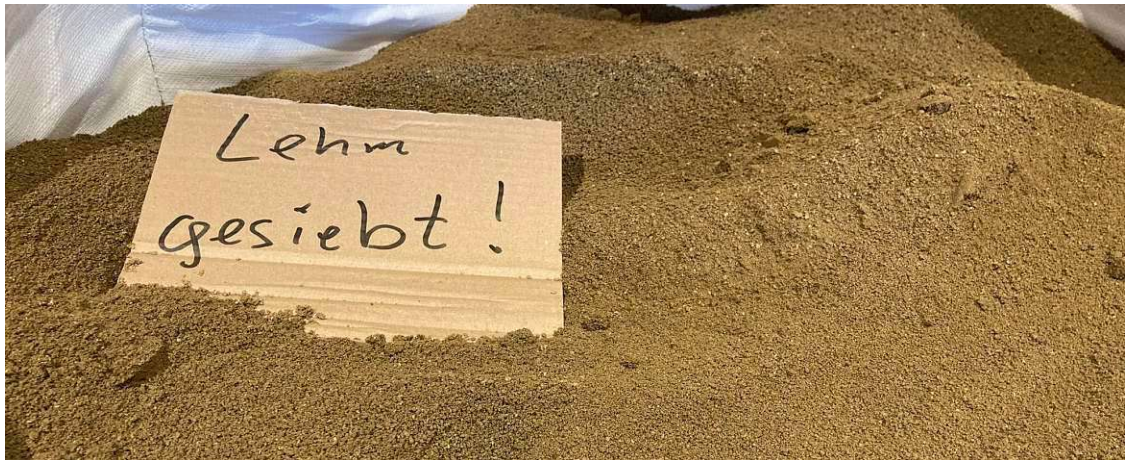


Abb. 3.17 | Aufbereiteter Baulehm (pro Lehm)

A.2 Witterungsbedingte Aufbereitung

Die Aufbereitung durch Einwirkung von Witterung ist meist ein über Monate hinweg andauernder Prozess, wodurch sie einer längeren Planung bedarf. Für die Aufbereitung ist keinerlei Energieeinsatz – mit Ausnahme des Aufschichtens – notwendig. Sie benötigen Lagerfläche, die den Einfluss von Temperatur und Niederschlag zulassen.

AUSWINTERN Das Auswintern beschreibt den Zerkleinerungsprozess des Materials durch den Frost-Tau-Wechsel. Dafür wird der Lehm im erdfeuchten Zustand über die Winterzeit in etwa 1 Meter hohen Wällen gelagert. Das eingelagerte Porenwasser des Lehms erfährt bei Frost eine Volumenvergrößerung, wodurch klumpiges Material aufgesprengt wird. Durch einfache Mischvorgänge kann es anschließend homogenisiert werden.

AUSSOMMERN Beim Aussommern wird das Material ebenfalls den klimatischen Bedingungen im erdfeuchten bis wechselfeuchten Zustand ausgesetzt. Durch Quell- und Schindvorgänge innerhalb des Materials wird tonhaltiges Material gelockert, da die Anziehungskräfte der Tonteilchen temporär geschwächt werden.

B. Mechanische Aufbereitung

Die mechanische Aufbereitung unterscheidet sich von der natürlichen durch den aktiven Prozess, indem Energie investiert wird. Sie läuft zumeist in kürzer Zeit ab, wobei mineralogische Veränderungen durch Krafteinwirkung nicht auszuschließen sind.

B.1 Erdfeuchte Aufbereitung

KOLLERN Beim Kollervorgang drücken zwei Walzen das erdfeuchte Material durch ein Sieb mit definierter Maschenweite im Grobkornbereich, wodurch der Lehm eine Durchmischung erfährt. Tonklumpen werden dabei aufgelöst und gröbere Körnung zerkleinert. Dadurch kann eine maximale Korngröße für das Ausgangsmaterial definiert werden. Das Kollern ist ein Prozess, der aus der Ziegelindustrie stammt und sich daher auch für fettere Lehme eignet.

AUFMISCHEN Das Aufmischen von Lehm im erdfeuchten Zustand wird vor allem für die Zugabe von Wasser und Zuschlagstoffen verwendet. Durch das Aufmischen können vorrangig magere Lehme bearbeitet werden, die weniger zur Agglomeration neigen. Für den Vorgang werden unterschiedliche Maschinen eingesetzt – vom Zwangsmischer zu industriellen Mischanlagen in größeren Maßstäben. Die Konsistenz und Zuschlagstoffe der Lehmmischung spielen in die benötigte Leistungstärke der Mischmaschine ein.

B.2 Nassaufbereitung

AUFSCHLÄMMEN Das Aufschlätten (auch Aufquirlen) ist ein mechanisierter Aufbereitungsprozess, der zumeist auf das Einmauken von Lehm folgt und zur Homogenisierung des Materials führt. Durch das Absetzen von Grobkorn kann dadurch zudem eine Trennung nach Korngrößen erfolgen. Einsatz findet diese Aufbereitungsmethode überwiegend bei der Herstellung von Lehmputzen.

B.3 Trockenaufbereitung

SIEBEN Die Siebung von Lehm kann abhängig vom Tongehalt am trockenen bis höchstens erdfeuchten Material durchgeführt werden. Grundsätzlich werden eher magere Lehme zur Siebung herangezogen, da die Wahrscheinlichkeit der Agglomeration innerhalb des Materials gering ausfällt. Bei der Siebung geht es vor allem um die Erzeugung einer definierten maximalen Korngröße. Sie findet zumeist durch Vibration, Vor- und Rückbewegung oder einer Rotation des Siebs statt.

MAHLEN Für den Mahlvorgang muss der Lehm in getrockneten Zustand vorliegen. Gebildete Agglomerate werden während des Trocknungsvorgangs durch Quetschung pulverisiert, wobei maximale Korngrößen von 0,5 bis 4 mm produziert werden.³⁵ Das durch Mahlwerke aufbereitete Material wird oftmals zur Herstellung von Trockenprodukten herangezogen. In der Maschinerie wird zwischen Kugel- und Walzenmühlen unterschieden.



Abb. 3.18 | Zuführung von luftgetrocknetem Material in den Beschicker (pro Lehm)

35 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 29



Abb. 3.19 | Siebung im Silo



Abb. 3.20 | Mischanlage und Abfüllung

Aktuelle Aufbereitung in der Praxis

In der Regel werden in der industriellen Aufbereitung von Lehm zur Baustoffherstellung mehrere Verfahren kombiniert. Beim Abbau in Lehmgruben wird ein ausgeglichenes Abgreifen der verschiedenen Schichten angestrebt, um eine möglichst gleichbleibende Zusammensetzung des Materials zu gewährleisten. Die Zuführung des Materials in den industriellen Aufbereitungsprozess ist durch die Regulation durch den Beschicker gegeben. Je nach Baulehm und gewünschtem Baustoff sind anschließend unterschiedliche Verfahren geschaltet, welche die Aufbereitung in unterschiedlichen Schritten beinhalten. Es gilt jedoch hervorzuheben, dass vor allem bei trockenen Lehm- bauprodukten aus einem Material verschiedene Ausgangsstoffe für Baustoffe hergestellt werden, was einen effizienten Umgang mit dem Material bedeutet. Der Lehm wird dabei zur Gänze verwertet, wodurch keine Abfallprodukte im Aufbereitungsverfahren entstehen.

Der österreichische Lehmstoffproduzent proLehm Frauwallner GmbH & Co KG stellt Trockenmischungen für verschiedene Lehmstoffe her. Nach dem Abbau des Rohmaterials nutzt die Firma zunächst einen natürlichen Aufbereitungsprozess und geht dafür in eine Art saisonale Arbeit. Dabei wird der Lehm im Herbst in einer Lehmgrube abgebaut und auf dem Grundstück der Firma in einer ca. 1 Meter hohen Schicht ausgelegt. In den Folgemonaten wintert der Lehm aus, was eine Vorstufe der maschinellen Aufbereitung darstellt (siehe Abb. 3.16). Dieser Schritt bedarf Planung, denn das vor dem Winter ausgelegte Material bildet den Vorrat für ein ganzes Jahr.

Mit Beginn der Frühlingsmonate wird Lehm weiterverarbeitet. Dafür wird die trockene Oberschicht des Lehmvorrats abgetragen und zur weiteren Trocknung überdacht gelagert; die Lagerfläche ist dabei so ausgerichtet, dass die Nutzung der Sonneneinstrahlung für den Vorgang genutzt werden kann. Anschließend wird der Lehm im luftgetrockneten Zustand mit einem Radlader in den Beschicker gefüllt, der das Material kontinuierlich einem Mahlwerk zuführt (siehe Abb. 3.18).

Nach der Zerkleinerung und dem Aufbrechen von Agglomeraten gelangt das Material über ein Förderband in einen luftdichten Silo. Dort findet die Aufteilung des Materials durch Siebung statt. Dadurch entstehen Ausgangsmaterialien mit variierenden Korngrößen für unterschiedliche Lehmstoffe.

Ein umfunktionierter Mischer aus der Betonindustrie ermöglicht den modernen Umgang beim Mischprozess. In großen Mengen können hier die jeweiligen Zuschlagstoffe mit dem Baulehm vermengt werden – abhängig von den individuellen Rezepturen der einzelnen Baustoffe. Durch ein modernes Abfüllverfahren findet das fertige Lehmprodukt seinen Weg in die Bauwelt.

Die Vorgehensweise der Firma proLehm Frauwallner GmbH & Co KG schöpft bei der Aufbereitung das volle Potenzial des Materials aus; Neben den Einbezug natürlicher Prozesse in Kombination mit der maschinellen Bearbeitung wird der Lehm restlos verwertet, was das angestrebte Ziel bei der nachhaltigen Lehmstoffherstellung sein sollte.

3.3.3 Lehmbaumstoffe

Im Folgenden werden neben einer kurzen Vorstellung der verschiedenen Lehmbaumstoffe vor allem auf deren Anforderungen an den Lehm als Rohstoff, dem Baulehm, eingegangen. Dieser bezieht sich dabei auf den natürlichen gewachsenen Boden, welcher in der Regel bei Aushub anfällt.

A.1 Lehmziegel / Lehmsteine (LS)

*„Das Schöne ist, dass die Ziegeleien für die Lehmsteinproduktion in ihrem Ablauf nichts umstellen müssen. Für die Lehmsteinherstellung muss der Produktionsverlauf für Ziegel nicht geändert werden, außer dass die Lehmsteine nach dem Trocknen vor dem Brennofen abzweigt werden.“*³⁶

Christoph Liebrich

Lehmziegel (Deutschland: Lehmsteine) gewinnen aufgrund ihrer praktischen Verwendung im aktuellen Baugeschehen immer mehr Bedeutung. In Deutschland ist durch die *DIN-Norm 18940*³⁷ Gebäudeklasse 4 im tragenden Mauerwerk aus Lehmziegeln möglich.³⁸ Der Lehmbaumexperte Christoph Liebrich verweist auf die Nutzung vorhandener Strukturen der Ziegelerstellung. Ein vermehrter Einsatz des Baustoffes in naher Zukunft ist daher vorstellbar und wird von der Lehmbaumbranche in Deutschland forciert. Aufgrund der Nutzung bestehender Strukturen gibt es derzeit bereits einen vielfältigen Markt an Lehmziegeln.³⁹ Die Rezeptur unterscheidet sich von den herkömmlichen Grünlingen der Ziegelproduktion. Während der Tonanteil von gebrannten Ziegeln relativ hoch ist, wird für Lehmziegel eine weniger fette Mischung herangezogen. Damit sollen starke Quell- und Schwindprozesse vermieden werden. Es werden vermehrt sandige Lehme verwendet, wobei Sand als Zuschlagstoff zugeführt werden kann.⁴⁰ Die Lehmischung können auf unterschiedliche Weise verarbeitet werden. Im traditionellen Bauwesen wurden diese im Handstrichverfahren (formgeschlagen) hergestellt, welche die Einbringung der Masse in Models und dem anschließenden Abstreichen beschreibt. Neben den formgepressten Lehmziegeln ist auch die Herstellung im stranggepressten Verfahren möglich.⁴¹ In der DIN 18945 werden Rohdichte- und Druckfestigkeitsklassen für Lehmziegel definiert, wodurch sich Anwendungsklassen ergeben.⁴²

A.2 Stampflehm (STL)

„Ursprünglich ist der Stampflehm der erste Schalungsbau gewesen und daraus ist der Betonbau entstanden.“

Jörg Meyer, Conluto

Aktuell wird Stampflehm aufgrund seiner ästhetischen Wandoberflächen, auf welchen sich der Schichtverlauf des Herstellungsprozesses abzeichnet, als Vorzeigeobjekt vom modernen Lehmbaum angeführt. Bei der Lehmbaumtechnik handelt es sich um eine Massivbauweise, welche konstruktive Funktionen übernehmen kann. Neben Wandelementen wird die Stampflehmtechnik auch zu Herstellung von Vorsatzschalen, formgepressten Lehmziegel oder horizontal verlegten Stampflehm Böden verwendet. Wandelemente aus Stampflehm können vor Ort oder im Vorfertigungsverfahren hergestellt werden, wobei die Anfertigung dem konventionellen Baustoff Beton am nächsten kommt.

Bei dem Baustoff handelt es sich um eine Lehmischung mit breiter Körnungslinie und hohem Grobkornanteil. Besonders eignen sich demnach Verwitterungs- und Geschiebelehme für die Lehmbaumtechnik.⁴³ Der bindige Ton macht in dem Baustoff einen recht geringen Anteil aus, weshalb meistens mineralische Zuschläge bei den Rohlehm in Form von Sand, Kies und Splitt notwendig sind. Für magere Baulehme wird ein Mischverhältnis von Lehm und Zuschlagstoffen von 1:1 oder 1:2 angenommen, während bei fetten Baulehm ein Verhältnis von 1:2,5 empfohlen wird.⁴⁴

Verarbeitet wird das Material im erdfeuchten Zustand und wird in 10 bis 12 cm hohen Schichten in Arbeitsschalungen eingebracht und verdichtet. Durch die Komprimierung erlangt der Baustoff eine Rohdichte von 1.700 bis 2.400 kg/m³.⁴⁵ Durch den geringen Wassergehalt des Materials fällt das Schwindmaß gegenüber anderen Lehmbaumtechniken wesentlich geringer aus, während durch die intensive Verdichtung eine hohe Druckfestigkeit generiert wird.⁴⁶

36 Interview, Christoph Liebrich
37 mehr dazu s. DIN 18940 – Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung, Juni 2023
38 vgl. Interview, Christof Ziegert
39 mehr dazu s. Minke, 2022 | S. 70
40 vgl. Minke, 2022 | S. 75
41 vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 35 ff
42 mehr dazu s. DIN 18945 – Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung, März 2024
43 vgl. Schröder, 2019 | S. 177
44 vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 21 ff
45 ebd.
46 vgl. Minke, 2022 | S. 60

A.3 Wellerlehm (WL) / G'satzes Mauerwerk

Aufgrund erhöhter Trocknungszeiten und Arbeitskraftaufwand zählt das G'satzes Mauerwerk in Österreich zu den historischen Lehmbauweisen und kommt häufig in der Sanierung vor. Der Wellerlehm-bau ist eine Massivbauweise, welche tragend und nicht tragend ausgebildet werden kann. Das Material weist einen erhöhten Wassergehalt auf, wodurch eine manuelle Aufschichtung erfolgen kann. Durch das anschließende sogenannte „Abstechen“ der Wände ist eine Errichtung ohne Schalung möglich.

Für die Anfertigung eines Wellerlehmbaus besteht in der Regel keine besonderen Anforderungen an den Baulehm bezüglich seiner Bindekraft; die Verarbeitung von sehr fettem Lehm und Ton ist jedoch problematisch aufgrund des starken Schwindverhaltens. Zudem sollte der Baulehm keine Korngrößen oberhalb Kieses aufweisen. Als Zuschlagstoffe werden Stroh oder andere geeignete Faserstoffe hinzugezogen. Die Trockenrohichte dieses Materials variiert je nach Faseranteil zwischen 1400 und 1700 kg/m³.

In der Aufbereitung wird das Stroh oder andere Pflanzenfasern mit dem Baulehm und Wasser zu einer plastischen Masse vermennt und ruhen gelassen, damit sich die Feuchtigkeit im Material verteilt. Danach wird das Material zu einer Wand aufgeschichtet und nach einigen Tage mit einem Spaten abgestochen, um eine gerade Wandfläche zu generieren.

A.4 Lehm-Putzmörtel

Lehmmörtel umfasst die Baustoffe Lehm-Mauermörtel (LMM), Lehm-Putzmörtel (LPM) und Lehmspritz-Mörtel (LSM) und ist der am meisten verbreitete Lehmstoff in der Baubranche nördlich des Äquators. Durch den niederschweligen Zugang weist er ein hohes Potenzial für den großmaßstäblichen Einsatz auf. Lehmmörtel gibt es in unterschiedlicher Ausführung: gröberes Material mit höherer Bindekraft bilden beispielsweise Unterputze und Mauermörtel aus, während feineres Material für Oberputz verwendet wird.

Für die Herstellung von Lehmmörtel werden in der Regel magere feinkörnige Baulehme mit Korngrößen <5 mm herangezogen.⁴⁷ Die Mischungen verfügen über hohe Anteile von Sand und Schluff mit einem Tonanteil von 5 bis 10 Prozent.⁴⁸ Oftmals sind Faserzuschläge enthalten, wie Strohhacksel oder

Zellulosefasern, welche die Ausbildung von Schwindrissen verhindern sollen. Das Ziel der Mischung ist einen geeigneten Grad der Abmagerung des Materials zu finden, in welchem keine Schwindrisse auftreten und zugleich genügend Bindekraft für die Haftung und Abriebfestigkeit vorhanden ist.

Lehmmörtel wird mit einem recht hohen Wassergehalt angebracht, um das Verstreichen und das Glätten des Materials zu gewährleisten. Neben dem manuellen Anwerfen von Lehmputz ist es auch möglich diesen im Spritzverfahren anzubringen, wofür gewöhnliche Spritzgeräte für Putz zum Einsatz kommen. Mauermörtel wird im gängigen Verfahren mit Kellen aufgebracht, wobei moderne Techniken aktuell erprobt werden. Der Untergrund sollte für die Putzanbringung etwas angeraut sein sowie angefeuchtet werden. Zur Vermeidung von Schwindrissen können zudem bei Bedarf Armierungsgewebe eingebracht werden. Lehmputz wird aktuell auch für die Einbindung von vertikalen Flächenheizungen verwendet, während sich seine Speichermasse positiv auf die Wärmeverteilung ausübt.

Lehmplatten (LP)

Lehmplatten (LP) sind Baustoffe, die in Innenräumen und witterungsgeschützten Außenbereichen eingesetzt werden. Sie werden überwiegend für nicht tragende Trockenbauwände oder für die Ausfachung von Balkendecken und Dachschrägen verwendet.

Die Zusammensetzung der Lehmstoffe beinhaltet sowohl organische als auch mineralische Zusatzstoffe wie natürliche Gesteinskörnungen, Ziegelsplitt, Bläperlit und Naturbims, aber auch Pflanzenfaser, Holz, Zellulosefasern und Tierhaar. Eine homogene Vermengung ist für die Ummantelung der Zuschlagstoffe mit Lehm notwendig, womit der Zusammenhalt der Komponenten gewährleistet wird. Für verbesserte mechanische Eigenschaften können Lehmplatten im Kern oder an der Oberfläche mit Matten (z.B. Schilf) oder Geweben (z.B. Jute) bewehrt werden.

Zur Herstellung dieser Lehmstoffe kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, wie Streichen, Stampfen und Pressen, die je nach Produkt und Hersteller variieren können. Lehmplatten können vermauert oder trocken eingebaut werden. Hierfür werden sie mit gängigen Verbindungsmitteln befestigt.⁴⁹

Lehmschüttungen (LT)

Lehmschüttungen sind eine Form von rieselfähigen Lehmbaustoffen, die aus Baulehm gefertigt werden. Die Hauptanwendung von Lehmschüttungen ist die Verfüllung von waagrechten Bauteilen, wie beispielsweise Geschossdecken. Auch in horizontal angefertigten Wandelementen oder als Einfüllungen finden sie Einsatz im Bauwesen.

An den Baulehm gehen keine besonderen Anforderungen für die Herstellung von Lehmschüttungen einher. Oftmals enthalten sie Zuschlagstoffe, wie Sand, Holz oder Stroh, jedoch kann Baulehm auch in seinem Rohzustand verwertet werden, was sich auch in der spezifizierten Namensgebung widerspiegelt, wie Holzleichtlehmschüttung, Strohlehm-schüttung oder Baulehmschüttung. Basierend auf ihrer Trockenroh-dichte wird unterschieden; Lehmschüttungen haben eine Rohdichte von über 1200 kg/m^3 , während Leichtlehmschüttungen eine Dichte zwischen 300 und 1200 kg/m^3 aufweisen.

Verarbeitet werden die Mischungen in leicht angefeuchteten Zustand, wobei die Wasserzugabe hauptsächlich der Staubbildung entgegenwirken soll.⁵⁰

Leichtlehm (LL)

Leichtlehm ist eine Mischung aus Baulehm, Wasser sowie organischen oder mineralischen leichten Zusatzstoffen. Der Baustoff wird aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften vor allem in Bereichen eingesetzt, die eine geringere Trockenroh-dichte fordern, wie beispielsweise isolierende Schichten in Wänden oder Decken. Im traditionellen Bauen ist er in der Ausfachung von Fachwerkhäusern vertreten.

Die Zusammensetzung des Leichtlehms variiert stark. Es gibt leichte Mischungen mit einer Dichte von 300 bis 800 kg/m^3 und schwerere Mischungen, deren Dichte bei 800 bis 1200 kg/m^3 liegt. Zu den organischen Zusatzstoffen zählen Stroh, Fasern und Holzhack-schnitzel, die jeweils die Kategorien Strohleichtlehm (SLL), Faserleichtlehm (FLL) oder Holzleichtlehm (HLL) führen. Ein mineralischer leichter Zusatzstoff ist Blähton, der zur Herstellung von mineralischem Leichtlehm (MLL) verwendet wird.

Die Verarbeitung von Leichtlehm erfordert die Anpassung der Bindigkeit des Baulehms an die Menge und Art der Zusatzstoffe. Für schwerere Mischungen sind magere Lehme herzustellen, während sich für leichtere Mischungen fette bis sehr fette Baulehme eignen.

Faserlehm, Strohlehm (FL, SL)

In der Anwendung wird Faserlehm und Strohlehm vielfältig eingesetzt, wobei sie sich in der Regel auf nicht tragende Konstruktionen beschränken. Aufgrund der Dämmwirkung werden sie beispielsweise als Ausfachung und Verfüllung von Holzkonstruktionen verwendet, aber auch für putzartige Wandschichten oder Lehmsteine und -platten.

Stroh- und Faserlehme bestehen aus Mischungen von sehr mageren bis mageren Baulehm und organischen Faserstoffen, wie Stroh oder Heu. Die Trockenroh-dichte des Materials ist abhängig von der Menge der organischen Zuschläge und variiert zwischen 1200 und 1700 kg/m^3 . Die Zuschlagdichte soll dabei möglichst hoch sein; bei Strohlehmen kann sie zwischen 40 und 60 kg/m^3 betragen.

Der Baustoff wird in breiartiger Konsistenz mit den pflanzlichen Fasern von 5 bis 25 cm Länge verarbeitet. Sie ist vergleichbar mit der Verwertung von Wellerlehm.⁵¹

50 vgl. Schröder, 2019 | S. 184 ff.
vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 33 ff.

51 vgl. Schröder, 2019 | S. 181
vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 26



4. *Eignungsprüfung von Baulehm in der Vorbereitung*

4.1 Zielsetzung

Die Haltung Niemeyers gegenüber der Methodik der Materialprüfung von Lehm spiegelt sich auch heute vermehrt in der Fachliteratur und im allgemeinen Meinungsbild wider – besonders im Feld der Beurteilung von möglichen Baulehm. Lehmbauexpert:innen besitzen die Kenntnisse und Fähigkeiten, Lehm mit einfachen Feldversuchen erfolgreich zu bewerten und stellen sozusagen die personifizierten Lehmprüfverfahren dar. Dieser Aspekt zeigt, wie greifbar der Baustoff ist und wie viel er in seiner Natürlichkeit über sich aussagt. Dem gegenüber stehen heute zum Teil recht alte Prüfmethode sowie aufwand- sowie kostenintensive Laboranalysen.

Aufgrund des Bestrebens der vorliegenden Arbeit die Potenziale von Aushub im Lehmbau zu untersuchen, ist es alternativlos die Eignungsprüfungen von Baulehm zu analysieren. Boden und der daraus entnommene Aushub ist bezüglich seiner Zusammensetzung nicht nur regional sehr verschieden, sondern kann sich bereits in wesentlich kleineren Flächen dimensionen unterscheiden - Bodenveränderungen können innerhalb von wenigen Metern stattfinden. Daher ist die Eignungsprüfung von Baulehm eine Notwendigkeit für die Verwendung von Aushub im Lehmbau.

Das Ziel dieser Arbeit forciert jedoch nicht die Bewertung einzelner Proben von Aushub, sondern befasst sich vielmehr mit den aktuellen Prüfmethodiken. Dabei werden unterschiedliche Aspekte der Verfahren geschildert, die sich mit der Praktikabilität dieser im Praxisgeschehen auseinandersetzen.

„Gegen das vorbeschriebene Verfahren (Achterlingsprüfung) hat ein reiner Wissenschaftler den Einwurf erhoben, daß es wissenschaftlich nicht genau genug begründet sei. Das Verfahren ist gewiß ein mixtum compositum aus Physik und praktischer Erfahrung. Demgegenüber ist man bereits nach dem ersten Weltkriege und heute wieder dem Lehm mit scharfgeschliffenen wissenschaftlichen und sehr langwierigen Methoden zu Leibe gerückt, ohne aber ein praktisch brauchbares Ergebnis zu erzielen.“⁴

Richard Niemeyer | 1944

Niemeyer, 1982 | S. 42

4.2 Eignungsprüfung von Baulehm vers. Baustoffprüfung

Grundsätzlich müssen die Materialprüfungen im Lehm- bau in 2 Sparten unterschieden werden. Zum einen gibt es die sogenannte Eignungsprüfung von Baulehm, welche das Rohmaterial analysiert, zum anderen sind verschiedene Baustoffprüfungen im Lehm- bau vorhanden. Dabei gehen beide Prüfungen nahtlos ineinander über: Schröder definiert den Baulehm als geeigneten Lehm für die Herstellung von Lehm- baustoffen.² Die Eignungsprüfung von Baulehm untersucht dementsprechend das Ausgangsmaterial für Lehm- bauprodukte auf seine Zusammensetzung und Eigenschaften. Die daraus resultierenden Ergebnisse geben an, ob das Material für Lehm- baustoffe verwertbar ist. Zudem werden Tendenzen für geeignete Verwertungen erkenntlich, wobei eine direkte Festlegung des daraus herzustellenden Lehm- baustoffes durch die Baulehmprüfung nicht gegeben ist. Niemeyer führt hierzu ergänzende Prüfungen sowie Erfahrungswerte auf, was nach heutigem Wissenstand noch zutreffend ist.³ In Bezug auf Aushubmaterial bildet die Eignungsprüfung von Baulehm die Grundlage für dessen Verwertung im Lehm- bau, da darin Themen der Nutzbarkeit und Verarbeitbarkeit sowie Ansätze zur Klassifizierung behandelt werden.

Die Baustoffprüfung kann auf der Eignungsprüfung von Baulehm aufbauen und setzen sich wesentlich detailreicher mit den bauphysischen Eigenschaften der jeweiligen Lehm- bauprodukte auseinander. Durch die variierende Zusammensetzung von Lehm ist auch die Rezeptentwicklung des gewünschten Baustoffes abhängig vom Standort bzw. der Materialbeschaffenheit. Die Rezeptentwicklung verläuft parallel zur Baustoffprüfung und erforscht in meist mehreren Durchläufen die ideale Mischung für einen bestimmten Lehm- baustoff aus dem individuellen Ausgangsstoff.

Die Baustoffprüfung und Rezeptentwicklung sind aktuell sehr zeit- und kostenaufwändig und werden bis dato nur von wenigen Lehm- bauexpert:innen oder entsprechenden Einrichtungen angeboten. Die Eignungsprüfung von Baulehm wird wohl im Verhältnis noch seltener betrieben. Grund hierfür ist, dass der Wunsch eines bestimmten Lehm- baustoffes oftmals der eigentlichen Analyse des Materials vorausgeht, was nicht immer die materialgerechteste sowie ökologischste Vorgehensweise abbildet.



Abb. 4.01 | Aushub



Abb. 4.02 | Baustoff

² vgl. Schröder, 2019 | S.78
³ vgl. Niemeyer, 1982 | S.31

4.3 Momentaufnahme zur Eignungsprüfung von Baulehm

Boden ist vielfältig sowie variabel und stellt die Grundlage für den Lehm- und Ziegelbau dar. Ob sich Bodenaushubmaterial für den Lehm- und Ziegelbau eignet, muss bei jedem neuen Standort geprüft werden. Die Fachliteratur definiert diesen Vorgang als Eignungsprüfung von Baulehm.⁴ Sie setzt sich aus verschiedenen Verfahren zusammen, die zusammengefasst das Ergebnis der Fragestellung der Verwertbarkeit des vorliegenden Materials als Bauwesen beantworten sollen.



Abb. 4.03 | ZRS Labor

4.3.1 Normen und Richtlinien

Die Eignungsprüfung von Baulehm ist nicht genormt. Während Österreich auch im historischen Kontext kaum normierte Richtlinien in der Lehm- und Ziegelbaupraxis aufweist, wurde in Deutschland 1952 eine Norm für die Prüfung von Baulehm veröffentlicht – die *DIN 18952 Baulehm, Blatt 1: Begriffe, Arten | Blatt 2: Prüfung von Baulehm*. Das 3-seitige Dokument der *DIN 18952 Bl.2* wurde jedoch 1971 mit weiteren Lehm- und Ziegelbaunormen ersatzlos aufgehoben und bildet bis dato das einzige Normenwerk spezifisch zur Prüfung von Baulehm im deutschsprachigen Raum.⁵ Im aktuellen Baukontext ist das deutsche Regelwerk *Lehm- und Ziegelbau Regeln* des DVL e.V. nicht nur eine der aktuellsten, sondern auch die einzige Richtlinie, welche die Eignungsprüfung von Baulehm inkludiert. Zudem gibt es das *Technische Merkblatt TM05: Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehm- und Ziegelbaustoffe – Richtlinie* vom DVL e.V. aus dem Jahr 2011, welches die Prüfmethoden der *Lehm- und Ziegelbau Regeln* für industrielle Zwecke ausführt.

4.3.2 Prüfstellen

Aufgrund der fehlenden Regelwerke sowie Defizite in der Forschung und Entwicklung von Verfahren gibt es in Österreich aktuell keine offiziellen Prüfstellen, die auf die Eignungsprüfung von Baulehm spezialisiert sind. Es besteht die Möglichkeit Lehm- und Ziegelbauexpert:innen ausfindig zu machen und deren Einschätzung bezüglich des vorliegenden Lehms einzuholen. Oftmals sind diese auf bestimmte Lehm- und Ziegelbautechniken ausgerichtet, weshalb die Anfrage meist bereits spezialisiert sein sollte. So ist es vorteilhaft vorab zu wissen, für was man den Lehm tendenziell nutzen möchte.

In Deutschland gibt es aktuell 2 offizielle Anlaufstellen, welche die Eignungsprüfung von Lehm anbieten. ZRS Architekten und Ingenieure führen Materialprüfungen für Lehm- und Ziegelbaustoffe sowie die Eignungsprüfung für Baulehme nach den *Lehm- und Ziegelbau Regeln* und den Ergänzungen der *Lehm- und Ziegelbau-Praxis – Planung und Ausführung* von Ziegert und Röhlen durch.

Die Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA) führt zudem umfangreiche Eignungsbeurteilungen für Baulehm aus. Diese geschehen oft mit konkreten Zielvorstellungen eines Baustoffes. Die Verfahren umfassen vorrangig Laborprüfung und beziehen unter anderem Verfahren aus der Mineralogie mit ein.

vgl. Volhard, Röhlen,
2009 | S. 5-15

4.3.3 Kosten

Angaben zu Kosten sind aufgrund des variierenden Umfangs der Prüfungen angepasst an Vorhaben und Projekt nicht allgemeingültig zu treffen. Der Markt in diesem Feld ist aktuell recht sehr eingeschränkt, während sich die Prüfungen oftmals aufwändig gestalten und die Durchführenden noch immer viel Verantwortung für die Ergebnisse übernehmen müssen. Daher sind die anfallenden Kosten nicht vergleichbar mit Materialprüfungen bestehender Rohstoffe.

Der Lehmexperte Christof Ziegert von ZRS Ingenieure GmbH führt Kosten von ca. 2.000 Euro für die Eignungsprüfung von Baulehm mit anschließender Rezeptentwicklung an.⁶ Die Eignungsprüfung könnte nach dieser Angabe günstiger ausfallen, wobei bei festgestellter Eignung eine weiterführende Rezeptentwicklung für einen Lehmabbaustoff im Anschluss durchaus sinnvoll ist, auch wenn dieser zum Zeitpunkt der Durchführung der Eignungsprüfung noch nicht bekannt ist.



Abb. 4.04 | Lehm als Rohstoff

4.3.4 Forschung und Entwicklung

Die Nutzung von Aushub im Lehmabau ist eine aktuelle Thematik, mit der sich auch einige Forschungsprojekte beschäftigen. In Österreich gibt es einige Forschungsprojekte, die sich direkt mit der Thematik Aushub und dessen Nutzung befassen:

1. *Clay to stay* (Mai 2021 – April 2023) ist ein Forschungsprojekt vom Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie GmbH (IBO), welches sich mit der regionalen Nutzung von Lehm als Aushub auseinandersetzt. Im Rahmen des Projektes wurden zudem Ansätze der Materialprüfungen von Aushub durchgeführt.⁷
2. Der Teilbereich (Arbeitspaket 3) *Drehscheibe Aushub* des groß angelegten Forschungsprojekts *Erdbebewegungen*, welches ebenfalls vom Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie GmbH (IBO) durchgeführt wird, befasst sich aktuell mit der Thematik Aushub im Lehmabau.⁸
3. Das Projekt *LeWeLas – Lehm als Werkstoff für Lärmschutzwände im System Bahn* der FH St. Pölten beschäftigt sich mit der Nutzung von anfallendem Aushub im Straßenbau für Schallschutzwände. Ziel ist die Entwicklung eines Systems für die direkte Nutzung von Aushub bzw. mit möglichst wenig Aufbereitungsaufwand und Rezeptentwicklung.⁹

In Deutschland steigt die Industrie in die Nutzung von großflächigem Abraum in die Forschung ein. Ein Vorreiter stellt die Firma Kimm GmbH dar, welche den Abraum von ihrer Kiesgrube in Hessen zur Herstellung von formgepressten Lehmziegeln nutzt. Die Lehmschicht an besagtem Standort fällt mit einer Schichtdicke von bis zu 10 Metern aus und fand bisher keine Verwertung.

In der Schweiz sind hingegen andere Ansätze vorhanden. So sind auf deren digitaler Lehmabbaubörse¹⁰ immer wieder Anzeigen von Privatpersonen zu finden, welche Lehmaushub anbieten. Die Austauschplattform *Terraterre*¹¹ ist spezifisch auf Aushub ausgelegt und bietet in der Westschweiz die Möglichkeit Böden nach verschiedenen Kriterien zu erwerben und anzubieten.

5 vgl. Rischaneck, 2022 | S.116 ff.

6 vgl. Interview, Christof Ziegert

7 vgl. IBO, Clay to stay

8 vgl. IBO: Erdbebewegung

9 vgl. research FH St. Pölten: LeWeLas – Lehm als Werkstoff für Lärmschutzwände im System Bahn

10 mehr dazu s. | www.iglehm.ch/verband/lehmabbaubörse-aktuell [28.03.24]

11 mehr dazu s. | www.terraterre.ch/de [28.03.24]

4.4 Mögliche Ansätze im aktuellen Bauwesen

Die Eignungsprüfung von Baulehm sollte bereits vor dem Anfall von Aushub durchgeführt werden, um eine materialgerechte Ablagerung bzw. Verwertung des Materials im Lehm- und Aushubbau zu gewährleisten. Mögliche Ansatzpunkte in der Baupraxis wäre die Probenahme im Rahmen der Baugrunduntersuchung oder der Erstanalyse zur Deponierung gemäß *Deponieverordnung 2008 (DVO)* umzusetzen. Zudem gibt es einige Überschneidungen hinsichtlich der durchgeführten Prüfungen, wovon der Lehm- und Aushubbau aus bereits bestehenden Strukturen profitieren könnte.

4.4.1 Baugrundgutachten

Grundsätzlich besteht keine Verpflichtung für die Durchführung einer Baugrunduntersuchung, dennoch wird sie zur Vermeidung späterer Bauschäden empfohlen. Die Prüfungen stammen aus der Geotechnik, welche die Schnittstelle zwischen Bauwesen, Geowissenschaften und Bergbau darstellt. Die Ergebnisse der Baugrunduntersuchung werden im Baugrundgutachten zusammengefasst und ausgewertet.

Die Baugrunduntersuchung ist in der ÖNORM B 1997 geregelt, welche auf der europäischen Norm *Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik (EN 1997)* basiert.¹² Sie unterscheidet zwischen Festgestein, welches sich auf felsige Untergründe bezieht, und Lockergestein, was herkömmliche Erde beschreibt. Letzteres kommt für die potenzielle Verwertung im Lehm- und Aushubbau in Frage und wird im Folgenden genauer erläutert.

In der Norm wird die Durchführung der Baugrunduntersuchung vor der eigentlichen Planung empfohlen, da sie großen Einfluss auf alle Planungsphasen des Bauvorhabens nimmt, was auch im Sinne der materialgerechten Aushubverwertung wäre.¹³ Zunächst wird eine Vorstudie in Form einer grundsätzlichen Analyse der informativen Gegebenheiten zum Baugrund erstellt, in deren Kontext ein:e Sachverständiger: der Geotechnik ein Untersuchungsprogramm anfertigt. Die Baugrunduntersuchung gliedert sich in Untersuchungen auf, die sich in Intensität und zeitlichen Rahmen unterscheiden:

- Die Voruntersuchung beinhaltet die fachkundige Auswertung visueller Eindrücke in Rahmen einer Ortsbegehung.
- Die Hauptuntersuchung basiert auf der Art des Bauvorhabens und den Voruntersuchungen. Der Umfang der durchgeführten Prüfungen ist abhängig von lokalen Gegebenheiten und Dimensionen des Projektes.
- Zusätzlich gibt es Kontrolluntersuchungen im laufenden Baugeschehen.

Die im Rahmen der Hauptuntersuchung durchgeführten Prüfungen umfassen Bodenbegutachtungen, bauphysikalische Prüfungen des Untergrunds sowie hydrogeologische Analysen. Anhand dieser werden die Böden in geotechnische Klassen 1-3 unterteilt, welche ein steigendes geotechnisches Risiko des Bauvorhabens definieren.

Je nach Bauvorhaben findet eine Bodenklassifizierung in unterschiedlichen Ausmaßen statt, wobei davon ausgegangen werden kann, dass vertiefte Prüfungen nur bei Großbauvorhaben angestellt werden. Einige der Verfahren der Eignungsprüfung von Baulehm stammen aus diesem Bereich und basieren auf der *ÖNORM EN ISO 17892 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung*. Die daraus resultierenden Ergebnisse wären auch für die Eignungsprüfung verwendbar und müssten daher nur einmal durchgeführt werden.



Abb. 4.06 | Schurf



Abb. 4.05 | Schurferstellung



Abb. 4.07 | Lehmproben

Übereinstimmende Verfahren mit der Eignungsprüfung von Baulehm:

- Bestimmung der Korngrößenverteilung
- Plastizität (Ausroll- und Fließgrenze)
- Bestimmung des Kalkgehalts
- Bestimmung des organischen Anteils

Bei kleineren Bauvorhaben wäre es denkbar, die Probenahme für Eignungsprüfung für Baulehm mit der Baugrunduntersuchung zeitgleich durchzuführen. Die Probenahme für Lockergestein erfolgt je nach Größe des Bauvorhabens durch Sondierung und Schürfe, wobei sich zweiteres für die Probenahme zur Eignungsprüfung von Baulehm eignet. Für Großbauvorhaben wird für das Bodengutachten in der Regel ein Raster von 20 x 20 Metern angelegt.

Die Probenahme der Baugrunduntersuchungen stellt den frühesten Zugang zum Bodenmaterial innerhalb eines Bauvorhabens ohne zusätzlichen Arbeits- und Kostenaufwand zur Erstellung eigener Schürfungen dar.

Ein Beispiel ist das Wohnbauprojekt in der Kurbadstraße, 1010 Wien. Das Architekturbüro DI Thomas Romm ZT führte innerhalb der Ausschreibung für Erdarbeiten in geeigneten Baufeldern auf, dass bei jeder angelegten Schürfung zusätzliche Proben genommen werden sollten. In Tiefenabständen von 50 cm wurde daher Material bis 5 Meter unter der Oberfläche zur Prüfung und Rezepturentwicklung von Lehmbaustoffen gesichert.

4.4.2 Erstuntersuchung nach DVO 2008

Die Charakterisierung von Aushubmaterial ist in der *Deponieverordnung 2008 (DVO)* sowie in der ÖNORM S 2126 – *Grundlegende Charakterisierung von Aushubmaterial vor Beginn der Aushub- oder Abräumtätigkeit* detailliert geregelt, wobei die frühzeitige Untersuchung und Einordnung des Bodens für die Ablagerung vordergründig ist.

Der/die Bauherr:in ist verpflichtet im Rahmen der Untersuchung der beauftragten Fachperson oder Fachanstalt im Voraus Informationen zu dem Bauvorhaben und der vorhergehenden Flächennutzung zu übermitteln. Auf diesen Angaben basiert die Erstellung des Probenahmeplans, welcher Aushubbereiche festlegt. Faktoren wie Aushubvolumen, Herkunft bzw. Standort sowie potenzielle Verunreinigungen durch Vornutzungen legen die Zuordnung der einzelnen Aushubbereiche in Aushubkategorien fest, welche wiederum den Umfang der Beprobung bestimmen.¹⁴ Die Probenahme findet ebenfalls in Form von Schürfen oder Bohrungen in einem Flächenraster von 20 x 20 Metern statt. Zusätzlich ist die vorgegebene Mindestmenge bei der Festlegung der Probenanzahl einzuhalten, welche je nach Aushubkategorie des auszuhebenden Bodens alle 500 bis 1.500 Tonnen notwendig und daher auch von der Aushubtiefe abhängig ist. Pro Probenahme wird eine sogenannte qualifizierte Stichprobe angefertigt, die sich wiederum aus mindestens 10 Stichproben zusammensetzt. Die qualifizierte Stichprobe muss eine Mindestprobenmenge von 2 kg bis maximal 10 kg aufweisen.¹⁵ Die sogenannte Erstuntersuchung wird an einer Sammelprobe ausgeführt, welche sich aus allen qualifizierten Stichproben eines Aushubbereichs zusammensetzt. Sie beinhaltet unter anderem auch einige für den Lehmbau relevante Prüfungen, deren Ergebnisse in die Auswertung der Eignungsprüfung von Baulehm einbezogen werden könnten.

Übereinstimmende Verfahren mit der Eignungsprüfung von Baulehm:

- Bestimmung der organischen Anteile
- Bestimmung der Salzgehalte

Die *DVO 2008* führt insgesamt 33 verschiedene ÖNORMEN als Bestimmungsmethoden des Aushubs an. Nach Angaben der Fachanstalt Nievelt Labor GmbH werden für jeden geforderten Parameter der *DVO 2008* ein genormtes Verfahren herangezogen, womit ein zeitlicher Rahmen von 3 Wochen und ein Kostenaufwand von 425 Euro für die Untersuchung anfällt. Darin wird der Aushub auf Schadstoffe analysiert, wie Schwermetalle und Salze; diese inkludieren die bauschädlichen Salze Nitrat, Sulfat und Chlorid, welche auch in der Eignungsprüfung von Baulehm untersucht werden. Auch die Bestimmung organischer Anteile wird für das Deponieverhalten¹⁶ geprüft, welche für den Lehmbau ebenso relevant sind. Dies geschieht durch die Analyse des TOC (Total Organic Carbon) im Eluat – gelöste Substanzen aus einem Feststoff – sowie durch die Bestimmung des Glühverlusts am Feststoff. Der Oberboden bzw. die Humusschicht wird oftmals dem landwirtschaftlichen Bereich zur Verfügung gestellt oder gesondert abgelagert.

Die Ergebnisse der Erstuntersuchung bestimmen die Qualitätsklasse des Aushubmaterials (siehe Kap. 2.2.3) und die damit verbundene Verwertung bzw. Beseitigung.

Die Eignungsprüfung für Baulehm kann an den Prozess der Probenahme für die Deponierung anknüpfen, wodurch die Prüfung ebenfalls vor der Entnahme durchgeführt werden würde. Hierfür wäre eine Kooperation mit Bodenaushubdeponien bzw. Fachpersonen oder Fachanstalten notwendig. Die Einbindung des Materials in den bestehenden Bauprozess ist aufgrund des Planungsstands zum Zeitpunkt der Probenahme eher ungeeignet. Dennoch wäre im Rahmen dieser eine gesonderte Ablagerung als Baurohmaterial denkbar.

Grundsätzlich kann die Eignungsprüfung von Baulehm auf 2 Arten erfolgen: Zum einen über die sogenannten Feldversuche, welche hauptsächlich händisch durchgeführt werden können, und zum anderen durch Laborprüfungen. Verfahren zur Eignungsprüfung von Lehm im Überblick

4.5 Verfahren zur Eignungsprüfung von Lehm im Überblick

4.5.1 Feldversuche

Als Feldversuche werden Verfahren bezeichnet, welche ohne Geräte zumeist mit dem erdenfeuchten Lehm durchgeführt werden können. Durch die händisch durchführbaren Versuche sind Einschätzung bzw. Bewertungen zum vorliegenden Material vor Ort und ohne Verzögerung möglich.

Die *Lehmbau Regeln* geben an, dass die Feldversuche als ‚orientierende[n] Einschätzung der Lehmeigenschaften‘¹⁶ anzusehen sind. Schröder weist darauf hin, dass diese Verfahren im heutigen Baukontext standardisierte Laboruntersuchungen nicht ersetzen können.¹⁷

Die Bewertung der Feldversuche basiert auf den Kenntnissen und ‚einiger Erfahrung‘¹⁸ der durchführenden Person. In der Vergangenheit trafen Lehmbaumeister mit diesen Verfahren konkrete Aussagen zu dem Baustoff, womit auch aktuelle Lehmbauexpert:innen arbeiten. Fehleinschätzungen können bei den Feldversuchen jedoch nicht ausgeschlossen werden; Sogenannte ‚Täuschlehme‘¹⁹ werden aufgrund bestimmter Eigenschaften durch die Handverfahren oftmals falsch bewertet, wie es beispielsweise bei Lösslehm vorkommen kann.

Einige der Feldversuche stammen aus der Geotechnik und sind in der *ÖNORM EN ISO 14688-1 – Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden (Teil 1)* geregelt. Darüber hinaus verfügen die im Lehmbau bekannten Feldversuche über weitere Handverfahren, wobei Begrifflichkeiten und Empfehlungen in der Fachliteratur divergent ausfallen (siehe Tab. 4.01). Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Begrifflichkeit ‚Feldversuche‘²⁰ von Ziegert und Röhlen scheint in Bezug auf die Genauigkeit der Ergebnisse und Ausgangssituation bei Durchführung die geeignetste.

Während Niemeyer neben den Erkenntnissen zu Farbe und Kalk keine Handverfahren zur Beurteilung

von Baulehm aufführt, sind diese in neueren Werken in Vielfalt zu finden, die auch hinsichtlich der Durchführung zum Teil Unterschiede aufweisen.

Aktuell sind die Feldversuche das wohl verbreitetste Beurteilungsverfahren von Lehm. In diversen Lehr- und Workshopangeboten werden den Teilnehmer:innen diese Versuche nahegelegt, wobei oftmals die Vermittlung eines Grundverständnisses von Lehm vordergründig ist. Dahingehend erweist sich Lehm als einzigartig, da kein anderer Baurohstoff derartige Versuche zulässt.



Abb. 4.08 | Feldversuch

16 vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 6

17 vgl. Schröder, 2019 | S.83

18 Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 184

19 ebd.

20 Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 18

¹ ÖNORM 14688-1:2020
12 01, Anhang A
Volhard, Röhlen, 2009 |
S. 6
³ Schröder, 2019 | S. 83
⁴ Minke, 2022 | S. 19
⁵ Schneider, Schwimann,
Bruckner, 1996 | S. 184

ÖNORM EN ISO 14688-1	Lehmbau Regeln Dachverband Lehm e.V.	Lehmbau - Mit Lehm ökologisch planen und bauen Horst Schröder	Handbuch Lehmbau Gernot Minke	Lehmbau für Architekten und Ingenieure Schneider, Schwi- mann, Bruckner
<i>Handversuche</i> ²¹	<i>einfache Prüfungen</i> ²²	<i>Handprüf- verfahren</i> ²³	<i>Handprüf- verfahren</i> ²⁴	<i>Handprüf- verfahren</i> ²⁵
-	Bestimmung des Mineralgerüsts	Sedimentationstest	Sedimentation	Sedimenta- tionsprobe
-	Kugelformprobe	Kugelformprobe	-	Formbarkeitsprobe
-	Kugelfallprobe	-	Kugelfalltest	Fallprobe
Schneidversuch	Schneidversuch	Schneideprobe	Schneidetest	(Messerspit- zenprobe)
-	-	-	Konsistenztest	-
-	-	-	Kohäsionstest	-
Trockenfestigkeit	Trockenfestig- keitsversuch	Trockendruck- festigkeit	-	Trockenbruchprobe (+Fingerdruck- probe)
Reibeversuch (österreich.)	Reibeversuch	Reibeprobe	Reibe- und Waschtest	Händewaschprobe (+ Schmier- oder Seifenprobe)
Riechversuch	Riechversuch	Riechprobe	Geruchstest	Geruchsprobe
Schüttelprobe (österreich.)	-	-	-	Schüttelprobe
-	-	-	Beißtest	Kauprobe
Farbgebung des Bodens	Bestimmung der Farbe	Farbe	-	Farbprobe
Kalkgehalt	Bestimmung des Kalkgehaltes	pH-Wert	Salzsäuretest	Salzsäureprobe

Tab. 4.01 | Überblick zu Begrifflichkeiten und Empfehlungen der Feldversuche

4.5.2 Laborprüfungen

Gemäß den *Lehmbau Regeln* sind Laborprüfungen durchzuführen, wenn die Ergebnisse der Feldversuche nicht eindeutig ausfallen oder auf der Durchführungsseite nicht genügend Kenntnisse zu Bewertung dieser vorhanden sind.²⁶

Im Vergleich zu den Feldversuchen fallen die Laborprüfungen aufgrund der nötigen Ausstattung sowie der zeitlichen Komponente der Verfahren aufwändiger aus, während die Ergebnisse eine höhere Genauigkeit und Allgemeingültigkeit aufweisen. Sie analysieren das Material auf notwendige Materialeigenschaften für den Lehm und geben diese in quantitativen Ergebnissen an.

Die Informationslage bezüglich der Laborprüfungen verhält sich in der Fachliteratur bei der Anführung einiger Prüfungen übereinstimmend. Diese beziehen sich zumeist auf genormte Verfahren aus verschiedenen Fachbereichen, wobei oftmals weitere Prüfungen vorgeschlagen werden, die von den Verfassern entwickelt oder aus anderen Fachgebieten übernommen wurden. Die nachfolgenden Prüfungen repräsentieren die Schnittstellen der Quellen.

Bindekraft

Prüfung:	Bindekraftprüfung
Verfahren:	Bindekraftprüfung / Achterlingsprüfung / Zerreißprüfung
Norm:	ehem. DIN 18952 Bl.2 - Prüfung von Baulehm, 1952 – 1971
Fachgebiet:	Lehmbau
Ergebnis:	Eignung für den Lehm Angaben zu möglichen Lehmbaustoffen
Beschreibung:	Charakterisierung von Baulehm nach Bindekraft Die Bindekraftprüfung analysiert die Kohäsion der enthaltenen Tonminerale im Lehm. Diese ist bereits in zähplastischer Konsistenz nachweisbar und nimmt mit der Trocknung zu. Die Bindekraftprüfung, auch Achterlingsprüfung genannt, wird als Ausschlusskriterium (unter Vorbehalt) bewertet, wenn eine zu geringe Bindekraft vorliegt. Zusätzlich wird sie zur Baulehmcharakterisierung hinzugezogen, anhand welcher Aussagen zur Eignung des Materials als Baulehm und unter richtigen Voraussetzungen Aussagen zu Herstellung eines geeigneten Lehmbaustoffs getroffen werden können.

Korngrößenverteilung

Prüfung:	Bestimmung der Korngrößenverteilung
Verfahren:	Sieb-Schlamm-Analyse / Siebanalyse / Sedimentationsversuch
Norm:	ehem. DIN 18123 – Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung, 2011 - 2017 ÖNORM EN ISO 17892-4 – Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung, 2017
Fachgebiet:	Geotechnik
Ergebnis:	Angaben zu möglichen Lehmbaustoffen Charakterisierung von Baulehm nach Korngrößenverteilung
Beschreibung:	Das Mineralgerüst von Lehm ist durch die Korngrößenverteilung definiert. Durch die Analyse der prozentualen Anteile verschiedener Komponenten nach Korngröße können Aussagen zum Aufbereitungsverfahren und -aufwand getroffen werden. Die Korngrößenverteilung wird durch das kombinierte Verfahren der im Lehmbau bekannten Sieb-Schlamm-Analyse bestimmt.

²⁶ vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 8

Plastizität

Prüfung:	Bestimmung der Plastizität / Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
Verfahren:	Verfahren nach Casagrande (alt. Fallkegelverfahren)
Norm:	ÖNORM EN ISO 17892-12 – Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen, 2023
Fachgebiet:	Geotechnik
Ergebnis:	Nachweis der Plastizität und Bindekraft Bestimmung des Verhältnisses zwischen Schluff und Ton
Beschreibung:	Die Eigenschaften Plastizität und Bindekraft stehen in Relation zueinander, da beide von Materialzusammensetzung und dem Verhalten unter variierenden Wassergehalt abhängig sind. Die Plastizität gibt das bodenphysikalische Verhalten von Ton- und Schluffanteilen an und unterscheidet nach diesen Aspekten feinkörnige Böden.

Druckfestigkeit

Prüfung:	Bestimmung der Druckfestigkeit
Verfahren:	Einaxialer Druckversuch
Norm:	ehem. DIN 18952 Bl.2 - Prüfung von Baulehm, 1952 – 1956 ÖNORM EN ISO 17892 – Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben, Teil 7: Einaxialer Druckversuch, 2018
Fachgebiet:	Lehmbau, Geotechnik
Ergebnis:	Angaben zu möglichen Lehmbaustoffen Angaben zu notwendigen Zuschlagstoffen
Beschreibung:	Die Druckfestigkeit gibt an, wieviel Belastung ein Lehmbaustoff ausgesetzt werden kann. Sie wird von unterschiedlichen Faktoren bedingt, wie beispielsweise Bindekraft, Verdichtung und Korngrößenverteilung. Durch die Bestimmung der Druckfestigkeit können zudem Aussagen über nötige Zuschläge für die Herstellung eines spezifischen Baustoffes getroffen werden. Sie wird oftmals im Anschluss an die Bestimmung des Schwindmaßes durchgeführt.

Schwindmaß

Prüfung:	Bestimmung des Schwindmaßes
Verfahren:	Ermittlung des Trockenschwindmaßes
Norm:	ehem. DIN 18952 Bl.2 - Prüfung von Baulehm, 1952 – 1971 Weitere Normen für entsprechende Lehmbaustoffe: DIN 18946, DIN 18947
Fachgebiet:	Lehmbau
Ergebnis:	Nachweis zum Tonanteil und -art Angaben zu möglichen Lehmbaustoffen Charakterisierung nach Tonanteil und -art
Beschreibung:	Durch das Schwindmaß können ungefähre Aussagen zu Tongehalt und -art getroffen werden und kann für eine überschlägige Einordnung hinzugezogen werden. Durch die Ergebnisse können zudem Abschätzungen zur Rezeptur möglicher Lehmbaustoffe getroffen werden.

Natürlicher Kalkgehalt

Prüfung:	Bestimmung des Kalkgehalts
Verfahren:	Salzsäuretest
Norm:	ÖNORM EN ISO 14688-1 – Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung, 2020
Fachgebiet:	Geotechnik
Ergebnis:	Nachweis von Kalk
Beschreibung:	Durch Beträufeln des Lehms mit Salzsäure kann Kalk im Material nachgewiesen werden. Durch die Auswertung der stattfindenden chemischen Reaktion ist der Kalkgehalt ungefähr abschätzbar.

Salzgehalt

Prüfung:	Bestimmung des Salzgehalts
Verfahren:	Photometrisches Verfahren
Norm:	-
Fachgebiet:	Nasschemie
Ergebnis:	Eignung von Baulehm
Beschreibung:	Wasserlösliche Salze im Baulehm können im späteren Lehmbaubauteilen zu Bauschäden führen und sind daher ein Ausschlusskriterium für die bauliche Verwertung von Lehm. Der Salzgehalt von Bodenmaterial kann durch das photometrische Verfahren analysiert werden.

Organischer Anteil

Prüfung:	Bestimmung der organischen Anteile
Verfahren:	Riechversuch
Norm:	ÖNORM EN ISO 14688-1 – Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung, 2020
Fachgebiet:	Erdarbeiten
Ergebnis:	Eignungsprüfung von Baulehm
Beschreibung:	Organische Anteile können in späteren Baustoffen zu Schäden führen und stellen daher ein Ausschlusskriterium für die Verwertung von Aushub in Lehmgebäuden dar. Die Prüfung kann durch den Riechversuch im Rahmen der Feldversuche oder einem chemischen Verfahren analysiert werden.

4.6 Vorgehensweise

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Proben von Baustellen und potenziellen zukünftigen Baufeldern in Wien und dessen Umgebung akquiriert. Anhand diesen wurden aktuelle Verfahren zur Eignungsprüfung von Baulehm durchgeführt, um deren Praxistauglichkeit zu überprüfen.

Die Analyse der ausgewählten Verfahren beinhaltet jeweils eine theoretische Auseinandersetzung mit den Prüfverfahren sowie die Beschreibung der Prüfmethodik und der anschließenden Dokumentation der praktischen Durchführung. Abschlossen werden die Untersuchungen mit einer Auswertung der Ergebnisse und einer Diskussion zur Prüfung, in welcher Erfahrungen, Problemstellungen und Erkenntnisse der Verfahren behandelt werden. Gegebenenfalls werden alternative Verfahren theoretisch sowie zum Teil praktisch aufgezeigt und bewertet. Zusätzlich werden zu jeder Probe die jeweiligen Ergebnisse zusammengetragen und individuell ausgewertet (siehe Anhang).

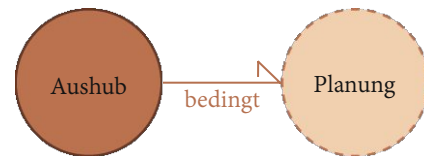
4.6.1 Ziele der Eignungsprüfung von Baulehm

In die Anwendung der Eignungsprüfung von Baulehm fließt zunächst die Überlegung ein, wie geeigneter Baulehm in das Lehmbauwesen integriert werden kann. Dabei werden drei Szenarien berücksichtigt, die auf bestehenden Gegebenheiten, aktuellen Ansätzen sowie einer zukünftigen Vision basieren.

1. Direkte Verwertung vor Ort

In der Vergangenheit sowie in aktuellen Projekten findet die direkte Aufbereitung und Verwertung des Aushubs vor Ort statt. Dafür sind Flächen für die Zwischenlagerung sowie mobile Aufbereitungsstationen notwendig. Es können zwei Vorgehensweisen zur Planung mit dem vorhandenen Material herangezogen werden:

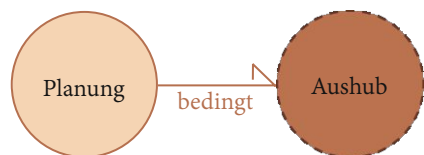
1.1. Vor der Planung



Wird die Eignungsprüfung von Baulehm bereits vor oder in der anfänglichen Entwurfserstellung durchgeführt, generiert dies Sicherheit in der Planung bezüglich der Nutzung des Materials. Dabei kann beim Ausheben des Bodens bei Bedarf auf die Gegebenheiten eingegangen werden, wie beispielsweise ab welcher Tiefe das Material verwertbar ist oder welche Erdschicht sich vorzugsweise für den Lehmbau eignet.

Bei Vorliegen von geeignetem Lehm kann entsprechend auf dessen Eigenschaften und daraus resultierenden Präferenz des herstellbaren Lehm- baustoffs eingegangen werden. Dabei können Aufbereitung sowie das Zuführen von Zuschlagstoffen effizient, ressourcen- und energiesparend ausfallen.

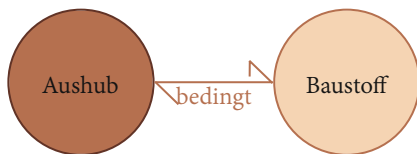
1.2. In der Planung



In der Praxis findet aktuell oftmals der Einbezug von Aushub in die Planung während dem eigentlichen Bauprozess statt. Dies hat den Vorteil, dass Kenntnisse zum Boden durch Bodengutachten vorliegen; manchmal wird der Aushub bereits auf dem Baugelände zwischengelagert.

Zumeist besteht eine konkrete Vorstellung zum herzustellenden Baustoff, da die Möglichkeiten der Verwertung in der bestehenden Planung limitiert sind. Darauf werden die Eigenschaften des vorliegenden Materials angepasst, weshalb in diesem Szenario oftmals direkt Baustoffprüfungen durchgeführt werden und nicht die eigentliche Eignungsprüfung von Baulehm. Ein potenzieller Nachteil ist die weniger effiziente Nutzung des Materials durch intensive Anpassungsverfahren. Große Mengen an Zuschlagstoffen oder aufwändige Aufbereitungsprozesse können infolgedessen erforderlich sein.

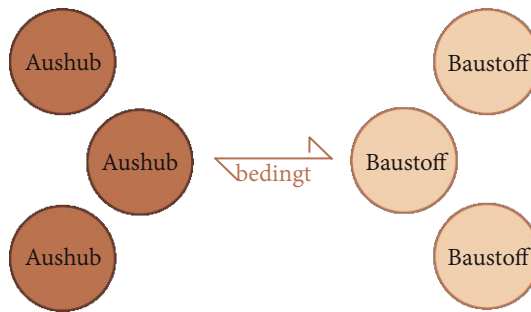
2. Austauschplattform für Aushub



Das Vorhandensein einer Austauschplattform für Aushub bietet klare Vorteile, insbesondere in Bezug auf die materialgerechte Verwertung des Lehms. Die Effizienz wäre durch den Materialaustausch gegeben, da der Aushub als Ausgangspunkt für den/die Abgeber:in und zugleich das angepasste Material für den/die Annehmer:in darstellt, der/die bereits eine konkrete Vorstellung eines Baustoffs als Ausgangspunkt hat. Voraussetzung für eine Austauschplattform ist jedoch ein Markt in entsprechender Dimension und Vielfalt, der Angebot und Nachfrage ausgleicht. Nachteilig ist die erforderliche zeitliche Übereinstimmung, damit sich die Austauschprozesse reibungslos vollziehen können. Weitere Problematiken wären wiederum eine planungsaufwändige Logistik mit potenziellen Langstrecken sowie die Notwendigkeit von Zwischenlagern und Aufbereitungsflächen auf der materialzugeführten Baustelle.

Bezüglich des Materials ist es entscheidend, dass dieses auf seine Eigenschaften getestet und nachweisbar dokumentiert wird, um den Abnehmer:innen die Qualität und Eigenschaften des Aushubs zu garantieren.

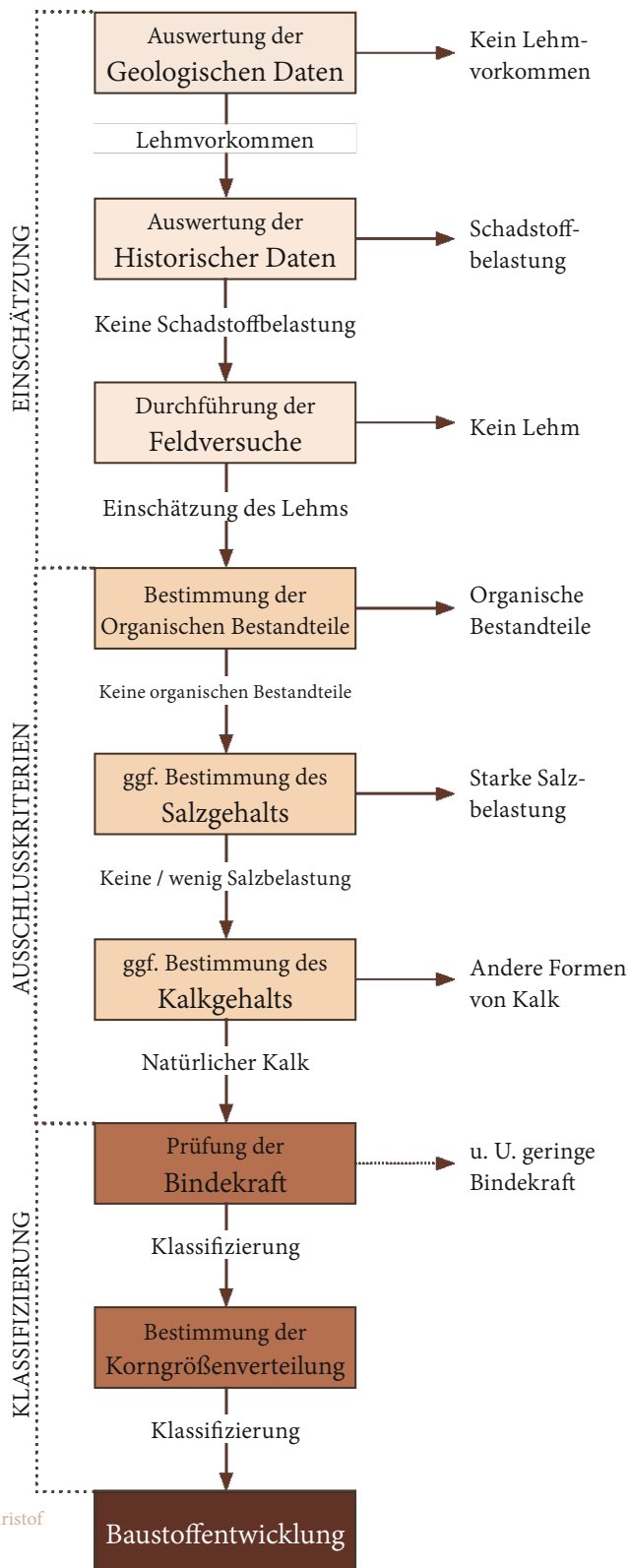
3. Klassifizierte Ablagerung



Das letzte Szenario zur Verwertung von Aushub bildet die Vision einer organisierten Zwischenlagerung von Aushub an definierten Orten ab. Das Aushubmaterial könnte durch die Eignungsprüfung von Baulehm untersucht und charakterisiert werden. Die analysierten Lehmeigenschaften bestimmen die Zuführung auf eine darauf ausgelegte Zwischenlagerstätte. Diese könnten in kleinskaligen Raster von lehmgeprägten Gebieten angesiedelt werden und direkt an entsprechende Aufbereitungsanlagen angeschlossen sein. Ein Nachteil dieses Ansatzes liegt im Transport des Materials, welcher damit alternativlos ist. Möglicherweise könnte durch die Nutzung vorhandener Strukturen von Bodenaushubdeponien das Defizit bewältigt werden, da diese in großer Anzahl und oftmals siedlungsnah vorliegen. Zudem müssten keine Zwischenlagerstätten am Bauort selbst eingeplant werden und die Maschinerie für die Aufbereitung wäre der Baustelle ebenfalls nicht zuzuführen.

Die Kriterien für die Materialcharakterisierung durch die Eignungsprüfung von Aushub könnte flexibler ausfallen, da die gemeinsame Aufbereitung von Aushubmaterialien nach dem Prinzip der Massenverarbeitung auf Ergänzung und Ausgleich abzielen würde. Aufgrund der Unabhängigkeit von spezifischen Bauprojekten könnte dieser Ansatz im aktuellen Baukontext als realistischste Variante betrachtet werden.

Die möglichen Szenarien werden im weiteren Vorgehen berücksichtigt und in die Aufstellung der Prüfungen sowie die Auswertung der Ergebnisse einbezogen.



4.6.2 Gewichtung und Relevanz der Prüfergebnisse

Aufgrund der Variabilität und Vielzahl der möglichen Prüfungen, wurde eine Auswahl von Verfahren aus der Eignungsprüfung von Baulehm anhand verschiedener Kriterien getroffen. Die Relevanz der Ergebnisse, Auswertung aktueller Kritik, Rücksprache mit Expert:innen aus dem Feld sowie ressourcenbedingte Möglichkeiten dieser Arbeit spielen in die Entscheidung ein und sind jeweils in die Dokumentation der Verfahren eingearbeitet und begründet.

Einblicke in Prüfberichte der MFPA und ZRS Ingenieure GmbH zeigen Vorgehensweisen, Auswertung sowie die abschließende Beurteilung der Eignungsprüfung von Baulehm in der Praxis und dienen mit der einschlägigen Fachliteratur zur grundlegenden Orientierung der Eignungsprüfung von Baulehm. Beide Prüfstellen, wie auch literarische Quellen, führen die Feldversuche als Basis für die Eignungsprüfung auf, während die Laborprüfungen in unterschiedlicher Intensität ausfallen. Der Prüfbericht der MFPA enthält zudem geologische Daten und petrografische Beschreibungen der Entnahmeorte der Proben.

Röhlen und Ziegert weisen in ihrem Literaturwerk Lehm-Bau-Praxis wohl die aktuellsten Methoden in Hinblick auf den Stand der Technik sowie den Praxisbezug auf. Dort wird ebenfalls die Relevanz der Bestimmung des Salzgehaltes aufgeführt, welche auch der Lehm-Experte Christof Ziegert im Interview betont.²⁷ Die Bestimmung des Kalkgehalts wurde den Laborprüfungen zugeordnet, was aufgrund der benötigten Utensilien gerechtfertigt wird.

Hinsichtlich der möglichen Zielsetzungen der Eignungsprüfung von Baulehm wurden verschiedene Kategorien gebildet, in welche die Verfahren nach der Aussagekraft ihrer Ergebnisse zugeordnet wurden.

1. Vorkommen und Einschätzung von Baulehm

Zu Beginn der Eignungsprüfung von Baulehm beim lokalen Bodenmaterial, ist das Vorkommen von Lehm nachzuweisen und erste Einschätzungen darüber zu gewinnen. Die Auswertung geologischer Daten können zum Nachweis von Lehmvorkommen herangezogen werden, während durch historische Informationen Aus-

sagen zu möglichen Verunreinigungen getroffen werden können. Die Feldversuche bilden eine wichtige Grundlage für das gesamte Verfahren, da durch die schnelle und akkurate Auswertung der Versuche erste Einschätzungen zum Material geschaffen werden können. Zudem können sie kostspielige und aufwändige Laborprüfungen von ungeeignetem Material verhindern und bedienen daher auch einen möglichen Ausschluss von Aushub zur Verwertung als Baustoff. Die tatsächlichen Ergebnisse sind jedoch aufgrund ihres Formates und möglichen Fehleinschätzung nur bedingt für die eigentliche Eignungsprüfung des Materials heranzuziehen.

Verfahren:

- Auswertung geologischer Daten
- Auswertung historischer Daten
- Feldversuche

2. Überprüfung der Ausschlusskriterien

Einige Verfahren der Eignungsprüfung von Baulehm testen Aushub auf Eigenschaften, die einen Ausschluss in der baustofflichen Verwertung bedingen. Diese Prüfverfahren sollten daher zu Beginn der Laborprüfungen angesiedelt werden. Obwohl einige der aufgezählten Ausschlusskriterien Möglichkeiten zur Aufbereitung und Herstellung eines geeigneten Lehmbaumaterials bieten, ist der damit verbundene Aufwand hinsichtlich des Ressourcen- und Energieaufwand unverhältnismäßig und daher nicht empfehlenswert. Die jeweiligen Ausschlusskriterien werden in den entsprechenden Kapiteln genauer beleuchtet und evaluiert.

Verfahren:

- Bestimmung der organischen Bestandteile
- Bestimmung des Salzgehaltes
- Bedingter Ausschluss: Bestimmung des Kalkgehaltes
- Bedingter Ausschluss: Bindekraft

3. Klassifizierung von Baulehm

Eine weitere Prüfungskategorie der Eignungsprüfung von Baulehm ist die Unterscheidung in gleichartige Lehme. Dafür kann eine Klassifizierung nach spezifischen lehmbaurelevanten Eigenschaften vorgenommen werden. Diese wäre vor allem hinsichtlich einer organisieren Ablagerung sowie der Ausschreibung für eine Aushubplattform vorzunehmen. Neben den Materialeigenschaften ist auch die Eignung für bestimmte Aufbereitungsmethoden entscheidend, da nicht jedes Material für jede Verfahrensweise geeignet ist. Die Auswahl der aktuellen Verfahren ist ausbaufähig; zwar sind Bindekraft und Korngrößenverteilung wohl vordergründig, jedoch bilden sie nur erste Anhaltspunkte ab.

Verfahren:

- Bindekraftprüfung
- Bestimmung der Korngrößenverteilung

4. Eignung von Baulehm für Lehmbaustoffe

Einige der Verfahren zur Eignungsprüfung von Baulehm liefern Ergebnisse, mit welchen Angaben zur Herstellung von Lehmbaustoffen möglich sind. Dies geht mit der Analyse spezifischer bauphysikalischen Eigenschaften einher, die Aufschluss über deren Eignung für unterschiedliche Lehmbaustoffe geben, wie beispielsweise Druckfestigkeit, Korngrößenverteilung oder Verdichtbarkeit. Dabei liegt der Fokus auf einer effizienten Materialaufbereitung sowie der Reduktion von Rohstoff- und Energieeinsatz. Eine grundlegende Unterscheidung in konstruktive und nicht konstruktive Bauteile kann dadurch getroffen und die bestmögliche Materialkonsistenz zur Verarbeitung bestimmt werden.

Verfahren:

- Bindekraftprüfung
- Bestimmung der Korngrößenverteilung
- Druckfestigkeit
- Schwindmaß
- Plastizität

4.6.3 Ablauf der Eignungsprüfung von Baulehm

Durch die Zuordnung der Prüfungen ergibt sich eine Reihenfolge für den Ablauf der Bewertung von Aushub an einem Standort. Diese wurde im Verlauf der vorliegenden Arbeit durchgeführt.

Zunächst werden die geologischen Daten zum Baugrund ausgewertet. Falls das Bauvorhaben in einer Region liegt, in welcher anhand der geologischen Informationslage mit Festgestein gerechnet wird, müssen keine weiteren Prüfungen erfolgen.

Bei Angaben eines möglichen Lehmvorkommens gilt es weiterführend die Informationen zur historischen Flächennutzung auszuwerten. Vorbelastete Flächen, wie beispielsweise industriell oder landwirtschaftlich genutzte Böden, sollten zunächst auf Schadstoffe untersucht werden, um Verunreinigungen des Lehms auszuschließen.

Im Rahmen der Probegewinnung für Laborprüfungen können bereits die Feldversuche durchgeführt werden. Aufgrund der Humusschicht fällt die Materialgewinnung im manuellen Verfahren recht aufwändig aus, weshalb eine separate Probengewinnung für die Feldversuche nicht zu empfehlen ist.

Anschließend gilt es zu überprüfen, welche möglichen Ausschlusskriterien untersucht werden müssen. Organische Anteile können in der Regel ab einer gewissen Aushubtiefe ausgeschlossen werden. Hierfür ist die Dicke der Humusschicht zu bewerten und diese im Anschluss sachgemäß abzuräumen. Sollte es sich bei dem Boden um keinen natürlichen Boden handeln, sondern sich als aufgeschüttetes Bodenmaterial oder bereits ausgehobenes Material erweisen, sollte der organische Anteil bestimmt werden. In der Regel kann dies bereits durch den Riechversuch, welcher im Rahmen der Feldversuche, sowie durch schwärzliche Verfärbung festgestellt werden. Bei unklarer Einschätzung von Geruch und Farbe können die Proben in Wasser aufgeweicht oder erwärmt werden, um den Geruch zu intensivieren. Lehm ist weitestgehend geruchslos, während Organik modrig riecht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Riechversuch und die Bestimmung der Farbe durchgeführt, jedoch werden in der weiteren Abhandlung auch alternative Laborprüfungen theoretisch vorgestellt.

Bei Kenntnissen über eine mögliche Salzbelastung des

Bodens sind die bauschädlichen Salze Nitrat, Sulfat und Chlorid zu bestimmen, um spätere Bauschäden zu vermeiden. Böden mit potenzieller Salzbelastung sind beispielsweise landwirtschaftlich genutzte Flächen oder küstennahe Regionen. Die Salze sind ebenfalls durch unterschiedliche Verfahren zu testen, welche jedoch nicht normiert sind und aktuell für dem Baulehm keine Richtwerte besitzen. Bei Proben mit potenzieller Salzbelastung wird diese durch Photometrie analysiert sowie alternativ dazu die elektrische Leitfähigkeit bestimmt und ausgewertet.

An den vorliegenden Proben wird zusätzlich der Kalkgehalt analysiert und dessen Ergebnisse mit der Wirkung in Lehm theoretisch abgeglichen.

Die Bindekraftprüfung wird mit einem angefertigten Prüfgerät nach Niemeyer durchgeführt. Die Ergebnisse und deren Aussagekraft im Lehmabbau werden erörtert und diskutiert. Zudem werden Erfahrungen und Erkenntnisse zu dem Verfahren beschrieben sowie Problemstellungen und kritische Bewertung der Prüfung durch Fachpersonen erläutert. Im Sinn der Charakterisierung bzw. Klassifizierung von Baulehm stellt die Prüfung derzeit ein sinnvolles Verfahren dar und besitzt daher vor allem für die beiden Szenarien einer Aushubplattform als auch der organisierten Ablagerung Relevanz.

Zur Ergänzung der Ergebnisse der Bindekraft wird die Korngrößenverteilung in Grobkornbereich durchgeführt, um damit auf die Kritik der Bindekraftprüfung zu reagieren.

Die Prüfungen für die Lehmabbaufwicklung werden im Rahmen dieser Arbeit nur theoretisch behandelt, da sie keinen direkten Einfluss auf die genannten Szenarien für den Umgang mit Aushub haben. Zudem werden sie auf vorliegende Kritikpunkte untersucht sowie ihre Position und Zielstellung in der Eignungsprüfung von Baulehm erläutert.

4.7 Probenahme

4.7.1 Ablauf der Probenahme im Lehm- und Schluffbau

Die Probenahme kann neben der Probengewinnung durch die Baugrunduntersuchung oder die Erstuntersuchung im Rahmen der Deponierung als eigenständiges Verfahren durchgeführt werden. Sondierungen geben Aufschluss über den Schichtenaufbau des Bodens; eine Entnahme von ausreichendem Probematerial ist dadurch jedoch nicht möglich. Bei Bohrungen kann mit bestimmten Aufsätzen Probematerial gewonnen werden; es ist dennoch empfehlenswert zusätzlich Schurfe anzulegen. Schurfe werden abhängig vom Bauvorhaben mit einer Mindesttiefe von 0,5 Metern, um humose Anteile auszuschließen, bis zur Maximaltiefe von 3 Metern ausgeführt. Ab einer Tiefe von 1,8 Metern müssen Saumböhlen zur Sicherung des Schurfs angebracht werden.²⁸

Die Probenahme sollte innerhalb des Schurfs erfolgen. In der Praxis der Baugrunduntersuchung findet aufgrund der Tiefen, die unter 3 Meter gehen, keine Begehung statt. Trotzdem können hierbei Aufschlüsse zu dem Schichtenaufbau des Bodens gemacht werden.

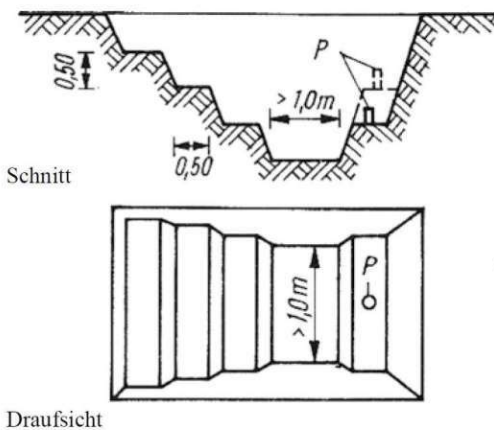


Abb. 4.09 | Schurfe zur Probenahme



Abb. 4.10 | Teile der Probensammlung

Zur Häufigkeit der Probenahme sind derzeit keine Angaben zu finden. Eine Ausnahme bildet das *Technische Merkblatt TM05*, welches sich jedoch spezifisch auf den Aushub einer Lehmgrube im industriellen Kontext bezieht. Hier ist das Aushubmaterial pro 1.000 Tonnen auf dessen Qualität zu prüfen, während die Entnahme an 3 unterschiedlichen Stellen stattfinden sollte. In der *DVO 2008* werden in der Aushubkategorie I, welche nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial beschreibt, eine Probe pro 1.500 Tonnen gefordert. Die vorgegebene Fläche von 400 m² entspräche, wie bei der Baugrunduntersuchung, einem Flächenraster von 20 x 20 Metern.²⁹ Die Voraussetzung für die Einhaltung von 1.500 Tonnen wären bei dieser Fläche und dem durchschnittlichen Aushubgewicht von 1,8 t/m³ bei einer Aushubtiefe von knapp über 2 Metern erreicht. Für tiefergehende Aushubarbeiten muss gemäß Norm ein kleineres Flächenraster für die Beprobung angelegt werden.

Für Lehmproben ist das Raster der Probenahme wohl auch durch die Beschaffenheit des Bodens bestimmt. Bei ungleichmäßigen Böden ist ein dichteres Raster zur Probenahme empfehlenswert.³⁰

Die Probemenge sollte 10 Kilogramm umfassen und es empfiehlt sich, diese durch einen luftabgeschlossenen Behälter im erdfuchten Zustand zu halten, falls die Feldprüfungen nicht direkt vor Ort durchgeführt werden.³¹ Zudem sollte die Probenahme ausreichend dokumentiert werden, wie Entnahmestelle (inkl. Tiefe), Bezeichnung (nach Herkunftsort), Kennzeichnung (Nummerierung), Ort und Datum sowie der/die Ausführende.³²

28 vgl. Schröder, 2019 | S. 80

29 vgl. ÖNORM S 2126:2016 02 01 | S. 8 – 10

30 vgl. Technische Merkblatt TM05, 2011 | S. 3

31 vgl. Schröder, 2019 | S. 83

32 vgl. Technische Merkblatt TM05, 2011 | S. 3

4.7.2 Zeitpunkt und Ablauf der Probenahme in der Praxis

Die Probengewinnung der vorliegenden Arbeit fand auf aktuellen sowie zukünftigen Bauprojekten in Wien und Umgebung statt, die aufgrund vorliegender geologischer Kenntnisse Lehmvorkommen aufweisen. Ein weiteres Auswahlkriterium war zudem die Beabsichtigung der Nutzung des Aushubs im Lehm-bau, welche bei einigen Projekten vorlag.

Insgesamt wurden 13 Projekte ausgewählt, wovon 17 Proben genommen wurden. Die Bauprojekte wiesen zum Zeitpunkt der Probenahme unterschiedliche Dimensionen und Baufortschritte auf, welche von der Idee des Bauvorhabens bis hin zur Ausführung reichten. Das anfängliche Bestreben zusätzlich Bestände von Bodenaushubdeponien zu untersuchen, wurde aufgrund der Vermischung von abgelagertem Aushubmaterial und der nicht nachvollziehbaren Entnahmestelle von der Eignungsprüfung von Baulehm ausgeschlossen.

Bedingt durch die unterschiedlichen Baufortschritte der Projekte, fanden die Probenahmen zum Teil vor

sowie während dem Baubetrieb statt. Gesonderte Schürfe wurden nicht angelegt.

Aufgrund der begrenzten logistischen Möglichkeiten im Rahmen der vorliegenden Arbeit betragen die Proben nach Abschätzung jeweils ca. 3-6 Kilogramm und sind nach Probenummer und Herkunft bezeichnet. Die Mindesttiefe von 0,5 Metern wurde bis auf Probe P13 eingehalten.

4.7.3 Standorte der Probenahme

Die Proben stammen aus Wien und Umgebung, wobei die Proben P10 und P11 aus dem direkt an Wien angrenzenden Gemeindebezirk Purkersdorf und die Probe P14 ca. 80 Kilometer nordwestlich von Wien aus Mitterretzbach stammen.

Insgesamt gilt es zwischen Einzelproben und Gruppenproben zu unterscheiden. Bei Letzteren wurden mehrere Proben an einem Standort, jedoch aus variierenden Tiefen entnommen.



Abb. 4.11 | Standorte der ausgewählten Projekte in Wien und Umgebung

Probe-nr.	Projekt	Herkunft	Tiefe*	Verwertungs- absicht	Datum
P1	U2 Baustelle Bacherplatz	Bacherplatz, 1050 Wien	20,0 m	Deponierung	17.05.2023
P2	U2 Baustelle Siebenbrunnengasse	Siebenbrunnengasse / Stöbergasse, 1050 Wien	18,0 m	Deponierung	31.05.2023
P3	U2 Baustelle Stiftgasse	Stiftgasse Höhe Haus-Nr. 1-3, 1070 Wien	12,5 m	Deponierung	21.06.2023
P4	U2 Baustelle Maria-Hilfer-Straße	Maria-Hilfer-Straße Ecke Stiftgasse	20,0 m	Deponierung	21.06.2023
P5	Neubau FH Campus Wien	Favoritenstraße 226, 1100 Wien	1,3 m	Deponierung / Gelände- modellierung	17.05.2023
P6			0,5 m		
P7	Wohnbau Nordbahnviertel	Leystraße 154, 1020 Wien	3,0 m	Deponierung	14.06.2023
P8	Stadtviertel (Rothneusiedl) Zukunftshof	Rosiwalgasse 41-43, 1100 Wien	2,0 m	n.b.**	15.06.2023
P9			1,5 m		
P10	Einfamilienhaus Franz-Steiner-Gasse	Franz-Steiner-Gasse 23, 3011 Purkersdorf	0,9 m	Deponierung	20.06.2023
P11	Einfamilienhaus Robert Hohenwarther-Gasse	Robert Hohenwarther-Gasse 17, 3002 Purkersdorf	2,4 m	Deponierung	20.06.2023
P13	Landschaftsprojekt Kopernikusgasse	Kopernikusgasse 10, 1060 Wien	n.b.**	Lehmputz	06.06.2023
P14	Musterhaus Mitterretzbach	Europastraße 7, 2070 Mitterretzbach	n.b.**	Holz-Lehm-Ver- bundsystem	01.09.2023
P15	Wohnbau Kurbadstraße	zwischen Kurbadstraße 8 und Kurbadstraße 12, 1100 Wien	1,5 m	Verwertung im Neubau	12.09.2023
P16			3,0 m		
P17			4,5 m		
P18	Schulbau Rudolf-Steiner-Schule	Endresstraße 100, 1230 Wien	n.b.**	Lehmputz	05.10.2023

* Tiefe zur Oberkante
Boden
** nicht bekannt

Tab. 4.02 | Standorte und Details zu Gruppenproben

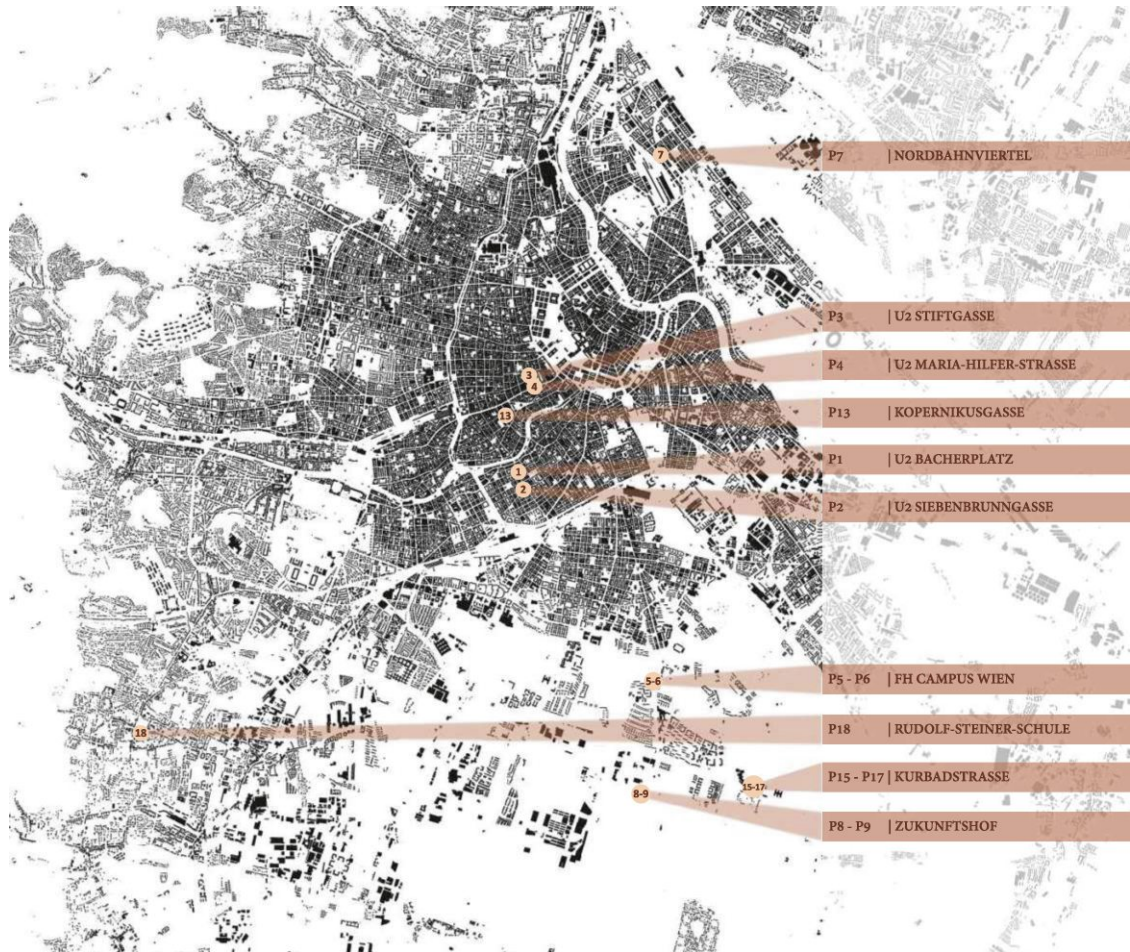


Abb. 4.12 | Standorte der ausgewählten Projekte in Wien



Abb. 4.13 | Probenstandorte in der geologischen Übersichtskarte von Wien

Die geologische Übersichtskarte von Wien zeigt, dass die Standorte der Proben Lehmvorkommen aufweisen. Überwiegend wurden sie in Zonen der neogenen Lockersedimente des Wiener Beckens gewonnen,

während die südlichen Proben auf mit das hohe Löss- und Lösslehmvorkommen zugreifen. Lediglich Probe P7 stammt aus der Talsohle Wiens, jedoch ist die Probe Teil einer historischen Aufschüttung.

4.7.4 Projekte der Probenahme

Die Proben wurden in unterschiedlichen Phasen der Bauvorhaben gewonnen. Abhängig von der Bauphase der Projekte erfolgte die Probenahme in verschiedenen Weisen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die in der Arbeit befindlichen Probenahmen nicht vergleichbar mit einer für den Lehmbau separaten Materialgewinnung sind.

Anhand des Projektstands können die Projekte eingeteilt werden:

1. Konzept- / Entwurfsphase
2. Baugrunduntersuchung
3. Baubetrieb



Abb. 4.14 | Bestehende Grabung



Abb. 4.15 | Probenahme

Stadtviertel Rothneusiedl | Zukunftshof P8 | P9

In Rothneusiedl soll ein Pionierstadtteil für Klimaschutz im Rahmen der Wiener Stadtentwicklung auf einer Fläche von 124 Hektar entstehen. Insgesamt sollen dort ca. 9.000 Wohnungen mit Raum für 21.000 Menschen erbaut werden. Ab 2027 soll das Projekt in die Detailplanung gehen und im Jahr 2030 ist die bauliche Umsetzung angedacht.³³ Durch die Thematik Klimaschutz wäre im Bereich der Baustoffauswahl der Einsatz von Aushub ein wertvoller Beitrag, der sich insbesondere hinsichtlich der Größe des Bauprojekts für eine direkte Verwertung vor Ort eignen würde. Der aktuelle Planungsstand würde umfangreiche Untersuchungen des Bodenmaterials erlauben sowie dessen Einbindung in die Planung.

Die Proben wurden aus einer bestehenden Grabung auf dem sogenannten Zukunftshof, welcher am Rand des Bebauungsgebiets liegt.

Projekt	Stadtviertel
Entnahmetiefe	2,0 m 1,5 m
Adresse	Rosiwalgasse 41-43, 1100 Wien
Material	Feinkörnig, homogen, gut formbar
Konzept- / Entwurfsphase	

P13 Landschaftsprojekt | Kopernikusgasse

Die Probe P13 wurde in dem Innenhof einer Blockrandverbauung der Gründerzeit im 6ten Bezirk von Wien genommen. Im Rahmen eines Landschaftsprojektes wurde hier lehmhaltiger Boden ausgehoben, um diesen mit Humus zu ersetzen. Geplant ist dessen Einsatz als Lehmputz in der Sanierung des einstöckigen ehemaligen Wirtschaftsgebäudes, welches sich ebenfalls im Innenhof befindet.

Die Probe wurde von dem bereits ausgehobenen Material genommen, welches bereits Vegetation aufwies sowie inhomogene Ablagerungen durch nicht getrennten Aushub der Erdschichten erkennbar waren.

Projekt	Landschaft / Sanierung
Entnahmetiefe	nicht bekannt
Adresse	Kopernikusgasse 10, 1060 Wien
Material	Grobkörnig, fleckige Färbung, gut formbar
Konzept- / Entwurfsphase	



Abb. 4.16 | Aufgeschüttetes Aushubmaterial



Abb. 4.17 | Probenahme



Abb. 4.18 | Schichtenaufbau



Abb. 4.19 | Probenahme



Abb. 4.20 | Schurf der Probenahme

P11 Einfamilienhaus | Robert Hohenwarter-Gasse

Projekt	Neubau
Entnahmetiefe	2,4 m
Adresse	Robert Hohenwarter-Gasse 17, 3002 Purkersdorf
Material	Grobkörnig, meliert, gut formbar
Baugrunduntersuchung	

Probe P11 wurde bei der Erstellung eines Baugrundgutachten für den Erbau eines Einfamilienhauses gewonnen. Das Material wurde von dem Aushub des Schurfes zur Beurteilung der Erdschichten entnommen. Dieser stammt aus einer Tiefe von über 2 Metern stammt. Das Material enthält grobe Körnungen in Form von Sand- und Tonsteinen.



Abb. 4.24 | Schurferstellung



Abb. 4.25 | Schichtenaufbau



Abb. 4.26 | Proben P15, P16, P17

Einfamilienhaus | Franz-Steiner-Gasse P10

Das Bauvorhaben ist der Neubau eines Einfamilienhauses, im dessen Rahmen ein Baugrundgutachten angefertigt wurde. Diese beinhaltet die Anlegung eines Schurfs, welcher den Schichtenaufbau des Bodens zeigte (siehe Abb. 4.18). Der Übergang von Oberboden zum B-Horizont ist klar ersichtlich. Der Lehm enthält die große Körnung (Steine). Die Probe P10 wurde im Schurf für den Sickersversuch gewonnen (siehe Abb. 4.20).

Projekt	Neubau
Entnahmetiefe	0,9 m
Adresse	Franz-Steiner-Gasse 23, 3011 Purkersdorf
Material	Grobkörnig, schlierenartig, hell-dunkelbraun, gut formbar
Baugrunduntersuchung	



Abb. 4.21 | Schichtenaufbau



Abb. 4.22 | Probenahme



Abb. 4.23 | Materialfarbe

Wohnbau | Kurbadstraße P15 | P16 | P17

In der Kurbadstraße des 10ten Wiener Gemeindebezirks sollen mehrere Wohnbauten entstehen. In geeigneten Baufeldern ist die Verwertung des Aushubes im Bau angedacht, weshalb bereits bei der Ausschreibung der Erdarbeiten durch das Büro DI Thomas Romm ZT alle 0,5 Meter eine Probenahme für den Lehm im Rahmen der Baugrunduntersuchung bestimmt wurde. Die Proben P15, P16 und P17 stammen aus dem Aushubmaterial verschiedener Tiefen eines Schurfes in einem Baufeld, in welchem eine doppelstöckige Tiefgarage entstehen soll. Das Material weist einen Farbverlauf (grau-brau-grau) auf.

Projekt	Neubau
Entnahmetiefe	1,5 m 3,0 m 4,5 m
Adresse	zwischen Kurbadstraße 8 und Kurbadstraße 12, 1100 Wien
Material	Feinkörnig, grau und braun meliert, sehr gut formbar
Baugrunduntersuchung	

U2-Baustelle

P1 | P2 | P3 | P4

Der U-Bahn-Ausbau der Linie U2 soll aufgrund wachsender Bevölkerungszahl in Wien bis zum Jahr 2028 fertiggestellt werden. In der Teilstrecke Neubaugasse bis Matzleinsdorfer Platz wurden insgesamt vier Proben von unterschiedlichen Standorten genommen. Diese stammen aus erheblichen Tiefen, welche mit einem Schurf nicht zu erreichen sind. Die Entnahmen der Proben fanden während Baustellenbegehungen statt, wobei jeweils die Tiefe anhand der Tiefenmarken notiert wurde.³⁴



Abb. 4.27 | U2-Baustelle Bacherplatz



Abb. 4.29 | U2-Baustelle Siebenbrunnengasse



Abb. 4.28 | Aushubmaterial Bacherplatz



Abb. 4.30 | Aushubmaterial Siebenbrunnengasse

Projekt	U-Bahn-Ausbau			
Probe Entnahmetiefe Adresse	P1 20,0 m Bacherplatz, 1050 Wien	P2 18,0 m Siebenbrunnengasse / Stöbergasse, 1050 Wien	P3 12,5 m Stiftgasse Höhe Haus- Nr. 1-3, 1070 Wien	P4 20,0 m Maria-Hilfer-Straße Ecke Stiftgasse
Material	Feinkörnig, grau, sehr gut formbar	Feinkörnig, grau / braun, sehr gut formbar	Feinkörnig, hellbraun / grau, gut formbar	Feinkörnig, grau, sehr gut formbar
				Baubetrieb



Abb. 4.31 | U2-Baustelle Stiftgasse



Abb. 4.33 | U2-Baustelle Maria-Hilfer-Straße



Abb. 4.32 | Aushubmaterial Stiftgasse



Abb. 4.34 | Aushubmaterial Maria-Hilfer-Straße



Abb. 4.35 | Baustellengrube



Abb. 4.36 | Probenahme

Neubau | FH Campus Wien

P5 | P6

Der zweite Erweiterungsbau der FH Campus Wien befindet sich seit Februar 2023 im Bauprozess und soll im Sommer 2024 fertiggestellt werden. Die bebaute Fläche beträgt 7.600 m² mit 3 Untergeschossen³⁵; Ein Großteil des Bodenaushubs wurde auf dem Gelände der FH Campus Wien zwischengelagert, um zur zukünftigen Geländemodellierung herangezogen zu werden.

Die Proben P5 und P6 wurden aus unterschiedlichen Tiefen der Baugrube entnommen.

Projekt	Neubau
Entnahmetiefe	1,3 m 0,5 m
Adresse	Favoritenstraße 226, 1100 Wien
Material	Feinkörnig, braun-grau-meliert, sehr gut formbar
Baubetrieb	

Wohnbau | Nordbahnviertel

P7

Der ehemalige Nordbahnhof weist eine Fläche von 85 Hektar auf und befindet sich seit Jahren in einem ständigen Bauprozess zur Errichtung eines neuen Stadtteils. Das letzte Entwicklungsgebiet „Freie Mitte – Vielseitiger Rand“ soll im Jahr 2026 fertig gestellt werden.³⁶ Der Nordbahnhof wurde 1838 eröffnet und wurde aufgrund der regulären Überschwemmungen des Gebiets künstlich aufgeschüttet.

Die Probe wurde in Baufeld 3 in der Baugrube aus einer Zwischenschicht mit Lehmanteil entnommen, während die Schichten darunter eher kiesig ausfallen.

Projekt	Neubau
Entnahmetiefe	3,0 m
Adresse	Leystraße 154, 1020 Wien
Material	Feinkörnig, homogen, gut formbar
Baubetrieb	



Abb. 4.37 | Baustellengrube



Abb. 4.38 | Probenahme

Das Musterhaus besteht aus einem Holz-Lehm-Verbandsystem. Der verwendete Lehm stammt aus einer Lehmgrube auf dem Grundstück und wurde bereits für die Sanierung des dort befindlichen Hofgebäudes als Putz mit Wandheizung verwendet. Durch variierende Zuschlagstoffe und Mischungen findet der Lehm eine vielfältige Anwendung im Musterhaus. Neben essenziellen Wandschichten wird er als Lehmputz und -estrich verwendet. Probe P14 stammt aus dem zwischengelagerten Material vor Ort, welches 2022 / 2023 zum Auswintern aufgeschichtet wurde.

Projekt	Neubau
Entnahmetiefe	nicht bekannt
Adresse	Europastraße 7, 2070 Mitterretzbach
Material	Grobkörnig, homogen, gut formbar
Baubetrieb	



Abb. 4.39 | Lehmgrube vor Ort



Abb. 4.40 | Lehmgrube + Ablagerung



Abb. 4.41 | Material vor Siebung



Abb. 4.42 | Material nach Siebung

Der Neubau der Rudolf-Steiner-Schule im 23. Wiener Gemeindebezirk schließt an ein Bestandsgebäude an. Der dadurch entstandene Aushub durch die tiefgelegte Turnhalle wurde durch die Planung des Lehmbaupertens Andi Breuss im neuen Holzbau sowie im Bestand eingesetzt. Die österreichische Firma proLehm Frauwallner GmbH & Co KG bereitete das Material durch Siebung auf, bevor es im gesamten Neubau sowie im Bestandsbau als Putz herangezogen wurde. Die Probe P18 wurde aus dem gesicherten Material vor dessen Aufbereitung gewonnen.

Projekt	Neubau und Sanierung
Entnahmetiefe	nicht bekannt
Adresse	Endresstraße 100, 1230 Wien
Material	Grobkörnig, homogen, gut formbar
Baubetrieb	



5. *Eignungsprüfung von Baulehm in der Praxis*



Zielstellung

Die Feldversuche dienen zur ersten Einschätzung des vorliegenden Materials im Lehm- und Schluffbau. Sie zeichnen sich durch einen geringen Zeitaufwand und die Durchführung vor Ort aus, da die Verfahren keine Geräte oder spezielle Aufbereitungen benötigen. Für die Auswertung sind Wissen und Kenntnisse im Lehm- und Schluffbau hilfreich.

Die Feldversuche können zum Ausschluss der Ausgrabungsverwertung im Lehm- und Schluffbau führen, wenn organische Bestandteile festgestellt werden.

5.1.1 Theoretischer Hintergrund

Im Lehmbau sind für einige Feldversuche genormte Verfahren verfügbar, welche das Vorgehen und die Auswertung definieren. Diese sind in der *ÖNORM EN ISO 14688-1 – Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden (Teil 1)* zu finden und stammen aus dem Fachgebiet der Geotechnik. Dort werden sie zur Bestimmung und Bewertung von feinkörnigem Boden vor dessen Entnahme (in situ) herangezogen, wobei die Unterscheidung von Ton und Schluff vordergründig ist. Weiterführende Laborprüfungen werden von dem Vorhaben, der Auswertbarkeit der Feldversuche und der Verfügbarkeit eines Labors abhängig gemacht. Die Norm empfiehlt zudem, dass Durchführende der Feldversuche gelegentlich ihre Ergebnisse mit Laborauswertungen abgleichen, um eine korrekte Beurteilung zu gewährleisten.¹

Die Feldversuche sind auf unterschiedliche Eigenschaften des Materials ausgelegt, die für den Lehmbau relevant sind und folgende Kriterien behandeln.

A. Bindekraft

Die Bindekraft ist hauptsächlich durch den Tongehalt und -art definiert. Sie wird durch die Kugelformprobe, die Kugelfallprobe und den Trockenfestigkeitsversuch getestet. Im Lehmbau wird zwischen fetten und mageren Lehmen sowie diversen Abstufungen unterschieden.

Magerer Lehm: „Sehr mager“ und „mager“ beschreibt Lehm mit wenig Tonanteil und / oder weniger stark bindige Tonminerale (Zweischichtsilikate), welche eine geringe Bindekraft aufweisen. Zudem kann Lehm mit einem hohen Schluffanteil die Bindekraft herabsetzen. Grund dafür ist die große Oberfläche des Schluffs und der damit einhergehende höhere Bedarf an Tonmineralien.

Fetter Lehm: „Fast fett“, „fett“ und „sehr fett“ beschreiben Lehme mit zunehmender Bindekraft, welche dementsprechend durch einen hohen Tonanteil und / oder stark bindige Tonminerale geprägt sind.

B. Ton- und Schluffanteil

Die Unterscheidung von Ton und Schluff ist im Lehmbau relevant, da Schluff im erdfeuchten Zustand als Ton gedeutet werden kann. In diesem Kontext werden die Täuschlehme angeführt, welche durch einen hohen Schluffanteil eine geringe Bindekraft aufweisen. Nach Auswertung der Bindekraft lassen sie jedoch oftmals einen hohen Tonanteil vermuten. Durch die Schneide-, Reibe- und Waschversuche gilt es, einen hohen Schluffanteil zu erkennen.

C. Mineralgerüst

Eindrücke zum Mineralgerüst geben Auskunft über enthaltene Korngrößen im Lehm. Vor allem der Grobkornanteil, wie Sand und Kies, ist damit gut zu identifizieren und zu bewerten.

D. Weitere Bestandteile

Durch den Geruch und die Farbgebung können Aussagen zum Material und zu Inhaltsstoffen getroffen werden. Dabei ist vor allem die Bestimmung von organischen Bestandteilen im Lehm vordergründig. Organische Bestandteile gelangen oftmals durch die Vermengung mit der Humusschicht in den Lehm. Sie würden sich mit fortschreitender Zeit im Baustoff zersetzen und zur Schimmelbildung sowie zum Verlust der strukturellen Festigkeit führen. Daher sind sie im Baulehm zu vermeiden. Organische Stoffe im Lehm äußern sich durch einen modrigen Geruch, während Lehm geruchslos ist. Zusätzlich sind organische Stoffe durch schwärzliche Verfärbungen im Material erkennbar.

Mit der Ausnahme der Verfärbung durch organische Bestandteile ist die Bestimmung der Farbe im Lehmbau nicht im Detail notwendig. Sie ist oftmals durch enthaltene Minerale geprägt, welche keine besonderen Auswirkungen auf die Lehmeigenschaften haben. Festigkeitserhöhende Bestandteile wie Kalk oder Eisenoxid werden im Rahmen der Baustoffprüfung durch die Druckfestigkeit gemessen. Gipsanteile, die für Lehmstoffe schädlich sind, werden nur durch die Salzanalyse zuverlässig bestimmt.

¹ vgl. *ÖNORM 14688-1:2020 | Anhang A*

vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 184

vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 6 - S. 8

vgl. Schröder, 2019 | S. 85 f.

vgl. Minke, 2022 | S. 19

5.1.2 Versuche

Die *Lehmbau Regeln* geben eine Auswahl von Feldversuchen an. Hinsichtlich der Zielstellung der Eignungsprüfung werden diese Feldversuche nachfolgend mit einigen Ergänzungen als grundlegende Verfahren herangezogen. Zudem sind sie nach dem Untersuchungsziel der Ergebnisse geordnet.

A. Bindekraft

Kugelformprobe

Mit den Händen wird eine Kugel mit einem Durchmesser von ca. 5 cm geformt. Wenn das Material an den Händen klebt, handelt es sich um fetten Lehm. Lässt sich die Probe kaum oder gar nicht zu einer Kugel formen, ist der Lehm zu mager. Fällt die Probe im Anschluss wieder leicht auseinander, handelt es sich um mageren Lehm.

Kugelfallprobe

Für diesen Versuch wird ebenfalls eine Kugel mit einem Durchmesser von ca. 5 cm geformt. Diese wird anschließend aus einer Höhe von 1 m auf einen festen, glatten Untergrund fallen gelassen. Das Bruchverhalten des Materials gibt Aufschluss über die Bindekraft des Lehms. Zerfällt die Kugel in viele kleine Teile bis hin zu Krümeln, ist der Lehm sehr mager. Bleibt die Kugel hingegen am Stück, ist der Lehm eher fett. Ein geeigneter Baulehm zerfällt in einige wenige Stücke.

Trockenfestigkeitsversuch

Die getrocknete Probe wird zwischen den Fingern auf die Widerstandskraft bei Druckausübung getestet. Geeigneter Baulehm zerbröckelt in wenige Stücke nach erhöhter Kraftausübung, während fetter Lehm sich nicht zerkleinern lässt. Magerer Lehm zerfällt sofort.

B. Ton- und Schluffanteil

Schneideversuch

Die erdfeuchte Probe wird mit einem Messer durchgeschnitten. Durch die Schnittfläche lassen sich Aussagen zum Ton- und Schluffgehalt treffen. Während eine glänzende Fläche auf einen fetten Lehm mit hohem Tonanteil hindeutet, weist eine matte Schnittfläche auf einen hohen Schluffgehalt hin. Zusätzlich zeigt ein Knirschen beim Durchschneiden einen Sandanteil an.

Reibeversuch

Die Probe wird zwischen den Fingern (gegebenenfalls mit Wasser) zerrieben. Eine klebrige, seifige Substanz deutet auf einen hohen Tonanteil hin. Dieser ist auch im getrockneten Zustand nicht von den Fingern zu entfernen, sondern nur durch Händewaschen. Schluffiges Material ist durch ein rauhes Reibgefühl und eine pulvrige, mehrlartige Haptik erkennbar.

Washversuch

Lehm wird mit Wasser von den Händen gewaschen. Löst sich dieser schnell, handelt es sich um mageres oder schluffiges Material. Löst er sich langsam, beinhaltet das Material viel Ton.

C. Korngrößen

Bestimmung des Mineralgerüsts

Der Versuch zielt darauf ab, den hauptsächlichen Grobkornanteil im Lehm zu bestimmen. Hierfür wird der Lehm in der Handfläche mit Wasser angelöst. Nach visueller Beurteilung wird in drei Kategorien unterschieden: grob-, fein- und schluffsandig. Lehme mit Sandanteilen verschiedener Korngröße werden als ‚gemischtkörnig‘ bezeichnet.

D. Weitere Bestandteile

Riechversuch

Der Geruch kann Auskunft über organische Bestandteile geben. Ein modriger, fauliger Geruch deutet auf organische Bestandteile hin. Durch das Erhitzen der feuchten Probe kann der Geruch intensiviert werden. Lehm hat kaum bis keinen bestimmten Geruch.

Bestimmung der Farbe

In diesem Versuch ist die Farbe der erdfeuchten Probe ausschlaggebend, da diese durch die chemische Zusammensetzung des Lehms bestimmt ist. Dunkle Färbungen können auf einen Humusanteil hinweisen.

- Rot-Braun: Eisenoxid (festigkeitserhöhend)
- Weiß und Grau: Kalk- oder Kreideanteile (festigkeitsmindernd)
- Grün-Braun: Organische Anteile (festigkeitsmindernd)²

Bestimmung des Kalkgehaltes

Bei diesem Versuch wird verdünnte Salzsäure auf die Probe getropft. Zeigt die Probe eine Reaktion in Form von Aufbrausen ist Kalk in dem Material enthalten.³

5.1.3 Versuchsdurchführung

Die Feldversuche wurden an den erdfeuchten Proben im Anschluss an die Probenahme durchgeführt. Die Proben wurden in Eimern mit Deckeln aufbewahrt, wodurch diese auch mit einer Zeitverzögerung von ein bis zwei Tagen einen erdfeuchten Zustand aufwiesen. Für den Trockenfestigkeitsversuch wurden kleine Teile der Probe an der Luft getrocknet.

Die in der Methodik angeführten Versuche wurden anhand jeder Probe durchgeführt. Die Bestimmung des Kalkgehaltes wurde aufgrund der benötigten Ausstattung den Laborprüfungen zugeordnet und wird daher im Nachfolgenden nicht aufgeführt.

Zunächst wurde der Boden grundlegend auf Hinweise von Lehm untersucht. Dies geschah auf unterschiedliche Weise: Die Schollenbildung am Boden war bereits sehr aufschlussreich für Lehmvorkommen. Ließ sich das erdfeuchte Material formen, deutete das ebenfalls auf Lehm hin. Schaufelabdrücke bei der Entnahme der Probe dienten zur Bestätigung von Lehmvorkommen.

5.1.4 Ergebnisse und Auswertung

Die allgemeine Auswertung der Feldversuche findet in der oben festgelegten Einordnung nach der Zielstellung der jeweiligen Verfahren statt.



Abb. 5.01 | Schollenbildung



Abb. 5.02 | Formbarkeit



Abb. 5.03 | Abdrücke der Probenahme

Probe	Kugelformprobe	Kugelfallprobe	Trockenfestigkeitsversuch	Einschätzung
P1	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest	Bleibt am Stück, sehr leichte Abflachung	Lässt sich nicht zerdrücken	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
P2	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest	Bleibt am Stück, sehr leichte Abflachung	Lässt sich nicht zerdrücken	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
P3	Gut formbar, kaum Linienbildung	Bleibt am Stück, leichte Abflachung mit wenig Rissbildung	Lässt sich schwer zerdrücken	Fetter Lehm, hohe Bindekraft
P4	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest	Bleibt am Stück, sehr leichte Abflachung	Lässt sich nicht zerdrücken	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
P5	Gut formbar, Linienbildung	Bleibt am Stück, Abflachung mit wenig Rissbildung	Lässt sich nicht zerdrücken	Fetter Lehm, hohe Bindekraft
P6	Gut formbar, kaum Linienbildung	Bleibt am Stück, Abflachung mit sehr wenig Rissbildung	Lässt sich nicht zerdrücken	Fetter Lehm, hohe Bindekraft
P7	Formbar, festes Drücken, keine Linienbildung	Zerbricht in viele Teile	Lässt sich leicht zerdrücken	Sehr magerer Lehm, wenig Bindekraft
P8	Formbar, festes Drücken, Linienbildung	Bleibt am Stück, Abflachung mit wenig Rissbildung	Lässt sich zerdrücken	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft
P9	Formbar, festes Drücken, starke Linienbildung	Bleibt am Stück, Abflachung mit wenig Rissbildung	Lässt sich zerdrücken	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft
P10*	Gut formbar, starke Linienbildung	Bleibt am Stück, wenig Abflachung mit leichter Rissbildung	Lässt sich schwer zerdrücken	Fetter Lehm, hohe Bindekraft
P11*	Gut formbar, leichte Linienbildung	Bleibt am Stück, wenig Abflachung mit leichter Rissbildung	Lässt sich schwer zerdrücken	Fetter Lehm, hohe Bindekraft
P13*	Formbar, festes Drücken, Linienbildung	Zerbricht in wenige Teile	Lässt sich zerdrücken	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft
P14	Formbar, Linienbildung	Zerbricht in wenige Teile	Lässt sich schwer zerdrücken	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft
P15	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest	Bleibt am Stück, wenig Abflachung	Lässt sich nicht zerdrücken	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
P16	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest	Bleibt am Stück, wenig Abflachung	Lässt sich nicht zerdrücken	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
P17	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest	Bleibt am Stück, wenig Abflachung	Lässt sich nicht zerdrücken	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
P18*	Formbar, starke Linienbildung	Zerbricht in wenige Teile	Lässt sich schwer zerdrücken	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft

Tab. 5.01 | Auswertung der Bindekraft nach den Feldversuchen

A. Ton- und Schluffanteil

Für die Kugelformprobe und Kugelfallprobe wurden bei einigen Proben sehr grobe Körnung (Kies) ausgelesen, um die korrekte Durchführung zu gewährleisten. Unter Berücksichtigung der Eindrücke durch den Trockenfestigkeitsversuch wurden Einschätzungen zur Bindekraft getroffen.

Nach Einschätzung der Versuche zur Bindekraft liegen überwiegend fette bis sehr fette Lehme vor.



Abb. 5.04 | Probe P5 nach der Kugelfallprobe



Abb. 5.05 | Probe P8 nach der Kugelfallprobe



Abb. 5.06 | Probe P9 beim Trockenfestigkeitsversuch

Probe	Schneideversuch	Reibeversuch	Waschversuch	Einschätzung
P1	Glänzende, glatte Schnittfläche	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, schweres Ablösen	Tonig
P2	Glänzende, glatte Schnittfläche	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, schweres Ablösen	Tonig
P3	Glänzende, glatte Schnittfläche	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, langsames Ablösen	Tonig
P4	Glänzende, glatte Schnittfläche	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, schweres Ablösen	Tonig
P5	Leicht glänzende, glatte Schnittfläche, leichtes Knirschen	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, langsames Ablösen	Tonig
P6	Glänzende, glatte Schnittfläche, leichtes Knirschen	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, langsames Ablösen	Tonig
P7	Stumpfe, sehr raue Schnittfläche, leichtes Knirschen	Wenig klebrig, eher mehlig, etwas feine Haptik	Schnelles Ablösen	Schluffig
P8	Stumpfe, raue Schnittfläche, leichtes Knirschen	Klebrige Masse, feine Haptik	Seifig, langsames Ablösen von Feinkorn, Sand recht schnell	Schluffig
P9	Stumpfe, raue Schnittfläche, leichtes Knirschen	Klebrige Masse, feine Haptik	Seifig, langsames Ablösen von Feinkorn, Sand recht schnell	Schluffig
P10	Glänzende, z.T. glatte / raue Schnittfläche, Knirschen	Klebrige Masse, sandig	Mittelschnelles Ablösen, Feinkorn verbleibt länger	Tonig, sandig
P11	Glänzende, z.T. glatte / raue Schnittfläche, leichtes Knirschen	Klebrige, klumpige Masse, sandig	Mittelschnelles Ablösen, Feinkorn verbleibt länger	Tonig, sandig
P13	z.T. glatte / raue Schnittfläche, starkes Knirschen	Leicht klebrige Masse, größere Körnung	Schnelles Ablösen	Tonig, sandig
P14	Glänzende, z.T. glatte / raue Schnittfläche, Knirschen	Klebrige, Masse, feine Haptik	Seifig, langsames Ablösen von Feinkorn, Sand schnell	Tonig, sandig
P15	Glänzende, glatte Schnittfläche	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, schweres Ablösen	Tonig
P16	Glänzende, glatte Schnittfläche	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, schweres Ablösen	Tonig
P17	Glänzende, glatte Schnittfläche	Klebrige Masse, sehr feine Haptik	Seifig, schweres Ablösen	Tonig
P18	Raue Schnittfläche, Knirschen	Klebrige Masse, sandig	Mittelschnelles Ablösen, Feinkorn verbleibt länger	Tonig, sandig

Tab. 5.02 | Auswertung des Ton- und Schluffanteils nach den Feldversuchen

B. Ton- und Schluffanteil

Der Schneideversuch konnte zum Teil an den bestehenden Kugeln der vorhergehenden Versuche durchgeführt werden. Der Reibe- und Waschversuch wurden kombiniert.

Der Großteil der Proben ist nach Einschätzung eher tonig als schluffig. Die Ausnahme bilden die Proben P8 und P9. Diese ließen eine hohe Bindekraft vermuten, während Versuche zur Bestimmung des Ton- und Schluffanteil auf schluffiges Material hinweisen.



Abb. 5.07 | Stumpfe Schnittfläche von Probe P8



Abb. 5.08 | Glänzende Schnittfläche von Probe P6



Abb. 5.09 | Sandiges, schluffiger Lehm von Probe P8



Abb. 5.10 | Toniger Lehm von Probe P11

C. Mineralgerüst

Durch die Zugabe von Wasser und anschließendem leichten Reiben lassen sich Grobkorn und Feinkorn unterscheiden. Leichtes Ausspülen der Feinanteile legt das Grobkorn frei und löst Agglomerationen von Feinkörnern auf, welche im erdfeuchten Zustand fälschlicherweise als Grobkorn wahrgenommen werden könnten. Eine Unterscheidung in grob-, fein- und schluffsandig konnte nicht identifiziert werden, weshalb vermutlich gemischtkörnige Lehme vorliegen. Die meisten der vorliegenden Proben sind überwiegend feinkörnig.

Probe	Mineralgerüst
P1	Feinkörnig
P2	Feinkörnig
P3	Feinkörnig, sandig
P4	Feinkörnig
P5	Feinkörnig mit etwas größerer Körnung
P6	Feinkörnig mit etwas größerer Körnung
P7	Feinkörnig, sandig
P8	Feinkörnig
P9	Feinkörnig
P10	Grobkörnig mit sehr großer Körnung (flach)
P11	Grobkörnig mit sehr großer Körnung (flach)
P13	Grobkörnig mit sehr großer Körnung (kantig)
P14	Feinkörnig, sandig mit etwas größerer Körnung
P15	Feinkörnig
P16	Feinkörnig
P17	Feinkörnig
P18	Grobkörnig mit großer Körnung (gerundet)

Tab. 5.03 | Auswertung des Mineralgerüsts

D. Weitere Bestandteile

Bei einigen Proben wurden leicht metallische sowie feuchterdige Gerüche wahrgenommen. Letzteres wurde mit der Farbe des vorliegenden Materials abgeglichen, um einen Humusanteil auszuschließen.

Bei Probe P13 wurde ein stark modriger Geruch wahrgenommen sowie schwärzliche Verfärbungen im Material, worauf man auf einen Humusanteil schließen kann. Aufgrund der Gewinnung der Probe aus einem vermengten Aushub ist dies ein Ausschlusskriterium für die Verwertung des Materials im Lehm- und Ziegelbau. Die anderen Proben scheinen keine organischen Anteile aufzuweisen, während bei Probe P7 eventuell ältere Einschlüsse vorliegen könnten, die bereits zu Kohle umgewandelt wurden.



Abb. 5.11 | Probe P14 im trockenen Zustand



Abb. 5.12 | Probe P14 im nassen Zustand

Probe	Riechversuch	Bestimmung der Farbe	Einschätzung
P1	Geruchslos, leicht metallisch	Hellgrau, sehr homogen	Kein Humusanteil
P2	Geruchslos, leicht metallisch	Hellgrau, sehr homogen	Kein Humusanteil
P3	Geruchslos, leicht metallisch	Ockerfarben (gelblich) mit hell- grauen Tonstücken	Kein Humusanteil
P4	Weitestgehend geruchslos, leicht feuchter Geruch	Hellgrau mit wenigen hell- braunen Schlieren	Humusanteil aufgrund der Farbe auszuschließen
P5	Geruchslos, leicht metallisch	Hellbraun (gelblich) mit rötlichen Schlieren und hellgrauen Stellen	Kein Humusanteil
P6	Geruchslos, leicht metallisch	Hellbraun (gelblich) mit rötlichen Schlieren und hellgrauen Stellen	Kein Humusanteil
P7	Weitestgehend geruchslos, leicht schwefelig	Hellbraun (gräu-/ bläulich) ver- einzelte schwarze Schlieren, sonst recht homogen	evtl. zersetzte organi- sche Einschlüsse
P8	Weitestgehend geruchslos, leicht feuchter Geruch	Hellbraun (gelblich), sehr homogen	Kein Humusanteil
P9	Weitestgehend geruchslos, leicht feuchter Geruch	Hellbraun (gelblich), sehr homogen	Humusanteil aufgrund der Farbe auszuschließen
P10	Weitestgehend geruchslos	Dunkelbraun (leicht gräulich) mit hellbraunen und rötlichen Stellen	Kein Humusanteil
P11	Weitestgehend geruchslos	Warmes dunkelbraun mit wenigen hellbraunen Stellen (leicht gelblich)	Kein Humusanteil
P13	Stark modrig	Hellbraun, dunkelbraune / schwärzliche Stellen	Humusanteil
P14	Weitestgehend geruchslos, leicht feuchter Geruch	Hellbraun (gelblich) mit hell- grauen Tonstücken	Humusanteil aufgrund der Farbe auszuschließen
P15	Geruchslos	Dunkelgrau mit rötlichen Schlieren	Kein Humusanteil
P16	Geruchslos	Warmes Hellbraun mit star- ken rötlichen Stellen	Kein Humusanteil
P17	Geruchslos	Hellbraun (gräulich) mit roten Schlieren	Kein Humusanteil
P18	Geruchslos	Warmes hellbraun (leicht rötlich)	Kein Humusanteil

Tab. 5.04 | Auswertung von Geruch und Farbe nach den Feldversuchen

Zusammenfassung der Einschätzungen

In gesamtheitlicher Betrachtung der Einschätzungen handelt es sich bei allen vorliegenden Proben um Lehme, die für den Lehm- und Ziegelbau geeignet sind. Die Ausnahme bildet Probe P13, welche aufgrund organischer Bestandteile nicht für die Verwertung im Lehm- und Ziegelbau nutzbar ist. Trotzdem wurde sie im weiteren Verlauf auch für die Laborprüfungen herangezogen. Grund dafür war die Analyse, ob der Ausschluss auch durch diese Verfahren belegt werden kann. Das war jedoch nicht der Fall, weshalb das Ergebnis des Riechversuchs sehr bedeutend ist. Bei Probe P7 gilt es nochmals zu evaluieren, wodurch die schwarzen Schlieren im Material bedingt sind. Einschätzungen der Bindekraft und des Ton- und Schluffanteils stimmen weitestgehend überein. Die

Proben P8 und P9 lassen Abweichungen erkennen: Sie lassen einen fetten Lehm durch die Feldversuche zur Bindekraft erwarten, während zugleich ein hoher Schluffanteil vermutet wird. Ob ein Ausschlusskriterium durch geringe Bindekraft vorliegt, ist nicht erkennbar. Dies gilt es durch die Laborprüfungen zu validieren.

Insgesamt handelt es sich bei dem Großteil der Proben, um feinkörnige Lehme mit hoher Bindekraft, was einen erhöhten Aufbereitungsaufwand und vermehrte Zuführung von Zuschlagstoffen bedingen kann. Grundsätzlich ist eine hohe Bindekraft für tragende Baustoffe vorteilhaft, jedoch sollte das Materialgerüst der Lehme eine entsprechende Grobkörnigkeit aufweisen.



Abb. 5.13 | Durchführung der Feldversuche zu Bildungszwecken

5.1.5 Diskussion zu den Feldversuchen

Die Feldversuche stellen eine gute Möglichkeit zur Erlangung einer adäquaten ersten Einschätzung zu Aushub und dessen Verwertbarkeit im Lehm- bau dar. Bei Abgleich mit vorhandenen Erfahrungswerten können hier bereits gültige Aussagen getroffen werden, wobei sich die vorliegende Arbeit auf die Eignung des Materials beschränkt. Dieser Umstand ist zum einen durch die begrenzten Kenntnisse der Verfasserin und zum anderen durch die nachfolgende kritische Beleuchtung der Feldversuche im aktuellen Baukontext zu begründen.

Unabhängig von dem Umstand, dass die *ÖNORM EN ISO 14688-1* die Feldversuche zum Teil regelt, stellt sich die Frage nach deren Signifikanz im heutigen Lehm- bau. Die Norm ist im Fachgebiet der Geotechnik darauf ausgelegt Bodenarten zu bestimmen. Die Eignungsprüfung von Baulehm soll hingegen dessen Verwertbarkeit als Baustoff ermitteln, wodurch andere Anforderungen an das vorliegende Material einhergehen.

Aktuell werden vorrangig Feldversuche zur Eignungs- prüfung vermittelt. Diese erfordern, wie eingangs erwähnt, Lehm- bauexpert:innen zur Auswertung.

Auch in der Geotechnik werden die Baugrund- untersuchungen ausschließlich von ausgebildeten Fachpersonen durchgeführt, deren Einschätzungen gemäß Norm in zeitlichen Abständen validiert wird. Das zum Teil vertretene Meinungsbild, die Bewertung der Feldversuche sei nach einer kurzen Einschulung bereits möglich, bildet nach eigener Einschätzung kei- nen zeitgemäßen Umgang mit dem Material Lehm als potenziellen Baustoff ab.

Die Feldversuche sollten daher gemäß den *Lehm- bau Regeln* als ‚orientierende Einschätzung‘⁴ dienen. Die Marktfähigkeit und Nutzung von Aushub im Bauwesen hängt von der Nachweisführung der durch- geführten Prüfungen ab. Dieser Aspekt erweist sich bei den Feldversuchen als problematisch, da diese auf Eindrücken basieren und nicht in nachweisbaren oder vergleichbaren Werten wiedergegeben werden. Quantifizierbare Ergebnisse sind jedoch eine alter- nativlose Bedingung für das großmaßstäbliche Bauen mit Aushub. Niemeyer führte bereits 1944 an, dass zur massentauglichen Verwertung von Lehm dessen Bewertung nicht von den ‚praktischen Erfahrungen eines Einzelnen‘⁵ abhängig sein dürfe.

4 Volhard, Röhlen, 2009 | S.6

5 Niemeyer, 1944 | S. 176

5.2 Bestimmung von organischen Bestandteilen

Die Bestimmung von organischen Bestandteilen findet im Lehmbau derzeit in den zuvor aufgeführten Feldversuchen statt. Diese können anhand von Geruch und Farbe bestimmt werden, wobei Erstes durch Erwärmung oder Einweichen intensiviert werden kann. Der Riechversuch sowie die Bestimmung der Farbe weisen jedoch keine quantitativen Werte als Ergebnisse auf. Da die Organik ein Ausschlusskriterium für die Verwertung von Aushub darstellt, werden im Nachfolgenden mögliche Laborprüfungen theoretisch erläutert.

„Für eine Verwertung von Aushub ist das erste Kriterium die Trennung von Humus und lehmhaltigen Aushub. Dafür müsste man auf der Baustelle ein petrographisches Gutachten anfertigen, um zu wissen welches Material man vorfindet. [...] Das Material muss frei von organischen Stoffen sein, wie Wurzelwerk. Die sind vor allem im Oberboden, welcher bis zu zwei Meter Tiefe gehen kann.“

Christoph Liebrich, Clay Expert Center (ClayX)

Organische Substanzen können bei hohem Vorkommen in tragenden Lehmbauteilen durch Zersetzungsprozesse zu strukturellen Schäden führen. Bei Lehmputzen können zudem weißliche Verfärbungen oder Schimmelbildung auftreten, weshalb hier die Toleranzschwelle für Organik niedriger liegt.⁶

Schröder führt die Laborprüfung der Glühverlust-Methode zur Ermittlung organischer Substanzen an.⁷ Hierfür werden die Proben gewogen und anschließend bei 550 °C geblüht, wodurch organische Bestandteile verbrennen. Durch die Auswiegung der Probe nach dem Tempern kann die enthaltene Organik bestimmt werden, wobei der Glührückstand den mineralischen Anteil der Probe ausmacht.⁸ Die Methode stellt ein gängiges Verfahren in der Beurteilung von Substraten dar und wird zur Bestimmung des Humusgehalt und damit der Fruchtbarkeit eines Bodens herangezogen. Röhlen und Ziegert argumentieren, dass der Glühverlust für Lehm nicht aussagekräftig ist.⁹ Lehm erfährt bereits bei 100 °C irreversible Strukturveränderun-



Abb. 5.14 | Schadensbild bei organischen Bestandteilen im Putz

vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 21

vgl. Schröder, 2019 | S. 125

vgl. GeoDZ: Glühverlust

vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 19 – S. 20

gen durch die Entweichung von kristallinem Wasser aus den Tonmineralen. Die Wasserentweichung nimmt mit der Temperatur zu und spielt somit in den Massenverlust mit ein. Auch bei Vorkommen von Karbonaten, wie es bei Kalzit und Dolomit der Fall ist, fällt dieser Aspekt in die Problematik der Gewichtsabnahme. Zudem kann durch die Oxidation chemischer Verbindungen im Material ein Massenzuwachs einhergehen und zusätzlich das Ergebnis verfälschen.¹⁰ Im Rahmen der *Deponieverordnung 2008* werden unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Total Organic Carbon (TOC) aufgeführt, womit sich der organische Anteil bestimmen lässt.

ÖNORM EN 1484 Wasseranalytik – Anleitung zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC)

Das Verfahren stammt aus der Wasseranalytik und kann mit entsprechender Aufbereitung auch auf Bodenproben angewendet werden. Hierfür muss ein Eluat aus dem Feststoff hergestellt werden, wie es auch die Salzgehaltanalyse erfordert. Damit werden die organischen Bestandteile in einer Suspension gelöst und anschließend bestimmt. Anorganischer Kohlenstoff wird durch eine zusätzliche Vorbehandlung aus der Probe ausgeschlossen.

Die Norm gibt keine Prüfmethode an, jedoch sind im Laborbedarf diverse Geräte zu finden, welche die Prüfung durchführen können.

ÖNORM EN 15936 Boden, Abfall, behandelter Bioabfall und Schlamm – Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung

In diesem Verfahren wird bei Temperaturen von 900 bis 1500 °C das freigesetzte Kohlenstoffdioxid der Probe gemessen, welches durch organische Stoffe bei Verbrennungsprozessen freigesetzt wird. Zuvor muss der anorganische Kohlenstoff jedoch vollständig entfernt werden, was durch die Behandlung mit einer nicht oxidierenden Mineralsäure möglich ist.

Beide Prüfmethodiken wären mit einem erhöhten Geräteaufwand verbunden, jedoch gewährleisten sie eine quantitative Bestimmung von organischen Bestandteilen in Lehm. Durch vertiefende Forschung könnten deren Eignung für den Lehmabbau geprüft sowie mögliche Richt- und Grenzwerte festgelegt werden.

¹⁰ vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt: Merkblatt – Umgang mit humusreichem und organischem Bodenmaterial

5.3 Bestimmung des Salzgehalts



Zielstellung Salz- und Feuchtigkeitsschäden im Mauerwerk werden im aktuellen Bauwesen vor allem mit dem Sanierungsbau in Verbindung gebracht. Bei Vermutung eines erhöhten Salzgehalts im Boden ist eine Analyse dessen in der Baulehmprüfung ebenfalls relevant. Er kann gegebenenfalls ein Ausschlusskriterium für die Verwendung des Aushubmaterials im Baukontext sein.

5.3.1 Theoretischer Hintergrund

Die Bestimmung des Salzgehaltes wird in der Literatur ausschließlich von Röhlen und Ziegert erwähnt, wobei sie angeben, dass *die meisten Lehme [...] unkritisch*¹¹ sind.

Boden sowie Regenwasser enthalten von Natur aus Salze. Diese können jedoch durch natürliche Prozesse als auch durch den Menschen vermehrt in den Boden gelangen und zu Versalzungen führen. Eine Salzanalyse ist nach Röhlen und Ziegert nur notwendig, wenn das Material aus vorbelasteten Gebieten stammt:

1. Küstennahe Gebiete: Durch die Verbreitung von Meersalz im Landgebiet, kann es zu einer Salzanreicherung in küstennahen Böden kommen.
2. Landwirtschaftliche Flächen: In der Landwirtschaft sind verschiedene Quellen für die Anreicherung von Salzen im Boden verantwortlich. Darunter fallen die Verwendung von Düngemitteln und tierische Ausscheidungen, aber auch intensive Bewässerung von Ackerflächen.
3. Urbane Infrastrukturen: Im urbanen Kontext können durch die Streuung von Auftausalzen auf den Straßen im Winter zu einer vermehrten Ablagerung von Salzen im Boden führen.
4. Aride Klimazonen: Aride Klimazonen weisen eine verhältnismäßig höhere Verdunstung von Wasser im Boden auf als Niederschlag dieses zuführt. Als Resultat verbleiben die im Wasser gebundenen Salze mit dessen Verdunstung im Boden.¹²
5. Baugründe: Aushubmaterial aus städtischen Gebieten kann durch Abbruchmaterial kontaminiert sein, wenn dies auf zuvor genutzten Bauplätzen gewonnen wird.¹³

Grundsätzlich gilt ein erhöhter Salzgehalt in Aushub nicht als absolutes Ausschlusskriterium für dessen Verwendung. Zuschlagstoffe wie Sand oder Kies können den Salzgehalt im finalen Baustoff senken. Eignet sich der Aushub jedoch zur direkten Verwendung ohne weitere Zuschläge, besteht je nach Ursprungsort das Risiko eines erhöhten Salzgehalts im späteren Bauteil. Die Aufbereitung von betroffenem Material fordert einen großen Energie- und Süßwasseraufwand, welcher nicht verhältnismäßig und daher nicht empfohlen ist.¹⁴

Bauschädliche Salze

Nitrate (NO_3^-):

Mit erhöhten Nitratgehalten ist vor allem bei landwirtschaftlich genutzten Flächen zu rechnen, da dieses Salz beim Eiweißabbau von tierischem Urin und Fäkalien entsteht. Aufgrund von Düngemitteln wie Jauche oder Gülle ist das Vorkommen von Nitraten im Boden auch großflächig im Ackerbau zu erwarten.

Sulfate (SO_4^{2-}):

Sulfate gelangen oft als saurer Regen in den Boden. Durch Verbrennungsprozesse wird Schwefeldioxid freigesetzt, welcher durch den Regen gebunden wird und als Schwefelsäure in den Boden einzieht. In Verbindung mit Kalzium sind Sulfate vor allem in Form von Gips (Kalziumsulfat) bekannt, welcher ebenfalls in Meeresnähe zu finden ist.

Chloride (Cl^-):

Chloride sind in säurehaltigen Reinigungsmitteln sowie Tausalz enthalten. Daher ist vor allem im urbanen Kontext mit einem erhöhten Chloridgehalt im Boden zu rechnen.¹⁵

Bauschädliche Salze zeichnen sich durch ihre Wasserlöslichkeit aus, die es ihnen beispielsweise auch ermöglicht in bestehende Bauteile einzudringen. Das Vorkommen dieser äußert sich hauptsächlich durch optische Veränderungen an der Oberfläche des Bauteils; betroffene Stellen zeichnen sich durch fleckenartige Feuchteschäden und weiße Salzkristallisationen aus.

Es kann zudem zu strukturellen Schäden führen, welche tiefer im Element liegen. Die Reaktionen zwischen Wasser und Salz kann Hydratation sowie Auskristallisierungen, also das Anlagern von Wassermolekülen und deren Verfestigung mit dem Salz, bewirken. In beiden Prozessen geht eine Volumenvergrößerung einher, welche zum Kristallations- bzw. Hydratationsdruck führen und damit das Porengefüge des Baustoffes zerstören.¹⁶ Insbesondere raumtrennende Bauteile unterschiedlicher Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen sind hiervon betroffen. Hohe Feuchtigkeit und Frost-Tau-Wechsel können zur zusätzlichen Schädigung der strukturellen Festigkeit des Baustoffes führen.¹⁷

11 Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 25

12 vgl. Lexikon der Biologie, Bodenversalzung

13 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 26

14 ebd.

15 vgl. Fouad, 2008 | S. 472-473

16 vgl. Piihringer, 2002 | S. 513

17 Baunetzwissen, Salzbelastetes und feuchtes Mauerwerk

5.3.2 Prüfmethodik

Arbeitsschritt	Ort	Kooperation
Trocknung	Labor	Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien (Dipl.-Ing. Erich Streit)
Salzanalyse	Labor	Forschungsbereich für Wassergütwirtschaft (Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernis Saracevic, Dipl.-Ing. Zdravka Saracevic)
Zeitlicher Aufwand		Geräte und Materialien
Vorbereitung und Trocknung	2 Tage	Spektralphotometer Küvettentests für Nitrat, Sulfat, Chlorid (LCK339, LCK153, LCK331, Hach) Zentrifuge oder ggf. Filter Waage Schüttler oder Magnetrührer Erlenmeyer Kolben, Pipetten und Zubehör Mörser
Durchführung (insgesamt)	6 Tage	

Eine mögliche Prüfmethodik im Rahmen der Baulehmprüfung ist nicht festgelegt. Röhlen und Ziegert weisen auf Laboranalysen hin, welche zum Teil recht zeit- und gerätintensive Methoden sind und über die Möglichkeiten einer weitestgehend autarken Baulehmprüfung hinausgehen würden.¹⁸

Auch im genormten Bereich ist die Informationslage lückenhaft: Im österreichischen Normenwerk ist keine Prüfung beschrieben und Grenzwerte gibt es nur für feuchtes Mauerwerk. In den DIN-Normen für diverse Lehmbaumstoffe sind Grenzwerte festgelegt, jedoch wird darauf hingewiesen, dass die Notwendigkeit der Prüfung und die Wahl des Verfahrens nach Eigenverantwortlichkeit bestimmt werden sollen. Im Rahmen der Erstanalyse für deponiertes Aushubmaterial werden umfangreiche Schadstoffanalysen durchgeführt, welche unter anderem auch die Bestimmung der Salzgehalte einschließen. Die verwendeten Verfahren sind ebenfalls laborgebunden.

Aufgrund der Informationslage fand die Prüfung nach Beschreibung von der Diplomingenieurin Jasmine Alia Blaschek statt. Blaschek ist im Bereich Labor und Gutachten des Berliner Büros ZRS Ingenieure GmbH tätig und empfiehlt die Prüfung als quantitative Analyse durch das photometrische Verfahren.

„Dazu werden die Proben nach der Trocknung bis zur Massekonstanz zunächst aufgemörsert und

getrocknet, anschließend jeweils 5 g pro Probe in 200 ml destilliertes Wasser gegeben und für 24 Stunden im Wasserbad 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. Bereits die quantitative Bestimmung der Salzgehalte ist eine doch relativ aufwendige Prüfung [...]. Wir [ZRS] geben Baulehme erst dann frei, wenn wir auch den Salzgehalt geprüft haben, da Lehme mit zu hohem Salzgehalt nicht als Baulehme geeignet sind.“

Jasmine Alia Blaschek |
Mailaustausch | 09.02.2023

Die Photometrie beschreibt ein Messverfahren, das die Konzentration eines gelösten Stoffes in einer wässrigen Lösung bestimmt. Die Lösung wird mit Licht bestrahlt und anhand der Lichtabsorption und -emission gemessen, welche unter anderem durch die Salze beeinflusst wird. Durch den Vergleich mit einer Referenzlösung ohne Salze kann die Photometrie genaue Informationen über den Salzgehalt geben.¹⁹

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Küvettentests (LCK 153, LCK 311-1, LCK 339, Hach Lange) für das photometrische Verfahren verwendet, da diese relativ zeit- und kostengünstig ausfallen und sich daher für die Baulehmprüfung eignen. In der Regel finden Küvettentests Anwendung in der Betriebsanalytik

und generieren schnelle und recht präzise Ergebnisse. Die Durchführung der Küvettentests findet anhand vorgefertigter Verfahren statt. Je nach Salz durchlaufen die Proben unterschiedliche Abläufe und Reaktionen bevor sie im Spektralphotometer (DR 2800, Hach Lange) gemessen werden. Für die Salze Nitrate, Chloride und Sulfate werden jeweils separate Küvettentests durchgeführt.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Prüfungen wurden die Proben zusätzlich durch Ionenchromatografie (Ionenchromatographie-System, Hitachi) analysiert. Die Nitratbestimmung erfolgte zudem durch eine automatisierte Nährstoffanalytik (Analyseautomat, Skalar). Diese Prüfmethodiken dienen zur Ermittlung der Aussagekraft der durchgeführten Küvettentests.

Grenzwerte

Röhlen und Ziegert argumentieren gegen die Festlegung von Grenzwerten für Salzgehalte in Baulehm. Wie oben beschrieben können diese im späteren Prozess der Baustoffherstellung durch Zuschlagstoffe relativiert werden. Zur Orientierung und Einordnung der Salzgehalte werden in der vorliegenden Arbeit die Grenzwerte der DIN-Normen für Lehmbaustoffe (*DIN 18945 – 18948*) herangezogen. Im Vergleich zu den Werten für feuchtes Mauerwerk der *ÖNORM B 3355*²⁰ ist beim Nitratgehalt eine deutliche Abweichung zu verzeichnen. Dagegen befinden sich Chlorid im mittleren und Sulfat im geringfügigen Belastungsbereich.

Salze	DIN 18945 - 18948	ÖNORM B 3355*		
		gering (keine Maßnahmen erforderlich)	mittel (Einzelfall abhängig)	hoch (Maßnahmen erforderlich)
Nitrate	≤0,02% Massenanteil	<0,05% d. Masse	0,05-0,15% d. Masse	>0,15% d. Masse
Sulfate	≤0,10% Massenanteil	<0,10% d. Masse	0,10-0,25% d. Masse	>0,25% d. Masse
Chloride	≤0,08% Massenanteil	<0,03% d. Masse	0,03-0,10% d. Masse	>0,10% d. Masse
Gesamtanteil	≤0,12% Massenanteil	-	-	-

*Fehlergrenzen für Chlorid und Nitrat: ±5% bei Werten über 0,01% d. Masse, Fehlergrenzen für Sulfat: ±10% bei Werten über 0,02% d. Masse

Tab. 5.05 | Vergleich der Grenzwerte 1

Im Rahmen der Erstanalyse für die Deponierung der *Deponieverordnung 2008* und damit verbundenen Einordnung in Qualitätsklassen (siehe Kap. 2.2.3) wird Bodenaushub ebenfalls auf Schadstoffe untersucht, worunter auch die Salzgehalte fallen. Unter anderem werden die Nitrat-, Sulfat- und Chloridgehalte analysiert. Die Grenzwerte dieser Stoffe sind im

Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 in der Einheit [mg/kg TM] zu finden. Im Vergleich zu den in den DIN-Normen festgelegten Grenzwerten für Lehmbaustoffe fallen diese sehr unterschiedlich aus. Für Sulfate gilt eine höhere Toleranz, während für Chloride der gleiche Wert festgelegt ist. Bei Nitraten ist ein erheblich niedrigerer Wert definiert.

Salze	DIN 18945 - 18948	Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 ²¹			
		Qualität A1	Qualität A2-G	Qualität A2	Qualität BA
Nitrate	≤0,02% Massenanteil	100 mg/kg TM 0,01% Ma.	70 mg/kg TM 0,007% Ma.	100 mg/kg TM 0,01% Ma.	100 mg/kg TM 0,01% Ma.
Sulfate	≤0,10% Massenanteil	2.500 mg/kg TM 0,25% Ma.	1.500 mg/kg TM 0,15% Ma.	2.500 mg/kg TM 0,25% Ma.	2.500 mg/kg TM 0,25% Ma.
Chloride	≤0,08% Massenanteil	800 mg/kg TM 0,08% Ma.	800 mg/kg TM 0,08% Ma.	800 mg/kg TM 0,08% Ma.	800 mg/kg TM 0,08% Ma.

20 ÖNORM B 3355:2017-03 | S. 12
21 vgl. BAWP 2023, Teil 1 | S. 326 - 327

Tab. 5.06 | Vergleich der Grenzwerte 2

Auswahl der Proben

Vorab ist zu erwähnen, dass bei keiner Probe eine akute Annahme eines erhöhten Salzgehaltes bestand. Aufgrund der ehemaligen Flächennutzung oder anderen Gegebenheiten war jedoch bei einigen Proben ein erhöhter Salzgehalt denkbar, welche zur Durchfüh-

rung der Prüfung ausgewählt wurden. Zum besseren Vergleich wurde zudem eine Sonderprobe (SP1) herangezogen, die von der Küste Albaniens stammt und daher einen hohen Salzgehalt erwarten lässt.

Probe	Standort	Mögliche Ursache	Salze
P3	U2-Baustelle, Stiftgasse, 1070 Wien	Urbaner Stadtraum	Chloride (Tausalz)
P4	U2-Baustelle, Maria-Hilfer-Straße, 1070 Wien	Urbaner Stadtraum	Chloride (Tausalz)
P5	FH Campus Wien, Favoritenstraße, 1100 Wien	Ehemalige landwirtschaftliche Fläche	Nitrate (Düngemittel)
P6	FH Campus Wien, Favoritenstraße, 1100 Wien	Ehemalige landwirtschaftliche Fläche	Nitrate (Düngemittel)
P7	Nordbahnviertel, Leystraße, 1020 Wien	Ehemaliger Zugverkehr, Sekundärlagerstätte mit Schutt	Chloride (Tausalz, o.Ä.)
P8	Zukunftshof, Rosiwalgasse, 1100 Wien	Ehemalige landwirtschaftliche Fläche	Nitrate (Düngemittel)
P9	Zukunftshof, Rosiwalgasse, 1100 Wien	Ehemalige landwirtschaftliche Fläche	Nitrate (Düngemittel)
P14	Musterhaus, Europastraße, 2070 Mitterretzbach	Ehemalige landwirtschaftliche Fläche	Nitrate (Düngemittel)
P15	Neubau, Kurbadstraße, 1100 Wien	Ehemalige landwirtschaftliche Fläche	Nitrate (Düngemittel)
SP-A	Küstengebiet, Albanien	Küstengebiet	Sulfate (Gips)

Tab. 5.07 | Auswahl der Proben und Annahmen



Abb. 5.15 | Magnetrührer



Abb. 5.16 | Gewinnung des Eluats



Abb. 5.17 | Messung

5.3.3 Prüfungsdurchführung

Die Lehmproben wurden durch Aufmörserung homogenisiert und anschließend bei 65 °C im Trockenschrank für mindestens 24 Stunden bis zur Erlangung der Massenkonstanz gelagert. Dadurch konnte ein möglichst genaues Einwiegen der Proben gewährleistet werden.

1. Messung – Probedurchlauf – Chromatografie

Für jede Bodenprobe wurden drei Laborproben ange-
setzt, um mögliche Fehlmessungen auszuschließen.
Dafür wurden jeweils 5 g der getrockneten Proben
abgewogen und mit 200 ml destilliertem Wasser in
einen Erlenmeyer Kolben (Fassungsvermögen 500
ml) gegeben. Mittels Magnetrührer (RH basic 2,
IKA-Werke) wurden die Proben anschließend zwei
Stunden bei 80 Drehungen/Minute gerührt. Jedoch
wurde aufgrund kleiner Körner die Rührungen zum
Teil verlangsamt oder wiederholend zum Stillstand
gebracht. Aufgrund der erschwerten Bedingungen des
empfohlenen Wasserbads wurde die Lösung der Pro-
ben bei Raumtemperatur durchgeführt (25 °C).

Anschließend wurden die dispergierten Proben in die
Zentrifuge (3-30ks, Sigma) gegeben und bei 10.000
Drehungen/Minute und 26 °C für 15 Minuten zent-
rifugiert. Durch das klare Erscheinungsbild der vom

Feststoff abgesetzten Lösung wurde auf eine zusätzli-
che Filtration verzichtet.

Die Resultate von der Ionenchromatografie zeigten
eine sehr geringe Konzentrationen der gemessen
Salze in den Lösungen auf. In Folge dessen wurden die
Küvettentests nicht durchgeführt, da die Werte unter-
halb der definierten Messbereiche der Küvettentests
lagen. Es wurde eine zweite Messung angelegt.

2. Messung – Chromatografie und Küvettentests

Für die zweite Messung wurde die Probenmenge auf
auffällige Proben der ersten Messung reduziert (siehe
Tab. 5.08). Der Versuch wurde mit einem Verhältnis 5
g Probe zu 50 ml destillieren Wasser wiederholt. Auf-
grund der Problematik des verlangsamten Rührens
bei den Magnetrührern wurde für diese Proben ein
Schüttelmischer (Certomat U) für 2 Stunden bei 150
Bewegungen/Minute verwendet.

Die Analyse der Ionenchromatografie zeigte Kon-
zentrationen innerhalb der Messbereiche der
Küvettentests an. Daher wurden mit diesen Proben
jeweils ein gesonderter Test für den Nitrat-, Sulfat-
und Chloridgehalt gemacht. Die Durchführungen
fanden nach Versuchsanleitung der Herstellerfirma
statt.

Probe	Lab-nr.	Standort	1. M.	Auffälligkeiten	2. M.
P3	Ln2	U2-Baustelle	x	Chloride + Sulfate	x
P4	Ln3	U2-Baustelle	x	Sulfate	x
P5	Ln4	FH Campus Wien	x	-	-
P6	Ln1	FH Campus Wien	x	Nitrate	x
P7	Ln7	Nordbahnviertel	x	Sulfate	x
P8	Ln6	Zukunftshof	x	Nitrate + Chloride	x
P9	Ln5	Zukunftshof	x	-	-
P14	Ln9	Musterhaus	x	-	-
P15	Ln10	Kurbadstraße	x	-	-
SP-A	Ln8	Küstengebiet, Albanien	x	Chloride + Sulfate	x

Tab. 5.08 | Übersicht zu den Messungen

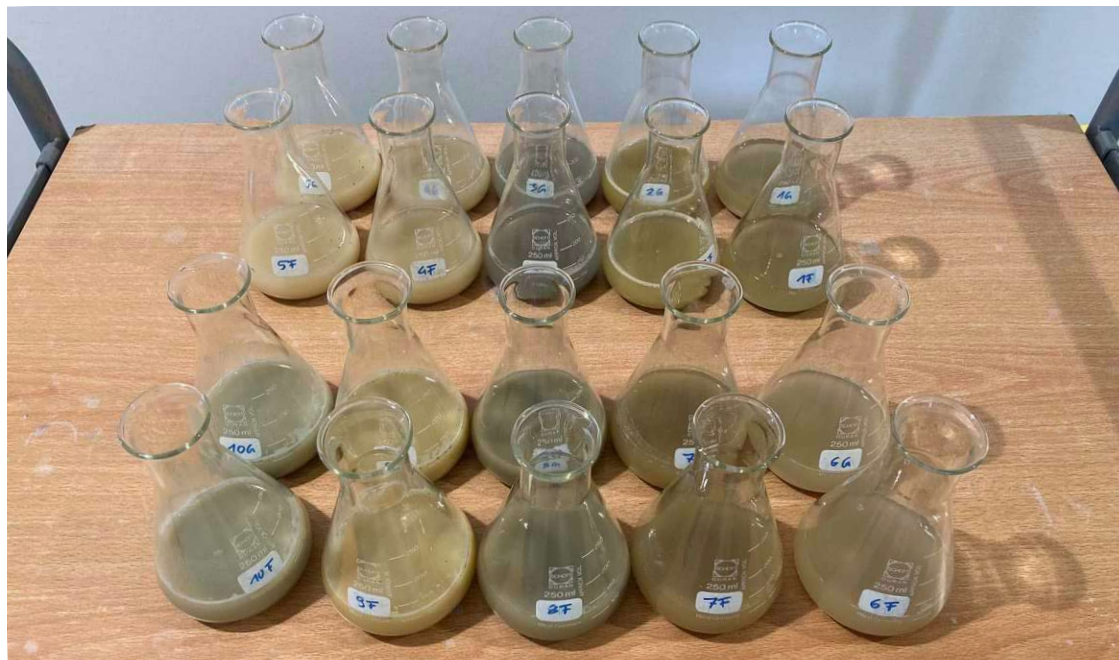


Abb. 5.18 | Dispergierte Proben



Abb. 5.19 | Absetzen der Proben

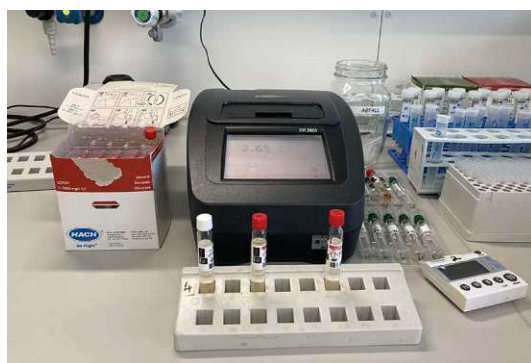


Abb. 5.20 | Messung der Küvettentests

5.3.4 Ergebnisse und Auswertung

In Übereinstimmung mit den Erwartungen fallen die Salzgehalte bei allen Proben sehr gering aus. Wie in den Diagrammen Abb. 5.21 und Abb. 5.23 erkenntlich ist, liegen die Nitrat- und Chloridwerte bei allen durchgeführten Prüfungen jeweils deutlich unterhalb der festgelegten Grenzwerte gemäß den DIN-Normen. Der Sulfatgehalt fällt bei 4 von 6 Proben so gering aus, dass er nicht mit den Küvettentests bestimmt werden kann. Unerwarteterweise wurde bei Probe Ln3 ein erhöhter Sulfatgehalt gemessen (siehe Abb. 5.22), welcher den angegebenen Grenzwert übersteigt. Eine mögliche Erklärung hierfür könnten lokale Verunreinigungen durch den örtlichen Baustellenbetrieb sein. Die Probe Ln2 stammt aus unmittelbarer Umgebung, ist jedoch aus einer anderen Tiefe gewonnen und weist keinen erhöhten Sulfatgehalt auf. Möglicherweise könnten durch umfangreichere Beprobung des Aushuborts Fehler durch Verschmutzung besser identifiziert werden.

Die hinzugezogene Sonderprobe (Ln8) aus dem Küstenbereich Albaniens zeigt im Verhältnis hohe Konzentrationen von Sulfat und insbesondere Chlorid. In beiden Fällen werden die Grenzwerte jedoch nicht überschritten.

■ Chromatografie (Lösung 5:50)
 ■ Küvettentest (Lösung 5:50)

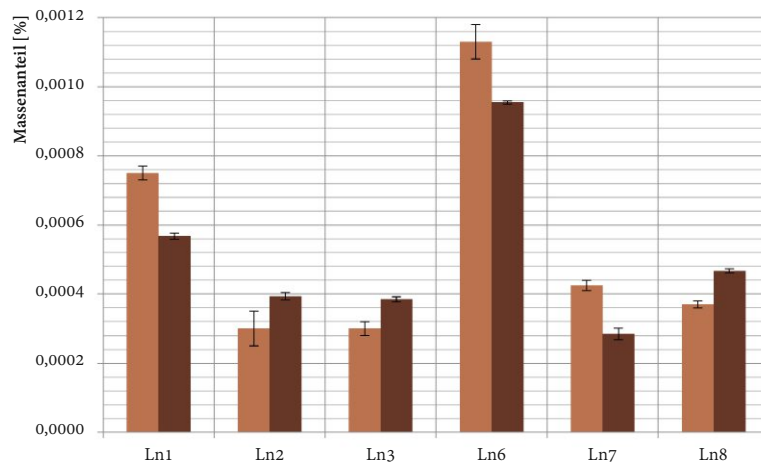


Abb. 5.21 | Nitratgehalte

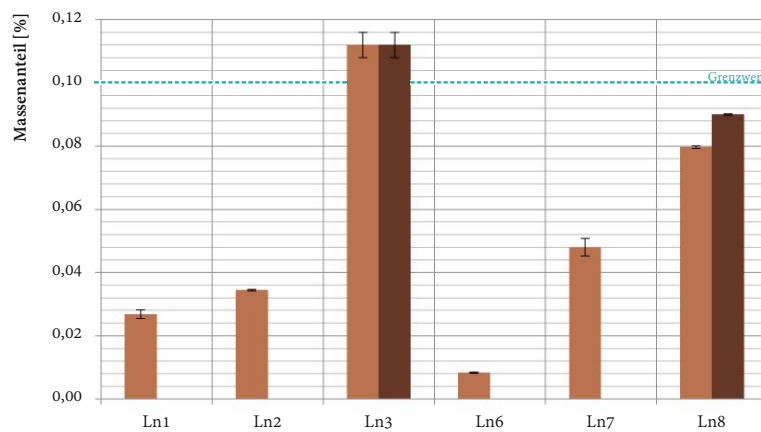


Abb. 5.22 | Sulfatgehalte

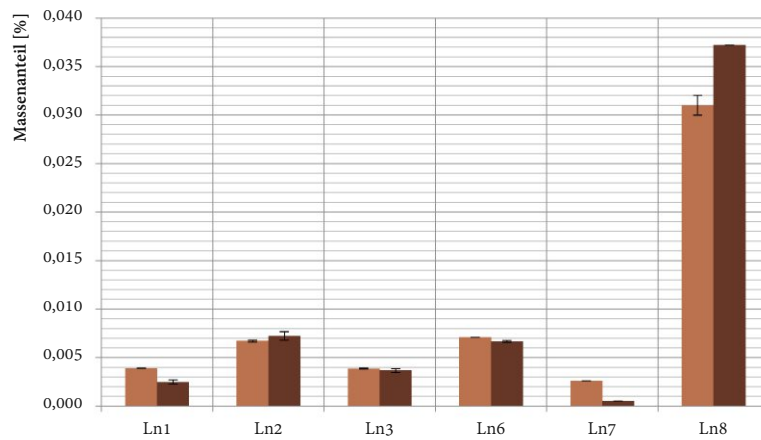


Abb. 5.23 | Chloridgehalte

Der Gesamtanteil mit dem in den DIN-Normen festgehaltenen Grenzwert von $\leq 0,12$ % Massenanteil kann durch die Addition der einzelnen Salzgehalte bestimmt werden. Aufgrund der fehlenden Messergebnisse der Küvettestests für die Sulfate wurde dies nur mit den Ergebnissen der Chromatografie verfolgt.

Der Gesamtanteil der Salze verdeutlicht die Differenzen und Proportionalität von Nitraten, Sulfaten und Chloriden. Sulfate machen bei allen Proben den Hauptanteil aus, während Nitrat, welches als bauschädlichstes Salz gilt, verschwindend gering ausfällt. Die DIN-Normen legen den Grenzwert für Sulfate fünfmal höher als für Nitrat.

Die festgelegte Grenze für Lehmbaustoffe von 0,12 % Massenanteil wird im Gesamtanteil von keiner Probe überschritten. Probe Ln3 liegt durch den erhöhten Sulfatgehalt nahe am Grenzwert. Auch Probe Ln8 nähert sich diesem durch die Addition von Sulfaten und Chloriden an.

Die Abweichungen der Messergebnisse des Chromatografen und der Küvettestests fallen sehr gering aus. Bei Nitrat befinden sich diese sogar an vierter Nachkommastelle und sind daher zu vernachlässigen. Jedoch weisen die Lösungen 1:50 und 1:200 mit gleicher Messtechnik durch Ionenchromatographie und automatisierter Nährstoffanalytik abweichende Ergebnisse auf. Dieser Aspekt ist vermutlich auf die differenzierte Aufbereitung der Proben zurückzuführen.

Es gilt zu betonen, dass die ermittelten Ergebnisse aus den Messungen aufgrund von variierenden Einflussfaktoren keine Aussagekraft besitzen und nur beispielhaft bewertet werden können.

1. Die ermittelten Werte der ersten Messung weisen hohe Abweichungen von der zweiten Messung auf. Aufgrund unterschiedlicher Probenaufbereitung sind diese zwar nicht ins Verhältnis zu setzen, jedoch geben sie Aufschluss über die Ein-

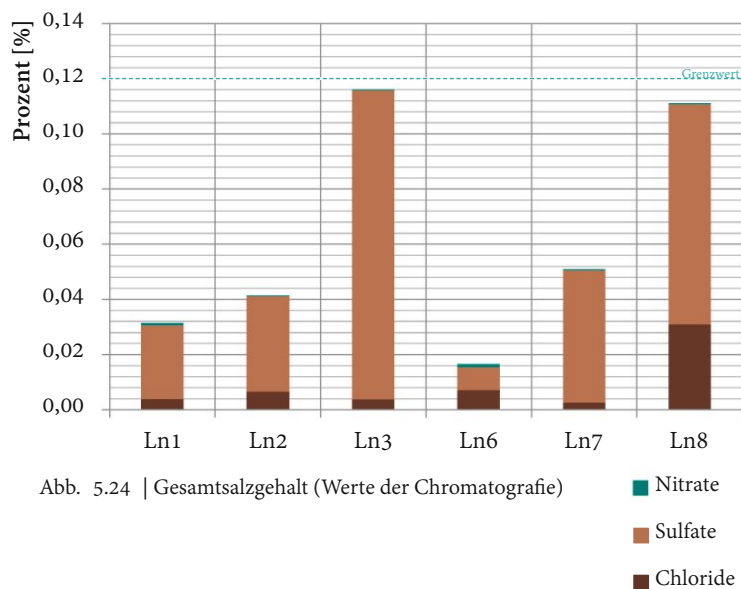


Abb. 5.24 | Gesamtsalzgehalt (Werte der Chromatografie)

2. flussnahme der angewandten Technik über den Lösungsvorgang der Salze.
2. Auch die notwendige Justierung der Verdünnung in der zweiten Messung kann Einfluss auf die Lösung der Salze nehmen. Bei vermindertem Verhältnis von Fest- und Flüssigstoff könnte die Salzkonzentration geringer ausfallen, da sich das Salz weniger aus dem Feststoff löst. Allgemein gewährleistet die Lösung von Salzen in destilliertem Wasser nicht die vollständige Extraktion aus dem Feststoff. In Laborverfahren werden für die nahezu vollständige Extraktion der Salze verschiedene Chemikalien eingesetzt.
3. Aus ressourcentechnischen Gründen wurden bei der zweiten Messung nur zwei Wiederholungen pro Probe durchgeführt, was im Bereich der chemischen Verfahren nicht ausreichend für den Ausschluss von Störfaktoren und der Angabe von Standardabweichungen und Messgenauigkeit ist. So kann beispielsweise das Vorkommen unterschiedlicher Korngrößen in den Bodenproben bereits Abweichungen bzw. Verfälschungen innerhalb der Messungen generieren.

Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang (Prüfberichte) zu finden.

5.3.5 Diskussion zur Prüfung

Die Küvettentests zeichnen sich vor allem durch die einfache Bedienung und die Unabhängigkeit von Laboren aus. Alle verwendeten Gerätschaften der Prüfungen könnten außerhalb des chemischen Labors genutzt werden. Das Abtrennen von Fest- und Flüssigstoffen kann alternativ zur Zentrifugation auch durch Filtration mit vermindertem Geräteaufwand stattfinden.

Die zusätzliche Analyse des Ionenchromatographen und des automatischen Analysators lieferten im Rahmen dieser Arbeit Aussagen zur Genauigkeit der Küvettentests. In den Diagrammen Abb. 5.21 bis Abb. 5.23 ist erkenntlich, dass es geringe Abweichungen der beiden Verfahren gibt. Diese beschränken sich auf die dritte - bei den Werten von Nitrat sogar auf die vierte Nachkommastelle. Dadurch ist anzunehmen, dass die Küvettentests eine angemessene Genauigkeit aufweisen, um sie in die Eignungsprüfung für Baulehm zu integrieren. Für die Gültigkeit dieser Behauptung sind weitere Versuchsreihen durchzuführen und zu bewerten.

Es ist ebenfalls auf einige Problematiken der Küvettentests bezüglich der Salzanalyse von Böden hinzuweisen. Zum einen sind sehr geringe Salzgehalte nicht mit den Küvettentests messbar. Bei der zweiten Messung der Sulfatkonzentration lagen nur zwei von sechs Proben im möglichen Messbereich. Dieser Aspekt ist vor dem Hintergrund bedenklich, dass die Proben der ersten Messung im Verhältnis 1:200 so gering ausfielen, dass der komplette Probensatz mit den Küvettentests nicht auswertbar war. Hinsichtlich der Aufbereitung der Proben für die Küvettentests könnte ein höheres Mischverhältnis jedoch essenziell für die Lösung von Salzen sein. Diesbezüglich gilt es weitere Analysen durchzuführen.

Hervorzuheben ist vor allem die lückenhafte Informationslage zum Prüfverfahren, welche die genannten Problematiken bedingt. Daher gilt es ein genormtes Verfahren zu entwickeln, um die Salzgehaltanalyse in die Eignungsprüfung für Baulehm einbinden zu können.

Grenzwerte sind für die Auswertung der gemessenen Werte notwendig, da sonst keine Aussagen mit den ermittelten Ergebnissen getroffen werden können. Die Grenzwerte könnten möglicherweise unter Angabe von prozentualen Zuschlagsmengen festgelegt werden.

Die Bestimmung der Salzgehalte stellt in der Eignungsprüfung von Baulehm das einzige Verfahren dar, welches wiederkehrende Anschaffungskosten pro Probe generiert. Diese belaufen sich auf jeweils 42,84 Euro bei drei Wiederholungen für die Küvettentests.²² Hinzu kommen Materialien wie Filter, Einwegschalen und Pipettenspitzen.

Um die Verwendung von Aushub optimal und schadensfrei zu gewährleisten und seine Prüfung entsprechend der modernen Analysen im Bereich der Baustoffkunde anzupassen, sind weiterführende Forschungen im Bereich der Salzanalyse empfehlenswert. Die Küvettentests stellen eine geeignete Option für die Analyse der Salzgehalte dar. Durch den recht geringen Kostenaufwand und vor allem durch die einfache Durchführung sind sie aufwendigen, teuren Laborverfahren vorzuziehen. Aufgrund der Wiederholungen und den drei verschiedenen Prozessen des Verfahrens scheint es jedoch sinnvoll, dieses vorrangig für Proben mit akutem Verdacht heranzuziehen. Eine erste Bewertung könnte durch die Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit gewonnen werden (siehe Alternative).

Letztlich sollte beachtet werden, dass im Rahmen der Erstanalyse für die Deponierung nach der *Deponieverordnung 2008* neben essenziellen Schadstoffen auch die Salzgehaltanalysen für Nitrate, Sulfate und Chloride durchgeführt werden. Diese liefern im Routineverfahren damit überaus wichtige und umfangreiche Prüfergebnisse für den Lehmabbau, weshalb eine Einbindung dieser daher dringend in Betracht zu ziehen wäre.

²² LCK339, LCK153, LCK331, Hach | Herstellerseite | 30.01.2024

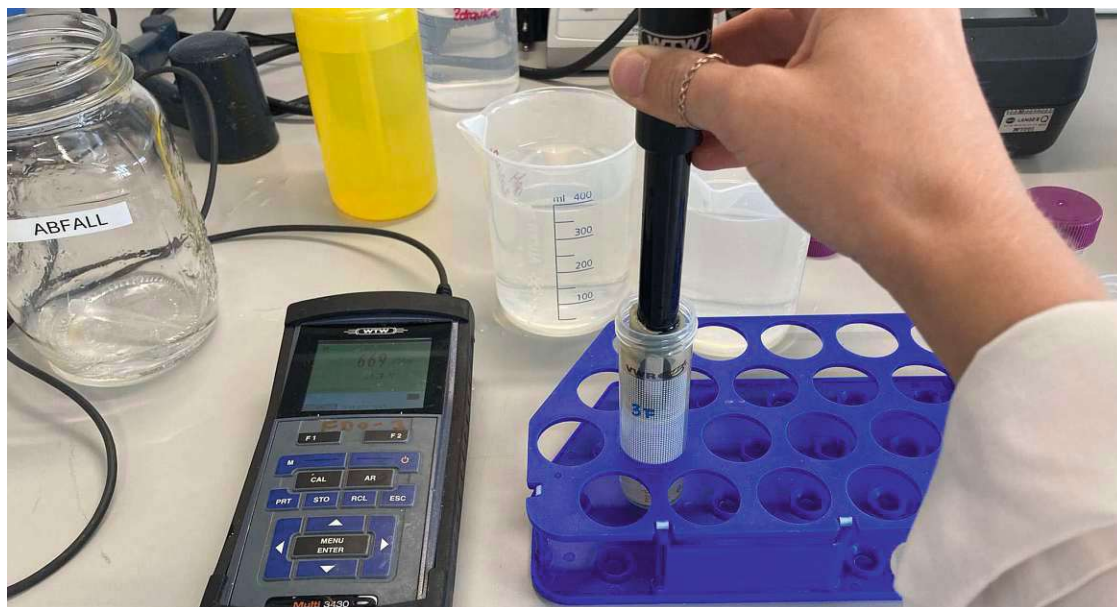


Abb. 5.25 | Messung der elektrischen Leitfähigkeit

5.3.6 Alternative: Spezifische elektrische Leitfähigkeit

A. Theoretischer Hintergrund

Im *WTA Merkblatt 4-5-99/D* zur Beurteilung von Mauerwerk wird darauf hingewiesen, dass der Gesamtsalzgehalt durch die spezifische elektrische Leitfähigkeit ermittelt werden kann.²³ Aufgrund des Vorliegens geringer Salzgehalte in den geprüften Bodenproben, stellt das Verfahren eine vielversprechende Alternative zu den Küvettentests dar. Mit dem Ziel Aussagen zur Notwendigkeit der Küvettentests zu ermitteln, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit durchgeführt. Die elektrische Leitfähigkeit einer wässrigen Lösung gibt Auskunft über die darin gelösten Ionen, die Salze einschließen. Aufgrund der Messung von elektrischer Spannung bzw. deren Stromfluss kann die Ionenkonzentration bestimmt werden. Eine Differenzierung der enthaltenen Ionen ist durch die elektrische Leitfähigkeit nicht möglich.

B. Prüfmethodik

Für die Durchführung des Prüfverfahrens wurde die *DIN ISO 11265* herangezogen. Diese beschreibt die Bestimmung der spezifischen elektrischen

Leitfähigkeit von in Wasser gelöstem Boden als Routineverfahren.

Die luftgetrocknete Probe wird im Verhältnis 1:5 mit Wasser vermengt, welches eine eigene elektrische Leitfähigkeit von maximal 0,2 mS/m aufweist. Hierfür wird die Probe 30 Minuten in einem Schüttelbehälter vermengt und anschließend abfiltriert. Eine Referenzlösung für die Bestimmung des Blindwertes wird ebenfalls im gleichen Verfahren angefertigt. Die Messung wird anhand eines Leitfähigkeitsmessgeräts durchgeführt.²⁴

C. Durchführung

Die Prüfung wurde mit den zehn anfänglichen Proben der ersten Messung durchgeführt. Hierfür wurden 20 g Probematerial in 100 ml Wasser in einem Schüttelmischer bei 150 Bewegungen/Minute für eine halbe Stunde vermengt. Anschließend wurden die Proben zentrifugiert, damit sich der Feststoff vom Wasser absetzt. Die Lösungen wurden auf ihre elektrische Leitfähigkeit mittels Leitfähigkeitsmessgerät (Multi 3430, WTW) bei 25°C Raumtemperatur gemessen.

D. Auswertung und Ergebnisse

Wie in Diagramm Abb. 5.26 erkennbar, bilden die in der Salzanalyse auffälligen Proben auch bei der elektrischen Leitfähigkeit die höchsten Werte ab. Insgesamt zeichnen sich starke Parallelen zum Gesamtanteil der Salzgehalte ab. Die Probe Ln3, welche über dem Grenzwert von Sulfat liegt, macht die zweitgrößte Position aus. Übertroffen wird sie von der Sonderprobe Ln8 aus dem Küstengebiet Albaniens. Diese weist zwar hohe Sulfat- und Chloridwerte auf, liegt jedoch unterhalb der jeweiligen Grenzwerte. Die Proben Ln1 und Ln6 zeigen vor allem erhöhte Nitratwerte im Vergleich zu den anderen Proben. Jedoch

fallen diese hinsichtlich des Grenzwertes von Nitrat noch immer sehr gering aus, was sich auch in der elektrischen Leitfähigkeit abbildet, da sie sich kaum von den „unauffälligen“ Proben unterscheidet. Die Leitfähigkeit von Probe Ln7 fällt ebenfalls gering aus, was mit den gemessenen Werten nachvollziehbar ist. Zusammengefasst spiegeln die Werte der elektrischen Leitfähigkeit die Ergebnisse der Salzanalysen akkurat wider. Aufgrund fehlender Werte zu Orientierung bzw. Einordnung der ermittelten Werte können jedoch keine Aussagen zum weiteren Verfahren gemacht werden, sondern es können lediglich Auffälligkeiten ermittelt werden.

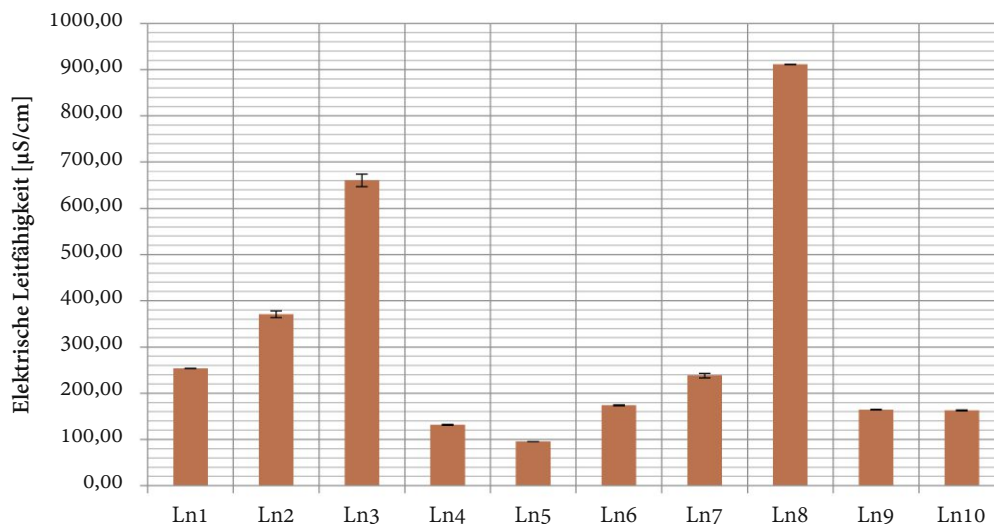


Abb. 5.26 | Elektrische Leitfähigkeit

E. Bewertung des Verfahrens

Im Vergleich zu den durchgeführten Küvettentests stellt die Prüfung zur elektrischen Leitfähigkeit ein kostengünstiges, vereinfachtes und zeitoptimiertes Verfahren dar. Da kaum Kosten für die einzelnen Proben bei dieser Prüfung entstehen, beschränken sich diese fast ausschließlich auf Anschaffungskosten. Bezüglich des Zeitfaktors gibt es keine Differenz in der Aufbereitung der Proben. Anzumerken ist jedoch, dass die Proben für die Leitfähigkeit nur luftgetrocknet sein müssen und daher keinen Trockenschrank benötigen. Zudem ist die Prüfung selbst wesentlich schneller (zehn Proben innerhalb max. 30 Minuten) durchzuführen als die drei einzelnen Prüfverfahren der jeweiligen Küvettentests.

Die Ergebnisse sind aufgrund fehlender Kennwerte und Messgrößen im Bereich Baulehm aktuell

schwierig zu bewerten. Trotzdem ist es denkbar, die elektrische Leitfähigkeit als Erstbestimmung der Salzgehalte durchzuführen und hohe Werte erneut durch die Küvettentests zu prüfen. Wie bei dem Ergebnis von Probe Ln8 erkenntlich ist, bedeutet eine hohe elektrische Leitfähigkeit nicht zwingend die Überschreitung der Grenzwerte. Dennoch könnten durch die Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit eventuell Proben für detailliertere Analysen ausgeschlossen werden. Es ist allerdings fraglich, wie sich die Überschreitung des Grenzwerts für Nitrate in dieser Prüfung äußern würde und ob dieser erkenntlich wäre.

Um die tatsächliche Gültigkeit der Ergebnisse und deren Bezugnahme auf bauschädliche Salze zu prüfen, gilt es umfangreiche Forschungen anzustellen.

5.4 Bestimmung des Kalkgehalts



Zielstellung

Die Ermittlung des Kalkgehaltes ist keine Prüfung, die zum Ausschluss der Verwendbarkeit des analysierten Baulehmes führt. Die Prüfung wird dennoch in den meisten Literaturwerken angeführt bzw. empfohlen. Sie kann Hinweise zur strukturellen Festigkeit des daraus entstehenden Baustoffes geben.

Nach eigener Einschätzung besitzt die Bestimmung des natürlichen Kalkgehalts keine Relevanz für die Eignungsprüfung von Baulehm.

5.4.1 Theoretischer Hintergrund

Grundsätzlich gilt es bei der Bestimmung des Kalkgehaltes zunächst zwischen natürlichem Kalk (Calciumcarbonat, CaCO_3) und sogenannten Löschkalk (Calciumhydroxid, Ca(OH)_2) zu unterscheiden.²⁵ Calciumcarbonat ist die natürlich vorkommende Form von Kalk und zählt zur am meisten auftretenden natürlichen Beimengung von Lehmen.²⁶ Es dringt durch Verwitterungsprozesse von Sedimentgesteinen sowie durch die Zersetzung von Außenskeletten von Schalentieren und Korallen in den Boden ein. Calciumhydroxid ist hingegen die durch künstliche Prozesse weiterentwickelte Form von Kalk, welche dem herkömmlichen Verständnis von Kalk entspricht.

Das Vorkommen von Calciumcarbonat ist in Lehm fast immer gegeben - hauptsächlich als Kalzit (CaCO_3) und Dolomit ($\text{CaMg(CO}_3)_2$).²⁷ Um diesen Umstand zu erläutern, ist die Definition von sogenanntem Mergel notwendig: Mergel ist ein Sedimentgestein und setzt sich aus Kalk und Ton zusammen. Je nach vorhandenen Anteilen kann Mergel in unterschiedlichen Bereichen der Baustoffherstellung hinzugezogen werden. Material mit einem hohen Kalkanteil, das noch unter die Begrifflichkeit Kalkstein fällt, wird unter Zuführung von Sand beispielsweise für Kalkmörtel oder -putz genutzt. Mischformen von Mergel mit erhöhtem Kalkanteil finden in der Zementindustrie ihre Verwendung. Mergel mit hohem Tonanteil findet in Verbindung mit Sand und Schluff in der Ziegelherstellung und im Lehmbau Anwendung. Jedoch ist der Lehmbau die einzige Verarbeitung des Materials, in der kein Brennvorgang und damit verbundener Energieaufwand notwendig ist. Schneider, Schwimann und Bruckner geben an, dass Tonmergel mit unter 5 Prozent Kalkgehalt als Baulehm verwendbar ist, welcher sich auch für tragende Lehmbauteile eignet. Bis zu 30 Prozent sei dieser auch für nicht tragende Elemente im Lehmbau nutzbar.²⁸

Während Niemeyer 1982 der separaten Bestimmung von Calciumcarbonat keine Bedeutung beimisst, da diese ohnehin in der Bindekraftprüfung abgedeckt wird,²⁹ gewinnt die Prüfung in neueren Literaturwerken mehr Aufmerksamkeit. Im Gegensatz zu Calciumhydroxid kann Calciumcarbonat gemäß Röhlen und Ziegert zur strukturellen Festigkeit von späteren Lehmstoffen beitragen. Die Vorausset-

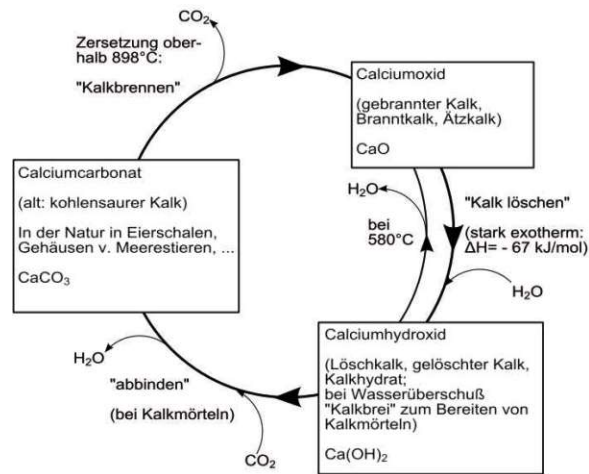


Abb. 5.27 | Technischer Kalkkreislauf

Bezeichnung	Kalkanteil [%]	Tonanteil [%]
Hochprozentiger Kalkstein	95 – 100	0 – 5
Mergeliger Kalkstein	85 – 95	5 – 15
Mergelkalk	75 – 85	15 – 25
Kalkmergel	65 – 75	25 – 35
Mergel	35 – 65	35 – 65
Tonmergel	25 – 35	65 – 75
Mergelton	15 – 25	75 – 85
Mergeliger Ton	5 – 15	85 – 95
Hochprozentiger Ton	0 – 5	95 – 100

Tab. 5.09 | Unterscheidung von Mergel nach C. W. Correns (1949)

zung hierfür ist die gleichmäßige Verteilung feiner Kalkpartikel innerhalb des Lehms. Im erdfeuchten Zustand ist das Calciumcarbonat durch CO_2 -haltiges Wasser, wie Regen, leicht angelöst. Im Trocknungsprozess bildet es Mineralstrukturen aus, welche zusätzlich zur vorhandenen Bindigkeit durch die Tonminerale die Festigkeit des Materials erhöhen.³⁰

25 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 25
 26 vgl. Schröder, 2019 | S. 122
 27 s. Schmitt, Burbaum, Bormann, 2022 | S. 154
 28 vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 55
 29 vgl. Niemeyer, 1982 | S. 37
 30 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 25

Weißkalk ist entsteht aus einem Kalkstein und weist in erhöhtes Vorkommen von Calciumoxid (CaO) auf.

¹ vgl. Ender, 2022 | S. 55
² vgl. Ender, 2022 | S. 74
³ mehr dazu: Ziegert, Zurück in die Zukunft, Folie 57
⁴ Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 84
⁵ vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 140
⁶ s. Grimm: Was ist Luftkalkputz
⁷ vgl. DGL-Merkblatt 456, 2022 | S. 5
⁸ vgl. Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden, 2000 | S. 3
⁹ vgl. Schmitt, Burbaum, Bormann, 2022 | S. 572 - 574
¹⁰ vgl. ÖNORM EN 16907-4:2019 | S. 17
¹¹ vgl. Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V., 2013 | S. 8 - 9
¹² vgl. chemie.de, Kalkwasserprobe

EXKURS

Calciumhydroxid im Boden

Bei der Terminologie „Kalk“ ist es aufgrund der Auswirkungen im Lehmbau essenziell zu unterscheiden: Calciumhydroxid entsteht durch den Brenn- und anschließenden Löschvorgang von Calciumcarbonat. Die beiden Formen von Kalk unterscheiden sich in Verbindung mit Lehm bezüglich der daraus resultierenden bauphysikalischen Eigenschaften.

Bei Vermengung von Calciumhydroxid mit Lehm entsteht eine Wechselwirkung von Calciumhydroxid und Tonmineralen, welche die Festigkeit von Lehm drastisch herabsetzt. Philipp Ender weist in seiner Diplomarbeit nach, dass die Rohdichte durch die Zugabe von Löschkalk verringert wird (7 Prozent bei 6 Massenprozent Weißkalk¹ im Lehm).³¹ Zudem testet er die Druckfestigkeit des mit Kalk versetzten Lehmbaustoffes: Bei 8 Massenprozent ermittelt Ender eine Verringerung dieser um etwa zwei Drittel im Vergleich zum reinen Lehmabbaustoff.³² Auch die dynamische Feuchtigkeitssorption nimmt durch die Zugabe von hydraulischen Kalk ab.³³ Schneider, Schwimann und Bruckner verweisen auf die Theorie des Mineralogen Kurt Endell von 1935. Er argumentiert diesen Aspekt durch die Auflösung des Materialgefüges in Einzelkörnungen durch Calciumionen (Ca²⁺), die in Wasser gelöstem Calciumhydroxid auftreten (Sumpfkalk). Dies äußert sich in Form einer *krümeligen Struktur*³⁴ des Ausgangstoffes, der als spröde und porös umschrieben werden kann.

In geringen Mengen (<1 Prozent) kann Calciumhydroxid das Schwindmaß eines Lehmes herabsetzen.³⁵ Die vermeintliche Wasserbeständigkeit durch Zuführung von Kalk ist nur bei sogenanntem hydraulischem Branntkalk gegeben. Dieser wird unter anderem aus Kalkmergel gewonnen, der anderes als reiner Kalkstein, Vorkommen hydraulischer Bindemittel aufweist und nicht rückführbar ist.³⁶

Hochprozentiges Calciumhydroxid kann durch die Aufnahme von in der Luft befindlichem Kohlenstoffdioxid wiederum zu Calciumcarbonat werden. Dieser Vorgang wird ‚Abbinden‘ genannt und vervollständigt den technischen Kalkkreislauf (siehe Abb. 5.27). Der Prozess kann jahrelang andauern, weshalb die Rückführbarkeit des Materials nur bedingt gegeben ist.

EXKURS

In landwirtschaftlich genutzten Regionen kann durch die sogenannte Kalkung oder Kalkdüngung des Bodens ein erhöhter Kalkgehalt vorkommen. Zum Einsatz kommt hierfür hauptsächlich Calciumcarbonat, in diesem Kontext auch bekannt als kohlesaurer Kalk.³⁷ Die alkalische Eigenschaft von Kalk wirkt der natürlichen Bodenversauerung durch organische Prozesse entgegen, um die Fruchtbarkeit des Bodens zu erhalten.³⁸ Branntkalk findet seltener Einsatz in der Landwirtschaft; Er wird hauptsächlich für die Bodenauflockerung von mittelschweren Böden, d.h. mit erhöhtem Tonanteil, verwendet. Der Branntkalk wird beim nächsten Regen oder Wässerung abgelöscht, wodurch Calciumhydroxid entsteht. Dieses bindet die Tonminerale, was die sogenannte tonflockende Wirkung beschreibt, und stabilisiert damit die Bodenstruktur. Die eingangs erwähnte krümelige Struktur wird im landwirtschaftlichen Bereich angestrebt um unter anderem eine bessere Bearbeitung des Bodens zu gewährleisten.

In der Baubranche wird Kalk zur Stabilisierung von Baugründen verwendet. Bereits vor mehreren tausend Jahren wurde in China Branntkalk zur Baugrundverbesserung herangezogen. Das Verfahren wird heute in der Oberflächenverfestigung bis zu 1 m Tiefe eingesetzt und bei tiefreichenden Bodenstabilisierungen von bis zu 25 m verwendet. Nach Sinner 1 werden Kalk und Zement-Kalk-Mischungen gewöhnlich für ton- und schluffhaltige Böden herangezogen.³⁹ Die ÖNORM EN 16907-4 präzisiert die Verwendung von Kalk bei nassen, bindigen Böden auf normierten Luftkalk, welcher ungelöschem Kalk (Branntkalk), Kalkhydrat (Calciumhydroxid) oder Kalkmilch (gesättigte Calciumhydroxid-Lösung) entspricht.⁴⁰ Der Kalk wird mit dem Boden vermengt, um die Plastizität des Bodens durch einen Tongehalt herabzusetzen.⁴¹

Der Nachweis von Calciumhydroxid ist wesentlich aufwändiger als die folgende Kalkgehaltprüfung, wobei das naheliegende Verfahren die Kalkwasserprobe ist. Dafür muss jedoch das Calciumhydroxid zunächst aus der Bodenprobe gelöst werden. Nach Abfiltrieren wird der Lösung dann Calciumoxid hinzugegeben, das sich bei vorhandenem Calciumhydroxid trüb färbt aufgrund der auftretenden Carbonatbildung.⁴²

5.4.2 Prüfmethodik

Arbeitsschritt	Ort	Kooperation
Aufbereitung und Durchführung	Zeichensäle Arsenal (FS Architektur)	-
Zeitlicher Aufwand		Geräte und Materialien
Vorbereitung und Durchführung	0,5 Tag	Flache Schalen 10%-ige Salzsäure Ggf. Pipette

In der Literatur wird ausnahmslos auf die qualitative Bestimmung des Kalkgehalts hingewiesen. Diese erfolgt mittels Beträufelns der Probe mit Salzsäure. Lediglich Schröder ergänzt das Verfahren um eine quantitative Prüfung.⁴³ Jedoch beschreibt er unter dem Punkt Einflussgrößen die Auswirkung von Calciumhydroxid in Lehm und bezieht sich daher nicht auf den natürlichen Kalkgehalt. Niemeyer führt die Möglichkeit einer visuellen Einschätzung an, da sich ein hoher Kalkgehalt in einer hellen bis weißlichen Färbung äußert. Die Färbung kann ebenfalls auf einen hohen Magnesiumgehalt hinweisen, weshalb es die Einschätzung zu prüfen gilt. Zudem weist Niemeyer darauf hin, dass organische Bestandteile bei Zugabe von Salzsäure die gleiche Reaktion wie Kalk hervorrufen können.⁴⁴

In normierten Prüfungsverfahren wird die Bestimmung des Kalkgehaltes in unterschiedlicher Intensität und Prozessen beschrieben. Für die Bau-

lehmprüfung ist die Prüfung nach *EN ISO 14688-1* empfohlen. Darin wird die Prüfung durch das Btropfen einer 10-prozentigen Salzsäure auf das vorzugsweise getrocknete Probematerial durchgeführt. Feuchte oder nasse Lehmproben können zu verzögerten Reaktionen führen. Der Kalkanteil wird durch das Auftreten eines Aufbrausens beurteilt, was den sichtbaren Schaumeffekt der Reaktion beschreibt. Durch Intensität und Dauer des Aufbrausens wird der Kalkanteil mittels Tabelle der Norm beurteilt.

Im Fall einer quantitativen Prüfung kann zudem durch die *EN ISO 14688-2* unter Angabe des verwendeten Verfahrens die Klassifizierung vorgenommen werden. In der nachfolgenden Tabelle sind qualitative und quantitative Ergebnisse verzeichnet und ins Verhältnis gesetzt. Die Aufführung der Tabelle dient in dieser Arbeit zur groben Einschätzung des prozentualen Kalkgehalts im Umkehrschluss.

Kalkgehalt	Reaktion bei Zugabe von 10-prozentiger Salzsäure nach <i>EN ISO 14688-1</i>	Kalkgehalt in Prozent nach <i>EN ISO 14688-2</i>
nicht kalkhaltig	kein Aufbrausen	<1 %
leicht kalkhaltig	schwaches oder sporadisches Aufbrausen	1 – 5 %
kalkhaltig	deutliches, aber nicht andauerndes Aufbrausen	5 – 25 %
sehr kalkhaltig	starkes und langandauerndes Aufbrausen	25 – 50 %
sehr stark kalkhaltig oder Kalk	keine Angabe	>50 %

Tab. 5.10 | ‚Begriffe für die Bezeichnung des Kalkgehaltes‘, ‚Klassifizierung des Kalkgehalts‘

43 s. Schröder, 2019 | S. 123
44 vgl. Niemeyer, 1982 | S. 38

Die Hinzugabe der Salzsäure (HCl) zum Calciumcarbonat (CaCO_3) bewirkt unter Aufschäumen die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) sowie die Bildung von Wasser (H_2O) und dem Salz Calciumchlorid (CaCl_2). In der Prüfung äußert sich dies durch besagtes Aufbrausen und der sichtbaren Feuchtigkeit der Probe nach der Durchführung.

Chemische Reaktion:

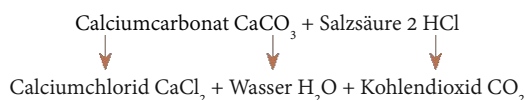


Abb. 5.28 | Salzsäureprüfung



Abb. 5.29 | Beträufeln der Probe mit Salzsäure

5.4.3 Prüfungsdurchführung

Kleine Mengen der jeweiligen Proben wurden zunächst einzeln mit dem Mörser zerstoßen, um möglichst viel Oberfläche zu generieren. Diese wurden wiederum in kleine Schalen gegeben und anschließend mit 10-prozentiger Salzsäure beträufelt, wofür eine Pipette verwendet wurde.

Die Proben wiesen unterschiedliche Reaktionen auf, welche von keinem auffälligen Verhalten bis zu starkem, langandauerndem Aufbrausen reichten.

5.4.4 Ergebnisse und Auswertung

Im Allgemeinen gestaltet sich die Bewertung des Verfahrens etwas schwierig, da die Begrifflichkeiten ‚nicht anhaltendes‘ und ‚langandauerndes‘ Aufbrausen Spielraum für Interpretation lassen. In der Versuchsdurchführung wurde deshalb im Fall eines Aufbrausens die Dauer dessen gemessen. Im Vergleich der Proben wurde festgelegt, dass ein Aufbrausen bis 5 Sekunden als ‚nicht anhaltend‘ und über 5 Sekunden als ‚langandauernd‘ definiert wird. Es ist anzumerken, dass die Intensität bei langanhaltendem Aufbrausen mit fortschreitender Zeit abnimmt.

Die Auswertung erfolgt nach *EN ISO 14688-1* und unterscheidet die Proben in sehr kalkhaltig, kalkhaltig, leicht kalkhaltig und nicht kalkhaltig:

Probe	Aufbrausen	ggf. Zeit [sec]	Auswertung nach DIN EN ISO 14688-1	Kalkgehalt nach DIN EN ISO 14688-2
P1	lang, stark	14	sehr kalkhaltig	25 - 50 %
P2	kurz, stark	5	kalkhaltig	5 - 25 %
P3	lang, stark	7	sehr kalkhaltig	25 - 50 %
P4	lang, stark	13	sehr kalkhaltig	25 - 50 %
P5	lang, stark	7	sehr kalkhaltig	25 - 50 %
P6	kurz, stark	4	kalkhaltig	5 - 25 %
P7	kurz, stark	4	kalkhaltig	5 - 25 %
P8	lang, stark	9	sehr kalkhaltig	25 - 50 %
P9	kurz, stark	2	kalkhaltig	5 - 25 %
P10	kein Aufbrausen	-	nicht kalkhaltig	< 1 %
P11	kein Aufbrausen	-	nicht kalkhaltig	< 1 %
P12	kurz, stark	5	kalkhaltig	5 - 25 %
P14	kurz, stark	1	kalkhaltig	5 - 25 %
P15	kurz, stark	2	kalkhaltig	5 - 25 %
P16	schwach, sporadisch	-	leicht kalkhaltig	1 - 5 %
P17	kurz, stark	2	kalkhaltig	5 - 25 %
P18	kurz, stark	1	kalkhaltig	5 - 25 %
SP-A	lang, stark	30	sehr kalkhaltig	25 - 50 %

Tab. 5.11 | Ergebnisse der Salzsäureprüfung

Im Vergleich der Säurereaktionen ist der Großteil der Proben kalkhaltig oder sehr kalkhaltig. Nur wenige Proben wiesen schwaches oder gar kein Aufbrausen auf.

Mittels der Klassifizierungstabelle nach *EN ISO 14688-2* wurde zur besseren Einordnung der Ergebnisse rückschlüssig der Prozentanteil des Kalkgehaltes bestimmt. Die Tabelle der Norm definiert eine zusätzliche Klasse, welche ‚sehr stark kalkhaltig und Kalk‘ mit einem Prozentanteil von 50 bis 100 Prozent ausmacht (siehe Tab. 5.11). Nach eigener Schätzung ist eine solcher Kalkgehalt nicht bei den Proben enthalten.

Vor allem die Sonderprobe (SP-A) aus einem Küstenbereich in Albanien scheint über einen hohen Kalkanteil zu verfügen, da sie ein bis zu 30-sekündiges Aufbrausen erkennen ließ. Dies entspricht der in der Norm *EN ISO 14688-1* beschriebenen Vorkommen von stark kalkhaltigen Böden in Küstengebieten.⁴⁵ Auch die weißliche Verfärbung des Materials gibt bereits visuell Hinweise darauf.

Die Proben 15 bis 17 stammen aus verschiedenen Tiefen einer Probeschürfung und zeigen unterschiedliche Kalkgehalte. Dies ist durch die Entstehung bzw. das Eindringen von Kalkpartikeln in den Boden zu erklären.

5.4.5 Diskussion zur Prüfung

Das Vorkommen von Calciumcarbonat ist für den Einsatz im Lehm- und Ziegelbau kein Ausschlusskriterium oder definiert bestimmte Eigenschaften des Materials. Die Bestimmung des natürlichen Kalkgehalts bildet somit eine Ausnahme von der Intention der Eignungsprüfung von Baulehm. Die Durchführung der Salzsäureprüfung dient „lediglich“ der Erkenntnis, ob die spätere Druckfestigkeit des Lehms ganz auf den Tonanteilen basiert oder auch (sehr beschränkt) von einem Kalkanteil ausgeht. In welchem Maß sich der Kalkgehalt tatsächlich auf die spätere Druckfestigkeit auswirkt, bedarf weiterführender Forschung. Es wäre ebenfalls denkbar, dass die ausgebildeten Mineralstrukturen von Kalk Einfluss auf das Schwindverhalten des Materials nehmen und Aufschluss über dessen Verhalten geben.

Die Einbindung der Kalkgehaltanalyse in die Eignungsprüfung von Baulehm ist nach Niemeyers Einschätzung keine essenzielle Notwendigkeit. Nach eigenem Ermessen bestätigten die Durchführung und Auswertung der Prüfung Niemeyers Aussage, da die Ergebnisse keinen direkten Einfluss auf die Verwendbarkeit von Aushub haben. Es besteht der Verdacht, dass die irrtümliche Relevanz von Kalk im Lehm- und Ziegelbau ursprünglich aus der Ziegelherstellung stammt. Dort können Kalkeinschlüsse im Material beim Brennvorgang zur Brechung von Ziegeln führen, weshalb dessen Bestimmung notwendig ist.

Gegensätzlich hierzu könnte das Vorkommen von Calciumhydroxid ein Ausschlusskriterium sein, da dieses, wie beschrieben, die strukturelle Festigkeit von Lehm- und Ziegelbaustoffen negativ beeinflusst. Da Calciumhydroxid jedoch von Natur aus kaum vorkommt, ist dessen Auftreten in unberührten Flächen auszuschließen. Das Vorkommen von industriell gefertigtem Kalk im Boden kann nicht mit der Salzsäureprüfung nachgewiesen werden.

5.4.6 Alternative: Essigessenz

Röhlen und Ziegert geben an, dass die Prüfung ebenfalls mit konzentriertem Haushaltsessig durchgeführt werden kann.⁴⁶ Essigessenz hat in der Regel Säureanteile von bis zu 25 Prozent und ist im herkömmlichen Drogeriemarkt zu erwerben. Vorteil hierbei ist, dass die Lösung umweltfreundlicher ist.

Die ersten drei Proben wurden zusätzlich mit Essigessenz beträufelt, um das Verfahren zu testen. Die Reaktion mit Calciumcarbonat fällt jedoch wesentlich schwächer aus als bei 10-prozentiger Salzsäure (siehe Abb. 5.30). Bei der chemischen Reaktion ent-

steht zwar ebenfalls Wasser und Kohlenstoffdioxid, jedoch ist Essigsäure eine schwache Säure, weshalb der Schaumeffekt vermindert auftritt. Es kommt zwar zu Blasenbildung, allerdings fallen die Blasen extrem klein aus und sind mit bloßem Auge nur bedingt auswertbar.

Aufgrund der erschwerten Einschätzung bzw. Auswertung des Kalkgehaltes durch die abgeschwächte Reaktion wurde im weiteren Verlauf der Prüfungen auf die Verwendung von Essigessenz verzichtet.



Abb. 5.30 | Vergleich der Säurereaktion, links: Salzsäure, rechts: Essigsäure

⁴⁶ vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 24

5.5 Bindekraftprüfung



Zielstellung

Die Bindekraft von Lehm ist nach Niemeyer vor allem für die Klassifizierung von Lehmen heranzuziehen. Eine zu geringe Bindekraft kann ein Ausschlusskriterium für die Verwendung im Lehm-bau darstellen, das sich jedoch durch Zuschlagstoffe relativieren lässt.

5.5.1 Theoretischer Hintergrund

Die Bindekraftprüfung wurde 1944 von Richard Niemeyer in dem Artikel *Verfahren zur Prüfung und Beurteilung von Lehm* im Architekturmagazin *Bauwelt* unter der Bezeichnung „Achterlingsprüfung“ vorgestellt. Niemeyer entwickelte das Verfahren und testete es an 400 Proben, bevor er es in seinem Buch *Der Lehmbau* im Jahr 1946 aufnahm. Seine ursprüngliche Intention war die Klassifizierung von Lehmen, um diese dadurch den Einsatzbereichen bzw. Lehm- baustoffen zuzuordnen. Niemeyer führt an, dass die Klassifizierung durch die Bindekraftprüfung stattfinden kann, jedoch Aussagen zur möglichen Verarbeitung nur in Kombination mit Erfahrungswerten gemacht werden können.⁴⁷ Die Bindekraftprüfung von Niemeyer wurde in die 1971 zurückgezogenen Lehm- bau-Normen aus dem Jahr 1952 in Deutschland aufgenommen: *DIN 18952 – Baulehm, Blatt 2: Prüfung von Baulehm*. In der aktuellen Lehm- bauarchitektur wird bis heute auf Niemeyers Bindekraftprüfung verwiesen – zum Teil sind die originalen Pläne zur Herstellung des Prüfgeräts nach *DIN 18952 Bl2* abgebildet.

Historische Entwicklung

Es stellt sich bezüglich der ungewöhnlichen Geometrie der Prüfkörper die Frage, woher die Achterlingsprüfung stammt und in welchem Bezug sie zum Lehm- bau steht. Niemeyer gibt in seinem Artikel in der *Bauwelt* an, dass die Bedeutung des Prüfkörpers auf dessen kleinsten Querdurchschnitt von 5 cm² zurückgeht. Die Geometrie wird mittels ‚von der Zementprüfung her bekannten Achter-Formen, die in jedem Baustoffprüfraum vorhanden sind‘⁴⁹ durchgeführt. In der Materialprüfung von Zement ist diese Form von Prüfkörper heutzutage nicht auffindbar und lässt sich nur in Bezug auf deren historische Entwicklung erklären. Zement sowie Mörtel wurden in der Vergangenheit auf deren Druck- und Zugfestigkeit getestet. Bei der Druckfestigkeit wurde zumeist die Würfelform für

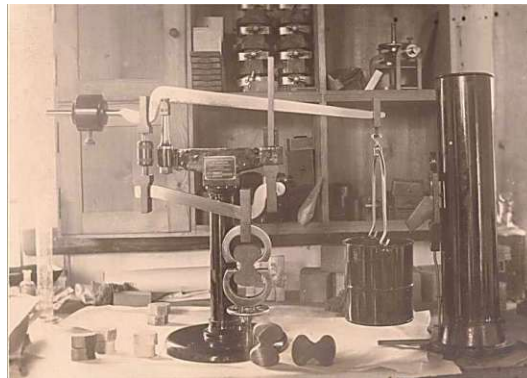


Abb. 5.31 | Achterlingsprüfgerät, 1925

EXKURS

Im Rahmen der Recherche dieser Arbeit ist die Publizierung eines Fotos aus dem Stadtarchiv Kappeln in den Fokus gerückt. Es stammt nach Angaben des Veröfentlicher aus dem Jahr 1925. Es wurde damals im Prüflabor bei der Erstellung der Drehbrücke in Kappeln aufgenommen und zeigt ein ähnliches Prüfgerät, welches auch Niemeyer in seinem Werk beschreibt.

Der Publizist des Fotos war am Bau der neuen Drehbrücke beteiligt und betrieb historische Nachforschungen zur ehemaligen Brücke. Die Verwendung des Geräts im Bauprojekt ist dem Veröfentlicher nicht bekannt.⁴⁸

die Prüfkörper verwendet, während für die Zugfestigkeit unter anderem eine Achterform als Geometrie gewählt wurde.⁵⁰ Diese war nicht normiert und war in unterschiedlichen Ausprägungen Ende des 18ten Jahrhunderts bis Anfang des 19ten Jahrhunderts vorhanden (siehe Abb. 5.32 - 5.34). Zudem gab es den Michaelisschen Zugapparat, welcher ‚aus einem einfachen, an einem Holzgestell aufgehängten Hebel, der an seinem kürzeren Arm den Bügel für [die] Aufnahme des Probekörpers, am längeren Arm ein grösseres Blechgefäß trug, in das man Wasser oder Sand einlaufen liess, um die erforderliche Belastung herzustellen‘⁵¹. Diese Beschreibung ähnelt dem oben befindlichen Prüfgerät.

47 vgl. Niemeyer, 1982 || S. 31

48 Kappeln/Schlei: Bau der Drehbrücke

49 Niemeyer, 1944 | S. 176

50 vgl. Quietmeyer, 1911 | S.140

51 Quietmeyer, 1911 | S.140

Stehno, 1981 | S. 19
 ebd.
 vgl. Tawfik Zein, 1974 |
 S.2

Abb. 5.32 | Achter-Form 1851

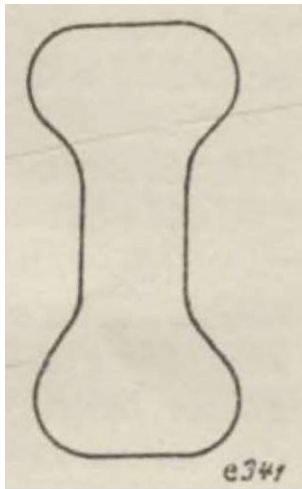


Abb. 5.33 | Achter-Form 1871

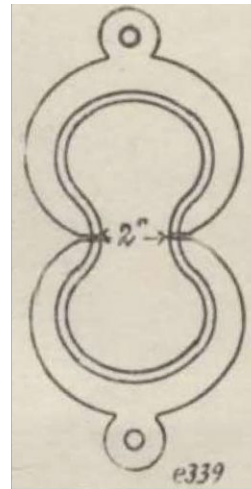
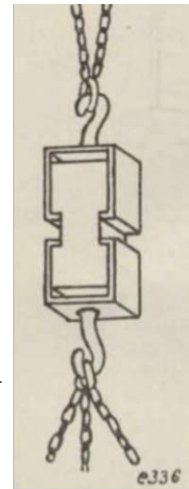


Abb. 5.34 | Achter-Form 1867-1871



Die Formgebung des Prüfkörpers geht auf dessen Einspannung in das entsprechende Prüfgerät zurück. Geradlinige Prüfkörper wiesen diesbezüglich Probleme auf: *„Sehr oft treten an den Einspannstellen Spannungskonzentrationen auf, so daß die Brüche meistens in diesen Bereich auftreten.“*⁵² Deshalb wurden Formen mit Verjüngungen im mittleren Bereich des Probekörpers wie auch als geometrische Ausbildung einer Acht ausgeführt. Im späteren Verlauf wurden zylinderförmige Probekörper, an deren Enden jeweils Stahlplatten angeklebt waren, getestet. Die ‚Zugmaschinen‘ fielen in der Baustoffprüfung bereits 1981 wesentlich moderner aus als die heute im Lehmbau verwendeten Geräte (siehe Abb. 5.35).

Niemeyer wendete das Prüfverfahren aus der Zementindustrie auf den Lehmbau an und entwickelte Verfahren für die Aufbereitung und Auswertung. In der Betonindustrie verschwand die Zugprüfung weitestgehend und wurde durch die Biegezugfestigkeit ersetzt.⁵³ Die Achterlingsprüfung wurde als ungeeignet befunden, da sich die Zugspannung nicht gleichmäßig im Bruchquerschnitt verteilte und daher höher als bei Prismen ausfiel. Zum anderen erwies sie sich für Routineuntersuchungen aufgrund ihrer umständlichen Form und recht ungenauen Einhängung als nicht geeignet.⁵⁴ Im Lehmbau wurden weder das Verfahren, noch das Prüfgerät oder die Geometrie des Prüfkörpers seit Niemeyers Veröffentlichung weiterentwickelt oder befohrt.

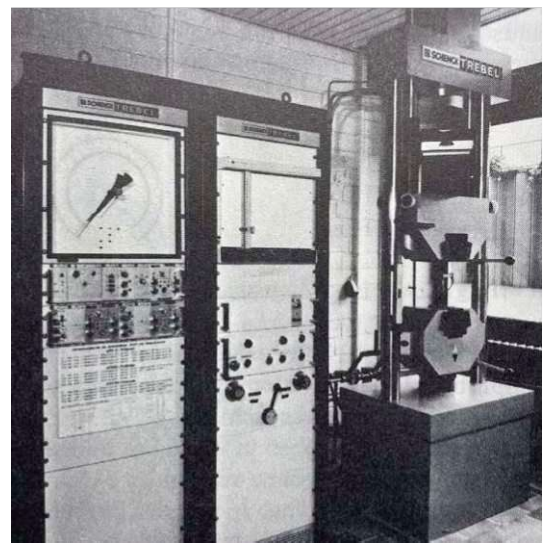


Abb. 5.35 | Zugfestigkeitsprüfmäische

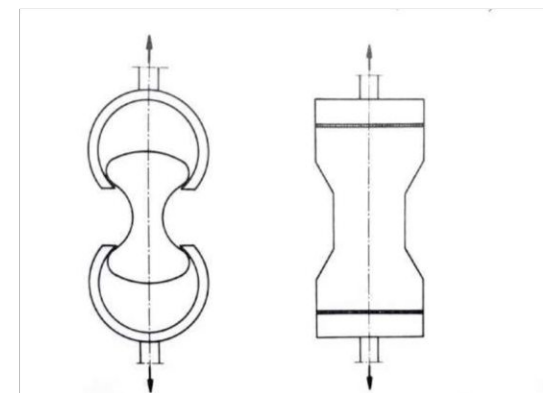


Abb. 5.36 | Formen des Zugprüfkörpers

Die Bindekraft

Die Bindekraft beschreibt die Kohäsionskräfte der Tonminerale in deren Gesamtheit und wird durch die Bindekraftprüfung ermittelt. Die Ergebnisse dieser stellen die Klassifizierung von Lehmen da, welche anhand des Grades der Bindekraft definiert wird. Die gängigen Begrifflichkeiten „fetter“ und „magerer“ Lehm sind hierdurch geprägt und stellen derzeit das grundlegende Kriterium zur Unterscheidung von Lehmen dar. Durch die Differenzierung des Materials in dessen Bindekraft können Tendenzen der dafür geeigneten Lehmabbaustoffe getroffen werden, die anhand weiterer Prüfungen getestet und dementsprechend entwickelt werden. Material mit einer zu

geringen Bindekraft ist gemäß der Auswertung *im Allgemeinen [...] nicht als Baulehme zu verwenden*⁵⁵ oder *unbrauchbar*⁵⁶, wobei jedoch durch das Beimengen von Tonpulver oder Mischung mit einem fetten Lehm durchaus eine verbesserte Bindekraft erlangt werden kann. Daraus resultiert, dass diese Prüfung nur bedingt als Ausschlusskriterium einzuordnen ist.

Die *Lehmbau Regeln* haben die *DIN 18952 Bl2* um eine weitere Klasse ergänzt und differenzieren demnach mageren und sehr mageren Lehm, wodurch insgesamt sieben Klassen vorliegen.

Bezeichnung gemäß <i>DIN 18952 Bl2</i>	Bezeichnung gemäß <i>Lehmbau Regeln</i>	Masse beim Bruch (Bindekraft) [g/cm ²]	Bruchspannung [N/mm ² , MPa]	Masse beim Bruch bezogen auf 5 cm ² Bruchfläche [g]
„unbrauchbar“	im Allgemeinen nicht geeignet	<50	<0,005	<250
magerer Lehm	sehr mager	≥50 – 80	≥0,005 – 0,008	≥250 – 400
	mager	>80 – 110	>0,008 – 0,011	>400 – 550
fast fetter Lehm	fast fett	>110 – 200	>0,011 – 0,020	>550 – 1000
fetter Lehm	fett	>200 – 280	>0,020 – 0,028	>1000 – 1400
sehr fetter Lehm	sehr fett	>280 – 360	>0,028 – 0,036	>1400 – 1800
-	Ton	>360	>0,036	>1800

Tab. 5.12 | Klassifizierung anhand der Bindekraft

Gemessen wird das Gewicht, bei welchem der Lehm zerreißt, im Verhältnis zur durch die Geometrie des Prüfkörpers bedingte Fläche der Sollbruchstelle. In der Werkstoffprüfung definiert dies die Bruchkraft und beschreibt den Moment, in dem ein Werkstoff den elastischen Zustand nicht aufrechterhalten kann und durch die ausgeübte Kraft bricht bzw. zerreißt.⁵⁷ Beim Lehm ist das der Moment, in welchem die Kohäsion der Tonminerale versagt. Er ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig.

1. Anteil der Tonminerale:

Das Verhältnis zwischen bindigen und nichtbindigen Komponenten spielt in die Bindekraft ein; Ein hoher Tonanteil bedeutet in der Regel eine hohe Bindekraft.

2. Art der Tonminerale:

Unterschieden wird bei den Tonmineralen grundsätzlich in Zwei- und Dreischichtsilikate, wobei letztere über eine höhere Bindekraft verfügen (siehe Kap. 3).

3. Korngrößen der nichtbindigen Komponenten:

Das Verhältnis zwischen der Oberfläche der nichtbindigen Komponenten von Lehm, wie Sand und Schluff, und dem Anteil der Tonminerale spielt in die Bindekraft eines Materials ein. Je kleiner ein Korn ausfällt, desto mehr Oberfläche hat dieses im Verhältnis. So benötigt sehr schluffhaltiges Material einen höheren Tongehalt als grobkörniger Lehm, um die gleiche Bindekraft zu erreichen.

55 Volhard, Röhlen, 2009 | S.10

56 DIN 18952 Bl.2, 1952
57 vgl. chemie.de, Bruchkraft

Intention der Prüfung

Niemeyers Absicht der Prüfung war, eine Methode zu entwickeln, die es zulässt, dass Lehm ohne eine ausgeprägte Expertise im Lehm- und unter der Vermeidung langwieriger Prozesse untersuchen kann. Als Grund führt er die Massentauglichkeit bzw. Verbreitung der Bauweise auf, basierend auf den sich wohl häufenden Anfragen nach der Eignung von Baulehm.

„Der Verfasser hat bis vor kurzem die bei der Lehr- und Beratungsstelle Lehm- und Tonn- in Posen, Grünberger Straße 9, eingehenden zahlreichen Lehmproben mit Hand und Auge untersucht und jedem Einsender die für die Anwendung seines Lehmes notwendigen Angaben gemacht. Diese, nur auf den praktischen Erfahrungen eines Einzelnen beruhende Methode ließ sich auf die Dauer nicht aufrecht erhalten.“⁵⁸

Aus den durch die Bindekraft gewonnenen Ergebnissen sollten daher Aussagen zu den zulässigen Druckspannungen sowie mögliche Mischverhältnisse für verschiedene Lehm- und Tonn-Techniken generiert werden können.

A. Zulässige Druckspannungen

Die Druckspannung gibt Auskunft über die Belastbarkeit eines Materials. Wenn die Druckspannung höher als die Druckfestigkeit ausfällt, wird die Struktur des beprobten Materials zerstört. Niemeyer führt die Relationen zwischen Zugfestigkeit, welche der Bindekraft entspricht, und Druckfestigkeit an. Er mutmaßt ein festes Verhältnis beider Eigenschaften wie es auch bei Zement der Fall ist (1:10). Auch in der Bodenmechanik wird ein solches Verhältnis zwischen Kohäsion und Druckfestigkeit per Faustregel definiert. Zugleich argumentiert Niemeyer gegen die Relevanz der exakten Bestimmung des Verhältnisses, da im weiteren Verlauf der Baustoffentwicklung zumeist Zuschlagstoffe beigemischt werden, welche die Druckfestigkeit wiederum vermindern.⁵⁹ Er legt in der unten abgebildeten Tabelle Werte zur Orientierung der zulässigen Druckspannungen fest.

Minke widerlegt diese Einteilung der Druckspannung und begründet dies mit dem Ausbleiben einer Proportionalität zwischen Druck- und Zugfestigkeit. Unklar ist, ob die beiden Autoren die gleiche Ausgangsposition bei der Thematik beziehen; Niemeyer setzt die Zug- und Druckfestigkeiten von Lehm- und Tonn- Baustoffen

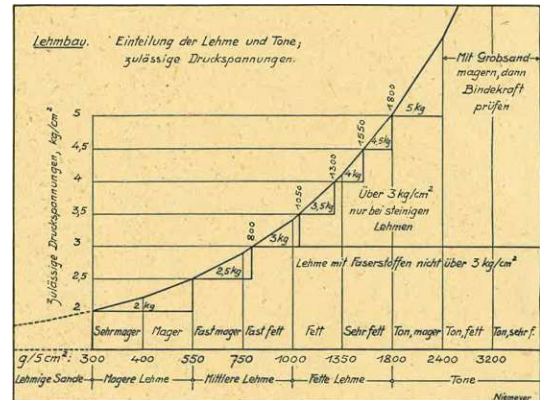


Abb. 5.37 | Zulässige Druckspannungen nach Bindekraft

zwar ins Verhältnis, er spricht jedoch eher Empfehlungen für mögliche Druckspannungen basierend auf Bindekraft und Zuschlagstoffen bzw. Mineralgerüst aus (siehe Abb. 5.37).⁶⁰ Minke hingegen beschreibt die Bindekraft und die Druckfestigkeit von Lehm im unveränderten Zustand, die nicht in Relation steht. Auch Röhlen und Ziegert weisen auf eine unzureichende Verhältnismäßigkeit zwischen Bindekraft, Schwindmaß und Druckfestigkeit hin.⁶¹

B. Mischungsverhältnisse

Niemeyer führt basierend auf Bindekraft und Mineralgerüst, *ungefähre, wenn allgemein auch zutreffende Anhalte*⁶² für Mischverhältnisse auf sowie in indirekter Form deren Wasserbeständigkeit tabellarisch auf. Er betont jedoch, dass die Empfehlungen wiederum auf Erfahrungswerten und weiteren Prüfungen basieren. Das Baumaterial muss sich zudem in erdfeuchten Zustand befinden, da sonst die Mischverhältnisse wiederum angepasst werden müssten.

Grundsätzlich versucht sich Niemeyer damit an einer Thematik, die bis heute nicht an Aktualität verloren hat: Allgemeingültige Aussagen zu möglichen Baustoffen sowie deren genaue Mischverhältnisse in Hinsicht auf der Bewertung des Baulehms sind vom „einfachen Häuslebauer“ eine oft geforderte Informationen. Im Expert:innenbereich sind wiederum die Problematiken dieser Forderung bekannt und beantworten diese oftmals mit dem Hinweis auf die Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen - zur Unzufriedenheit der Fragenden.

Verwendung der Ergebnisse im Lehmbau

Niemeyer gibt in seinem Buch Mischverhältnisse nach Erfahrungswerten in Abhängigkeit von der Bindekraft an. In der zweiten Auflage der *Lehmbau Regeln* sind Mischverhältnisse für unterschiedliche Lahmbaustoffe zu finden, wobei auch hier immer auf Erfahrungswerte verwiesen wird. Sie sind zur Orientierung gedacht und nicht als allgemeingültige Regel, da weitere materialspezifische Faktoren in das tatsächliche Mischverhältnis berücksichtigt werden müssen. In der aktuellen Fassung der *Lehmbau Regeln* sind keine Mischverhältnisse basierend auf der Bindekraft angegeben.

Lehmart	Sandkörnung	STAMPFBAU				QUADERBAU		WELLERSAU	
		Kies od. Kleinschlag bis 5 cm Durchm. Kies: Lehm (Raumteile)	S	Stroh od. Heidekraut 5-10 cm lang kg/m ³ loser Lehmmasse	S	Stroh od. Heide 8-12 cm lang kg/m ³ loser Lehmmasse	S	Stroh 30-50 cm lang kg/m ³ loser Lehmmasse	S
Sehr mager	Grob Fein Schluff	Vorsatz Vorsatz Vorsatz	2	Vorsatz Vorsatz Vorsatz	2	4 4 4	2		
Mager	Grob Fein Schluff	(Vorsatz) Vorsatz Vorsatz	2	(Vorsatz) Vorsatz Vorsatz	2	4 4 4	2	(20)	(2)
Fast mager	Grob Fein Schluff	(1-5) 1:5 (Vorsatz) 1:4 Vorsatz	2,5	(4) 4 (Vorsatz) 5 Vorsatz	2,5	4 5 5	2,5	22 23 23	2
Fast fett	Grob Fein Schluff	1:4 1:4 1:3,5	2,5 bis 3	8 6-7 7-8	2,5 bis 3	6 7 8	2,5 bis 3	24 24 25	2
Fett	Grob Fein Schluff	1:3 1:2,5 1:2	3 bis 4	8-9 9-10 9-11	3	8 9 10	3	25 26 26	2,5
Sehr fett	Grob Fein Schluff	1:2 1:1,5 1:1,5	4 bis 4,5	10-12 11-13 12-14	3	10 11 12	3	26 27 28	2,5
Tone	Grob Fein Schluff	Für magerer Tone Vorproben machen. Gut nach der letzten Reihe verarbeitbar; dann 3 kg/cm ³ . — Fatte und sehr fetter Tone mit Grobhand magerer (durch Lehmpfuhl oder maschinell), dann auf Bindekraft prüfen.							

Abb. 5.38 | Rezepturen nach Niemeyer

5.5.2 Prüfmethodik

Arbeitsschritt	Ort	Kooperation
Aufbereitung und Durchführung	Zeichensäle Arsenal (FS Architektur)	-
Zeitlicher Aufwand		Geräte und Materialien
Vorbereitung	6 Tage	Achterlingsprüfgerät
Durchführung (insgesamt)	9 Tage	Form für Probekörper und Stampfer
Zzgl. Bau des Prüfgeräts (in eigener Ausführung) und Anfertigung der Form für die Prüfkörper (Beauftragung)		Waage Sieb mit 2 mm Maschenweite Hammer, Messer, ggf. Mörser

Die Prüfmethodik stammt, wie bereits beschrieben, von der *DIN 18952 Bl.2* aus dem Jahr 1944. Die Durchführung wurde unter anderem in die deutschen *Lehmbau Regeln* übernommen. Wie auch in der Norm ist dort die Herstellung des Prüfgeräts zu finden, die nachfolgend zum besseren Verständnis der eigentlichen Prüfmethodik vorgezogen wird.

Herstellung des Prüfgerätes

Das Prüfgerät ist recht simpel und bedarf keinerlei Strom. Niemeyer verweist in seinem Buch darauf, dass die händische Bedienung ausreichend für die Genauigkeit der Ergebnisse ist. Das Gerät wurde bisher nicht weiterentwickelt, weshalb auch im Rahmen

dieser Arbeit nach Anleitung der DIN-Norm ein solches Gerät angefertigt wurde.

Grundsätzlich wird für die Achterlingsprüfung die Anfertigung von zwei Teilen gefordert: Das Prüfgerät selbst und die Form zur Herstellung der Probekörper.

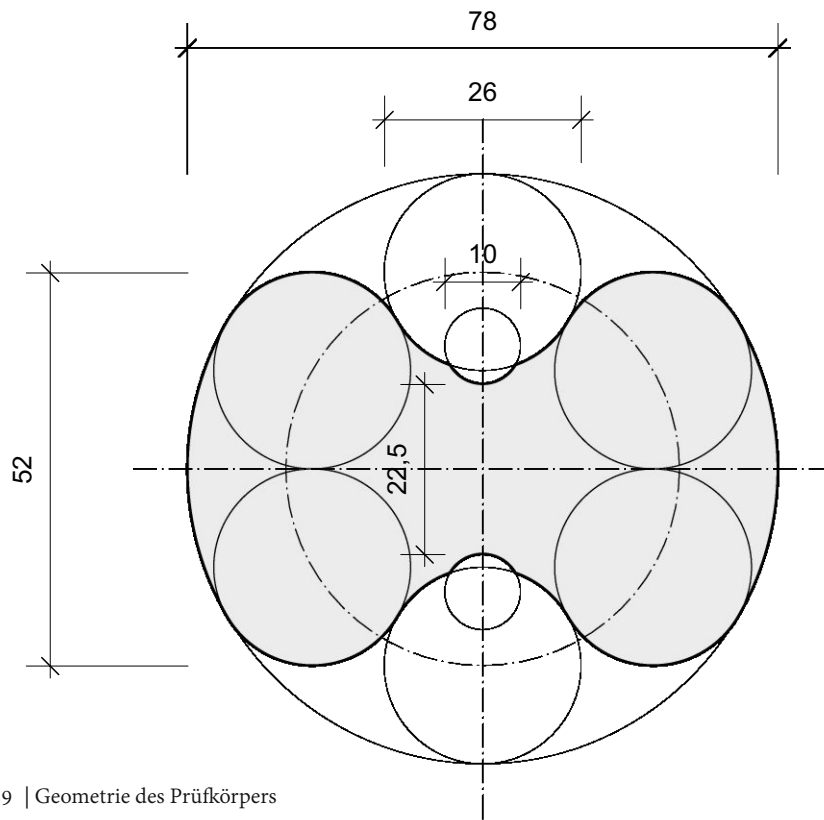


Abb. 5.39 | Geometrie des Prüfkörpers

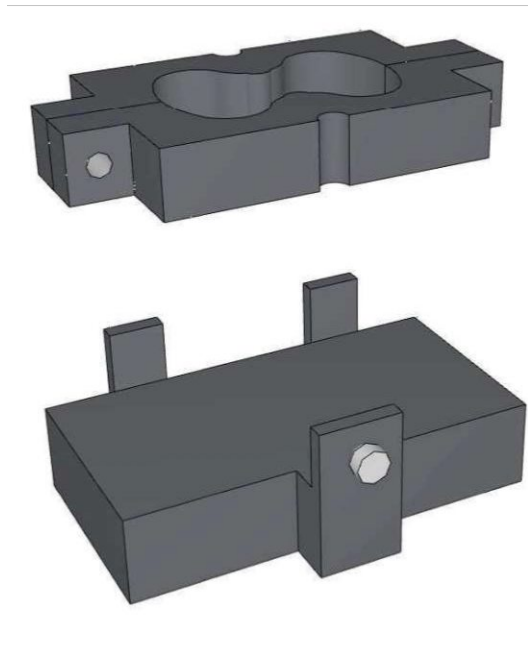


Abb. 5.40 | 3D-Modell der Prüfkörperform

A. Form für die Prüfkörperherstellung

Die Form besteht aus drei Teilen: Die Unterlegplatte bildet die Basis, während die eigentliche Form durch die zwei darauf befindlichen Teile gegeben wird. Diese werden mit zwei Schrauben miteinander verbunden, während eine dritte sie auf der Unterlegplatte fixiert. Die Demontage der Teile gewährleistet das Lösen der Prüfkörper aus der Form.

Aus Haltbarkeitsgründen wurde das Material Stahl gewählt, wobei wegen der recht komplizierten Geometrie eine CNC-Fräse zum Einsatz kam.

B. Das Prüfgerät

Das Prüfgerät besteht aus einer zweiteiligen Ringhalterung, in welche der Probekörper eingehängt wird. Aus dem oberen Sandbehälter mit Ausflussrinne fließt Sand in den unteren Behälter, welcher mit gleichmäßig steigendem Gewicht Zugkraft auf den Probekörper ausübt.

Für das Prüfgerät wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit Holz als Material gewählt, während die Ringhalterung aus mit Aluminium verstärkten Ringen besteht, die im 3D-Druck-Verfahren entstanden sind. Der 3D-Druck gewährleistet die exakte Einhaltung der geforderten Maße, während das Aluminium einer elastischen Verformung der Ringhalterungen vorbeugt. Der Sandbehälter ist im Bodenbereich um 45° geneigt und umfasst mit einem Volumen von 2,6 dm³, was maximal knapp 4 kg Quarzsand entspricht. Die Öffnung des Sandbehälters hat eine Flussgeschwindigkeit von 680 g / Minute, was etwas unter der geforderten maximalen Flussgeschwindigkeit von 750 g / Minute liegt.

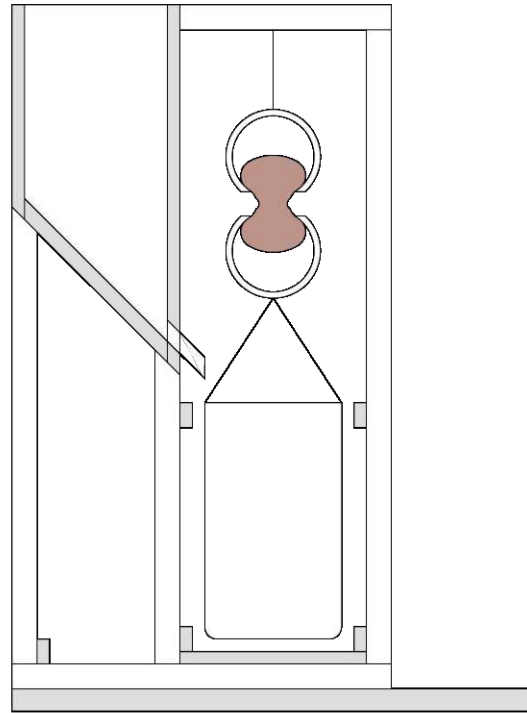


Abb. 5.43 | Prüfgerät, Schnitt



Abb. 5.41 | Prüfkörperform



Abb. 5.42 | Prüfgerät

Verfahren

Die Bindekraftprüfung selbst gliedert sich gemäß *DIN 19852 Bl.2* und den *Lehmbau Regeln* in vier Arbeitsschritte:

A. Aufbereitung der Probe

Die Probe sollte ein Gewicht von 750 g haben und keine Körnung größer als 2 mm beinhalten. Um letzteres zu gewährleisten, muss je nach Probe das weitere Vorgehen entschieden werden: Bei erdfeuchten Proben können Korngrößen über 2 mm manuell ausgelesen werden, was vor allem Sinn macht, wenn die Probe allgemein einen höheren Feinanteil aufweist. Bei gröberen Proben empfiehlt sich eine Siebung der luftgetrockneten Probe.

B. Herstellen der Formsteife (*DIN 19852 Bl.2*) / Versuchskonsistenz (*Lehmbau Regeln*)

Für die Herstellung einer homogenen Masse wird das Material gegebenenfalls unter Wasserzugabe befeuchtet und mit einem Hammer (Kopffläche 2,5 x 2,5 cm) flachgeklopft. Anschließend wird die abgeplattete Probe in Streifen geschnitten, welche hochkant nebeneinander gereiht und wiederum mit dem Hammer bearbeitet werden. Dieser Prozess wiederholt sich so lange bis sich auf der „Fladen“-Rückseite ein homogenes Bild abzeichnet. Die Homogenität des Materials ist für die weitere Versuchsdurchführung essenziell und durch die vermehrte Wiederholung des beschriebenen Prozesses gegeben. Falls Wasser der Probe zugegeben wurde, muss diese je nach Einschätzung des Tongehalts 6 bis 12 Stunden unter einem feuchten Tuch ruhen, um eine gleichmäßige Aufnahme bzw. Verteilung der Flüssigkeit innerhalb des Lehms zu gewährleisten. Bei fetten Lehmen sind 12 Stunden notwendig, da die Wasseraufnahme durch das vermehrte Auftreten der Tonminerale eine längere Zeit erfordert.

Von der aufbereiteten Probe werden wiederum 200 g abgewogen, welche anschließend durch wiederholtes Aufschlagen auf einen glatten Untergrund verdichtet werden. Die richtige Konsistenz wird mittels einer händisch geformten Kugel getestet, wobei dieser Vorgang zeitnah durchgeführt werden sollte, um Wasserverluste zu vermeiden. Die Kugel wird aus 2 m Höhe (gemessen von der Kugelmitte) auf eine

glatte feste Oberfläche fallen gelassen. Die Abplattung sollte im Durchmesser von 50 mm betragen und bei ungleichmäßiger Verformung eine Durchmesserdivergenz von maximal 2 mm aufweisen. Dieser Zustand nennt sich Formsteife, was die ideale Konsistenz für das weitere Verfahren darstellt.

C. Anfertigen des Prüfkörpers

Unmittelbar im Anschluss werden die Prüfkörper hergestellt. Hierfür wird die Probe in drei Schichten in eine vorgefertigte Form eingefüllt, die jeweils mit einem Stampfer verdichtet werden. Anschließend wird der Prüfkörper von beiden Seiten mit einer geraden Messerkante abgezogen. Um den Prüfkörper aus der Form zu lösen, wird er aus 10 cm Höhe auf die Unterlage fallen gelassen. Es werden jeweils drei Prüfkörper pro Probe angefertigt.

D. Messung

Im letzten Schritt wird der Prüfkörper in eine Prüfvorrichtung eingespannt. Durch Gewichtsbelastung mittels gleichmäßig einfließenden Sands (maximal 750 g pro Minute) wird der Moment herbeigeführt, in dem der Körper an der Sollbruchstelle zerreißt. Dies erfolgt durch die Ermittlung des Gewichts zum Zerreizeitpunkt und der Querdurchschnittsfläche der Bruchstelle.

Die Ergebnisse der drei Prüfkörper dürfen maximal 10 Prozent voneinander abweichen. Der Mittelwert dieser bildet die Bindekraft der Lehmprobe und bezieht sich auf einen Rechnungsquerschnitt von 5 cm². Die Einheit der Bindekraft wird in g/cm², N/mm² oder bar definiert und wird nach den Vorgaben der *DIN 18952 Bl.2* eingeteilt.

5.5.3 Prüfungsdurchführung

Die Prüfungsdurchführung gestaltete sich aufwendiger als die recht einfache Beschreibung der Methodik erwarten ließ. Aufgrund der Entwicklung der Techniken während der Durchführung werden in der folgenden Beschreibung bereits Erkenntnisse und entsprechende Reaktionen einbezogen, um die Vorgehensweise zu begründen.



Abb. 5.44 | Aufbereitungsschritte: Luftgetrockneter Zustand, Zerkleinerung, Siebung

A. Aufbereitung der Proben

Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde ein gemeinsamer Ausgangspunkt der Proben geschaffen, indem diese luftgetrocknet wurden. Im weiteren Verlauf wurden jeweils 750 g der Proben mit dem Mörser verkleinert, um anschließend durch ein 2 mm maschiges Sieb die geforderte Körnung zu generieren. Die Proben wiesen dabei verschiedene Anforderungen an die Intensität der Aufbereitung auf. Während einige der Proben im luftgetrockneten Zustand nur mit hohem Kraftaufwand zerkleinert werden konnten, genügte bei anderen Proben eine leichte Druckausübung. Dadurch wurden bereits Tendenzen auf die Bindekraft bzw. den Tongehalt der Proben erkenntlich. Die Siebung erfolgte mit einem Metallsieb mit der Maschenweite von 2 mm.

Im Allgemeinen gestaltete sich die trockene Aufbereitung der Proben als zeit- und vor allem kraftintensiv. Während mageres Material gut zu bearbeiten war, bedarf es zukünftig alternativer Ansätze für fette Lehme. Vorstellbar wäre eine Nassaufbereitung. Niemeyer weist auf das Einmauken bei der Aufbereitung von trockenem Material hin, was jedoch die Problemstellung mit der Siebung nicht lösen würde. Durch nachträglich gewonnene Erkenntnisse wäre in diesem Zuge eine verhältnismäßig einfache Nasssiebung erprobenswert gewesen. Nachteilig wäre bei diesem Vorgehen die lange Wartezeit des Trocknens.



Abb. 5.45 | Siebung mit Tonfraktionen



Abb. 5.46 | Sechs Durchläufe bis zur Homogenisierung

B. Herstellen der Formsteife

B.1 Konsistenzherstellung

Vorgehen nach DIN 18952 Bl.2 / Lehmbau Regeln

Nach der Siebung wurde den Proben Wasser zugeführt. Zunächst wurde, wie in der Prüfungsmethodik beschrieben, das Herstellen der Formsteife direkt bei Wasserzugabe angestrebt. Hierfür wurde die Probe mit dem Hammer zu einem Fladen verbreitet, in Streifen geschnitten und aufgeschichtet, um den Prozess bis zur Erlangung der Homogenität zu wiederholen. Während der Aufbereitung war festzustellen, dass mit der Oberseite des Hammers und einer leichten Ziehbewegung, weniger Kraft und Zeit für die Herstellung der Fladen benötigt wurde. Das könnte auf die größere Aufschlagfläche zurückzuführen sein. Eine gleichmäßige Homogenität zeichnete sich an der Rückseite des Fladens oftmals erst nach vier bis fünf Durchgängen ab. Die melierte Probe P14 verdeutlicht die Schwierigkeit der Herstellung der gewünschten Homogenität bzw. Gleichmäßigkeit visuell (siehe Abb. 5.46).

Zusätzlich entwickelte sich die Fehleinschätzung bei der Zugabe der Wassermenge oftmals zu einer Problematik – auch nach vermehrter Wiederholung des Prozesses. Zu viel Wasser äußerte sich durch ein klebriges Verhalten des Lehms und bedeutete einige Zeit zum Trocknen einzuräumen. Zu wenig Wasser machte sich durch Rissbildung bei der Herstellung des Fladens bemerkbar. Dies führte wiederum zu zusätzlichen Wiederholungen des Aufbereitungsprozesses. Es wurde darauf geachtet, zunächst etwas weniger Wasser hinzuzugeben, um dieses gegebenenfalls im nächsten Durchlauf tröpfchenweise zu erhöhen.

Bei der Wasserzugabe ist anzumerken, dass die Lehme unterschiedlich reagieren. Bei eher mageren Lehmen

äußerte sich die Wasserzugabe bereits in geringen Mengen, während fette Lehme mehr Wasser für Konsistenzveränderungen vertrugen. Durch Erfahrung ist dieser Prozess wahrscheinlich zu beschleunigen.

Nach Erreichung der Homogenität und nach Einschätzung der richtigen Konsistenz, wurde diese durch das Ausbreitmaß getestet, welches im weiteren Verlauf noch genauer erläutert wird.

Die Proben sollten zur gleichmäßigen Verteilung des Wassers mindestens 6 Stunden ruhen. Nach Ablauf der Zeit wies die Probe allerdings oft eine andere Konsistenz auf, welche nicht der zuvor erlangten Formsteife entsprach. Dies ist auf die Wasseraufnahme innerhalb des Materials und auf Wasserverluste durch Verdunstung zurückzuführen. Zudem ist die ungleichmäßige Wasserverteilung direkt nach Wasserzugabe bei besonders fetten Lehmen auch visuell sichtbar. Dieser Aspekt ist auf Abb. 5.47 von P16 erkennbar, welche nach Zuführen des Wassers noch kleine trockene Fraktionen aufweist.

Die Methode des Ruhenlassens unter einem feuch-



Abb. 5.47 | Fetter Lehm nach Wasserzugabe



ten Tuch erwies sich als sehr betreuungsintensiv. Die Feuchtigkeit des Tuchs und anschließend die darunter befindliche Probe trocknete aufgrund der raumklimatischen Bedingungen durch die Heizungsluft und Raumlüftung relativ schnell aus. Daher wurden die Proben im weiteren Verlauf mit Frischhaltefolie abgedeckt bzw. eingewickelt. Diese sollte direkt an der Probe anliegen, da sich sonst Tröpfchen von austretendem Wasser in den Lufteinschlüssen zwischen Probe und Folie bildeten. Trotzdem musste die Formsteife oftmals nach dem Ruhen der Probe nochmals neu angesetzt werden, was wiederum Zeit- und Kraftaufwand bedeutete.

Vorgehen nach Erfahrungen aus der Keramik

Bei ungefähr der Hälfte der Proben wurde eine Technik aus der Keramik hinzugezogen. Den Proben wurde etwas mehr Wasser hinzugeführt, sodass die Homogenität durch händisches Aufschlagen herstellbar war. Das bedeutete im ersten Schritt eine erhebliche Senkung des Zeit- und Kraftaufwands.



Abb. 5.48 | Probe nach dem Aufschlagen



Abb. 5.49 | Probe bei offener Trocknung

Eingewickelt in Frischhaltefolie ruhten die Proben zur gleichmäßigen Wasserverteilung innerhalb des Materials. Nach mindestens sechs Stunden (meist jedoch ~24 Stunden) wurden die Proben auseinandergebrochen, um möglichst viel Oberfläche zu generieren. Anschließend wurden sie, je nach Tongehalt, 1-3 Stunden zum Trocknen ausgelegt, wobei der Prozess durch intensive Belüftung reduziert werden konnte. Bei offener Lagerung der Proben war jedoch eine unregelmäßige Trocknung erkenntlich, da kleine Stücke und Ränder sowie Oberflächen schneller trockneten (siehe Abb. 5.49).

Im weiteren Vorgehen wurden daher die Proben bei Bedarf locker mit Frischhaltefolie abgedeckt, was die Trocknung verlangsamt. Durch das Auflegen eines feuchten Tuchs konnte der Wassergehalt in der Probe zudem leicht erhöht bzw. gehalten werden. Die Feuchtigkeit der Proben konnte damit recht gut reguliert und auf zeitliche Abläufe angepasst werden. Diese Beobachtungen gilt es jedoch für eine größere Anzahl unterschiedlicher Lehme zu prüfen.



Abb. 5.50 | Trocknung der Proben

In der Keramik kommt zur Trocknung von Ton eine Gipsplatte zum Einsatz, worauf das Material als Fladen ausgebreitet wird. Der Gips gewährleistet einen gleichmäßigen Feuchtigkeitsentzug, womit die Probe direkt weiterverarbeitet werden kann. Falls sich diese Methodik für Lehm eignen würde, könnte sich dies wiederum effizient auf die Aufbereitung der Proben auswirken.

B.2 Konsistenztestung / Ausbreitmaß

Die Ausgangssituation für die Anfertigung der Prüfkörper war die Testung des Ausbreitmaßes. Es bildete den Übergang zwischen der Herstellung der Formsteife und der Anfertigung der Prüfkörper.

Hierfür wurden 200 g von der aufbereiteten Probe abgewogen. Die übrige Probe wurde in Form des ausgehämmerten Fladens während der Bearbeitung mit einer Frischhaltefolie abgedeckt. Diese Erkenntnis resultierte aus der Beobachtung einer zunehmenden Bindekraft der Prüfkörper mit fortschreitender Zeit.



Abb. 5.51 | Unterschied von gehämmerter und aufgeschlagener Probe

Dies lässt sich vermutlich auf die Austrocknung der offenen Probe zurückführen und sollte damit verhindert werden.

Die abgewogene Probe wurde anschließend auf einer glatten, nicht saugfähigen Platte aufgeschlagen. Als Grund wird die Verdichtung angeführt; es könnte jedoch auch zur Auflösung der richtungsgebundenen Anordnung der Tonminerale geeignet sein, welche durch die Herstellung des Fladens gegeben ist (siehe Abb. 5.51).

Die Bedeutung des Aufschlagens wird in der Keramik angeführt. Ungenügende Aufbereitung äußert sich im Brennvorgang durch ungleichmäßige Verformung. Bei Lehmen liegt daher die Vermutung nahe, dass eine Anordnung der Tonminerale Einfluss auf die Bindekraft nehmen. Beobachtungen bei der Durchführung der Prüfung lassen diese Vermutung zu. So konnten bei einigen Prüfkörpern optische Veränderungen in der Bruchstelle verzeichnet werden (siehe Abb. 5.52). Das führte wiederum zu hohen Abweichungen der Bindekraft der verschiedenen Prüfkörper, die über dem Maximalwert von 10 Prozent lagen. Daher wurde vor Anfertigung der Prüfkörper ein erhöhter Fokus auf das Aufschlagen gelegt und durch „Aufreißen“ der Kugel visuell überprüft. Die Behauptung gilt es jedoch zu prüfen.

Zudem war festzustellen, dass das Aufschlagen nicht bei jeder Probe in gleicher Weise durchführbar ist. Bei mageren Lehmen musste der Vorgang recht vorsichtig umgesetzt werden, da die abgewogene Probe sonst zersprang. Hier entwickelte sich die Technik, die Probe während des Aufschlagens festzuhalten und eher mit kleinen, wiederholenden Schlägen zu arbei-



Abb. 5.52 | Links: Ausrichtung der Tonminerale im Mittelteil senkrecht zur Bruchstelle | Rechts: Regelmäßige Ausrichtung der Tonminerale

ten. Fette Lehme wiesen einen leichteren Umgang auf und konnten mit mehr Kraft aufgeschlagen werden. Das Abzählen der Aufschläge sowie das Einhalten der gleichen Intensität innerhalb der jeweiligen Proben, reduzierte die Abweichung der Ergebnisse.

Bei dem Formen der Kugel wird in der *DIN 18952 Bl.2* darauf verwiesen, dass ein zu lang andauerndes Formen der Kugel das Austreten des Porenwassers an der Kugeloberfläche zur Folge hat. Damit ist keine gleichmäßige Feuchtigkeitsverteilung gegeben. Daher wurde versucht, diesen Vorgang schnell und mit wenigen Handgriffen auszuführen. Allgemein konnte das Austreten des Porenwassers verhindert werden, indem die Probe eher zur Kugel gedrückt wurde, als mit Handschlägen zu arbeiten. Das hatte zum Ergebnis, dass vor allem die mageren Lehme oftmals keine glatte bzw. nahtlose Kugeloberfläche aufwiesen. Es zeichneten sich Linien entlang der Zusammenschlüsse ab (siehe Abb. 5.53), was sich jedoch nicht nachteilig auf den weiteren Prüfungsverlauf auswirkte.



Abb. 5.53 | Linienbildung bei Kugelformung

Im direkten Anschluss wurde die Kugel aus 2 m Höhe zur Kugelmitte auf einen glatten, festen Untergrund fallen gelassen. Die Abplattung an der Unterseite der Kugel wurde anschließend gemessen. Betrug diese exakt 50 mm wurde direkt ein Prüfkörper daraus angefertigt. Bei unregelmäßigen Verformungen waren Abweichungen von max. 2 mm einzuhalten. Die verschiedenen Proben wiesen unterschiedliches Verhalten bei der Abflachung auf. Magere Lehme bildeten Risse, zum Teil sogar kleine Ausbrüche, während fette Lehme auch an der Oberfläche intakt blieben.

Bei einem Ausbreitmaß über 50 mm wurde die Probe zum Trocknen ausgelegt und bedingte die erneute Erarbeitung der Formsteife. Bei einem kleineren Durchmesser wurde Wasser hinzugefügt, wobei je nach Menge direkt weitergearbeitet oder der Ruheprozess wiederholt wurde. Beide Fälle bedingten den Vorgang der Formsteife zu wiederholen, was den gesamten Ablauf sehr zeitintensiv gestaltete.

Es war bei fast allen Proben möglich die Formsteife herzustellen. Zum Teil bedurfte es mehrerer Durchläufe und Wiederholungen. Bei mageren Lehmen gestaltete sich die Herstellung der Formsteife im Verhältnis schwieriger als bei fetten Lehmen.

Eine Ausnahme bildete Probe P7, welche beim Fall der Kugel auch nach mehrfacher Änderung des Wassergehalts immer wieder am Boden zersprang. Daraus ist zu schließen, dass bei dieser Probe keine Bindekraft vorhanden ist. Grund hierfür könnte die Abstinenz von Tonmineralen sein oder ein verhältnismäßig hoher Schluffanteil zum Tonanteil.



Abb. 5.54 | Ausbreitmaß eines recht fetten Lehms



Abb. 5.55 | Ausbreitmaß eines mageren Lehms

Hinweis: Die Probekörper sollten nicht auf einmal angefertigt werden



Abb. 5.56 | Probekörper*

C. Anfertigen der Probekörper

Bei den drei Probekörpern wurde versucht in den Wiederholungen möglichst die gleichen Zeiten in der Anfertigung einzuhalten, da Zeit die Bindekraft wohl recht stark beeinflusst. Niemeyer weist darauf hin, dass die Herstellung des Probekörpers unmittelbar nach der Erlangung der Formsteife und dem damit verbundenen Ausbreitmaß erfolgen muss. In den ersten beiden Versuchsreihen wurden zur Überprüfung der Sensibilität gegenüber der zeitlichen Komponente jeweils direkt drei Probekörper hergestellt (siehe Abb. 5.56). Dies resultierte in stark abweichenden Ergebnissen mit der Tendenz einer zunehmenden Bindekraft bei fortschreitender Zeit, weshalb die Versuchsreihen nicht auswertbar waren.

Im weiteren Verfahren wurden jeweils folgende Arbeitsschritte repetitiv für jeden Probekörper durchgeführt:

1. Abwiegen von 200 g der Probe (verbleibende Probe wird abgedeckt)
2. Aufschlagen der Teilprobe
3. Herstellung einer Kugel
4. Fall aus 2 m Höhe (Kugelmittel) mit dem Ausbreitmaß von 50 mm
5. Anfertigen des Probekörpers
6. Messung des Probekörpers

Da die Aspekte Abfolge und Zeit Einfluss auf die Ergebnisse nehmen, ist der Ablauf nach eige-

nen Erfahrungen bestmöglich einzuhalten. In späteren Prüfungen, in denen die Arbeitsschritte bereits schneller abliefen, wurde auf die Testung der Formsteife (Schritt 3. und 4.) beim zweiten und dritten Probekörper verzichtet, woraus sich ebenfalls vergleichbare Ergebnisse ergaben. Für den Einstieg in die Prüfung war die wiederholte Kontrolle der Formsteife hilfreich.

Das eigentliche Einfüllen des Materials in die Form findet nach Angaben der *DIN 18952 Bl.2 / Lehm-Regeln* in drei Schichten statt. Zunächst wird das Material locker mit den Händen in die Form eingefüllt. Anschließend wird es mit einem Stampfer eingeklopft. Aufgrund der Formgebung der Schalung wurde hierbei der Stampfer angelegt und leicht mit einem Hammer in möglichst gleichbleibender Intensität angeschlagen. Es empfiehlt sich das Einstampfen über die Fläche in relativer Gleichheit zu bewerkstelligen. Hilfreich hierfür war der Ablauf eines „Musters“ über die Fläche. Die nächste Schicht kann allerdings nicht direkt eingebracht werden, denn durch das Einstampfen bildet sich eine recht glatte Oberfläche. Diese würde im späteren Verlauf eine Gleitschicht bilden, welche die Verbindung der Schichten verhindert. Durch das „Ankratzen“ der Oberfläche wird eine kraftschlüssige Verbindung geschaffen, was im Lehm-Regeln zu den grundlegenden Kenntnissen gehört. In der Prüfmethodik steht das nicht beschrieben.

Wird dieser Schritt vernachlässigt oder nicht sorgfältig ausgeführt, ist dies am Rand des späteren Prüfkörpers erkennbar und kann zu Abweichungen in der Messung führen (siehe Abb. 5.59).

Nach der Einbringung der letzten Schicht des Prüfkörpers wurden überstehende Reste der Masse mit dem Messer abgezogen. Mit einem Tonmesser wurden bessere Ergebnisse an der Oberfläche erzielt als mit einem herkömmlichen Küchenmesser. Das Tonmesser hat eine feinere Klinge und reißt dadurch keine Löcher in den Prüfkörper. Bei fetten Lehmen wurde zudem eine leichte Säbelbewegung ausgeführt, um dies zu verhindern.

Der Fall aus 10 cm Höhe auf die Tischplatte löste zwar den Körper aus der Form, jedoch verblieben oftmals Stücke der Probe an den Rändern der Form (siehe Abb. 5.60). Daher wurden die Seitenteile der Form im weiteren Vorgehen vorab mit etwas Leinöl beschichtet. Die Unterlegplatte wurde mit einer Folie bedeckt, die sich leicht von der Unterseite des Prüfkörpers ablösen ließ.



Abb. 5.57 | Eingestampfter Lehm



Abb. 5.58 | Anrauen der Oberfläche



Abb. 5.59 | Fehlerhafter Prüfkörper



Abb. 5.61 | Abziehen der Oberfläche



Abb. 5.60 | Fehlerhafter Prüfkörper



Abb. 5.62 | Fehlerhafter Prüfkörper

D. Messung

Nach dem Lösen des Prüfkörpers wurde dieser direkt im Anschluss in die Prüfvorrichtung eingehängt. Während der Sand in den angehängten Behälter einfluss, musste der Prüfkörper genau beobachtet werden. Bei mageren Lehmen zeigten sich sehr schnell Risse, die unmittelbar ins Zerreißen übergingen und erforderten daher ein schnelles Reaktionsvermögen. Bei fetten Lehmen dehnte sich der Prüfkörper zunächst, bevor sich eine leichte Rissbildung zeigte, die oftmals sehr langsam in den eigentlichen Zerreißprozess überging. In jedem Fall ist es ratsam, bei Rissbildung in Bereitschaft zur Schließung des Sandflusses zu stehen.



Abb. 5.63 | Rissbildung vor dem Zerreißen

Probe	Aufbereitung	Aufwand	Siebrückstand
P1	Hammer, Siebung, Mörserung	sehr zeitintensiv	Tonfraktionen
P2	Hammer, Siebung, Mörserung	sehr zeitintensiv	Tonfraktionen
P3	Siebung, Mörserung	normal	wenig, kleine Körnung + Tonfraktionen
P4	Hammer, Siebung, Mörserung	sehr zeitintensiv	Tonfraktionen
P5	Hammer, Siebung, Mörserung	normal	wenig, kleine Körnung
P6	Mörserung	normal	wenig, größere Körnung (z.T. Teer)
P7	Mörserung	sehr leicht	keine
P8	Siebung, Mörserung	leicht	sehr wenig, kleine Körnung
P9	Siebung, Mörserung	leicht	sehr wenig, kleine Körnung
P10	Hammer, Siebung, Mörserung	zeitintensiv	viel, große Körnung
P11	Hammer, Siebung, Mörserung	zeitintensiv	viel, große Körnung
P13	Hammer, Siebung, Mörserung	leicht	viel, große Körnung
P14	Hammer (leicht), Siebung, Mörserung	normal	viel, kleine Körnung
P15	Hammer, Siebung, Mörserung	zeitintensiv	wenig, kleine Körnung + Tonfraktionen
P16	Hammer, Siebung, Mörserung	sehr zeitintensiv	Tonfraktionen
P17	Hammer, Siebung, Mörserung	sehr zeitintensiv	Tonfraktionen
P18	Hammer (leicht), Siebung, Mörserung	leicht	viel unterschiedliche Körnung

Tab. 5.13 | Vorbereitung des Materials und Beobachtungen

5.5.4 Ergebnisse und Auswertung

Proben, die aus tiefliegenden Schichten stammen, wiesen in der Vorbereitung einen recht niedrigen Grobkornanteil auf, weshalb bei der Siebung keine bis wenig Siebrückstände entstanden. So ist bei den Proben P1, P2, P4, P15, P16 und P17 davon auszugehen, dass die Ergebnisse repräsentativ für die jeweilige Gesamtprobe sind. Vor allem bei Proben mit einem großen Grobkornanteil, wie P10, P11 und P13, ist dieser Rückschluss nicht möglich, sondern gilt nur für den Kornbereich unter 2 mm der Probe.

In der Tab. 5.13 ist die Aufbereitung der einzelnen Proben mit Aufwand und Siebrückstand aufgeführt. Ein zeitintensiver Aufbereitungsaufwand mit erhöhtem Kraftaufwand deutete auf sehr fette Lehme hin, während leicht bearbeitbare Proben auf magere Lehme zutrafen.



Abb. 5.65 | Prüfkörper bei der Messung

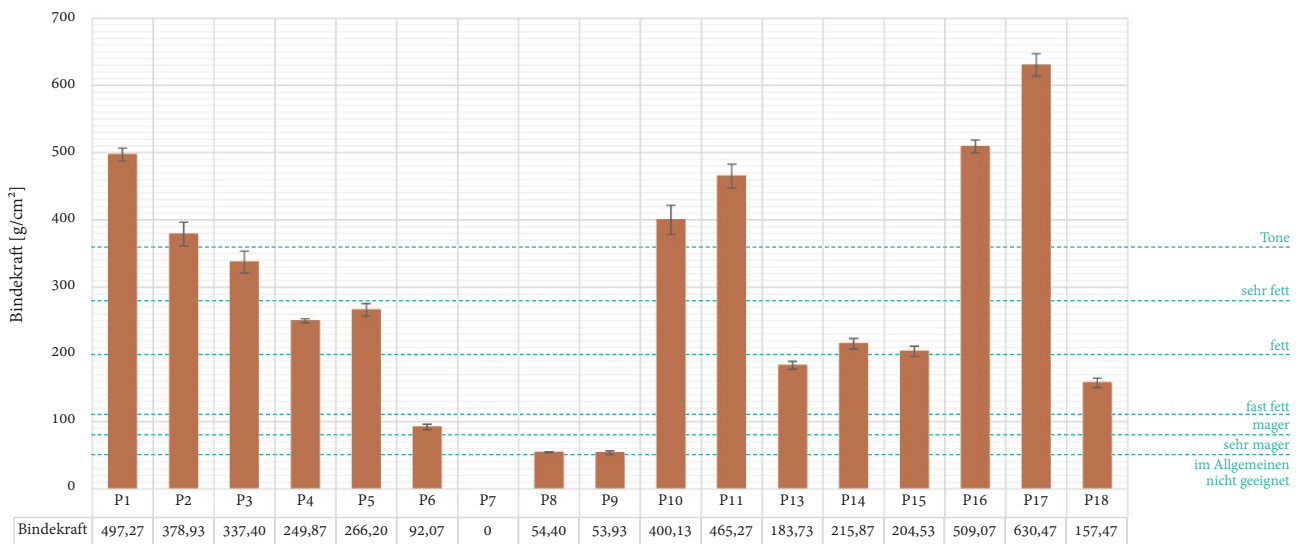


Abb. 5.64 | Messergebnisse Bindekraft mit Grenzbereichen

Trotz gleicher Voraussetzungen bezüglich maximaler Korngröße und Aufbereitung fallen die geprüften Lehme, wie erwartet, in ihrer Bindekraft unterschiedlich aus. Bei den vorliegenden Proben handelt es sich überwiegend um fette Lehme bis zu Tonen gemäß DIN 18952 Bl.2 / Lehmbauregeln.

Probe	Bindekraft [g/cm ²]	Standardabweichung [g/cm ²]	Masse beim Bruch [g]	Bruchspannung [N/mm ² , MPa]	Bezeichnung	Abweichung [%]
P1	497,27	9,54	2486,33	0,050	Ton	4,35
P2	378,93	17,64	1894,67	0,038	Ton	9,69
P3	337,40	16,27	1687,00	0,034	sehr fett	9,97
P4	249,87	3,03	1249,33	0,025	fett	2,69
P5	266,20	9,37	1331,00	0,027	fett	7,44
P6	92,07	4,01	460,33	0,009	mager	9,05
P7	-	-	-	-	-	-
P8	54,40	0,99	272,00	0,005	sehr mager	3,94
P9	53,93	2,46	269,67	0,005	sehr mager	9,41
P10	400,13	21,67	1929,67	0,040	Ton	9,46
P11	465,27	17,70	2326,33	0,047	Ton	8,50
P13	183,73	6,03	918,67	0,018	fast fett	7,40
P14	215,87	7,88	1079,33	0,022	fett	7,58
P15	204,53	7,35	1022,67	0,020	fett	8,43
P16	509,07	9,50	2545,33	0,051	Ton	4,41
P17	630,47	16,68	3152,33	0,063	Ton	6,00
P18	157,47	6,94	787,33	0,016	fast fett	9,77

Tab. 5.14 | Messergebnisse Bindekraft

Einige Gruppenproben mit gleichem Standort und unterschiedlicher Entnahmetiefe weisen interessante Ergebnisse auf. Die Proben P15 bis P17 stammen aus demselben Schurf und haben im Bereich von -1,5 Metern Tiefe fetten Lehm, während darunterliegendes Material in die Kategorie Ton fällt. Auch bei der Probenahme auf dem Zukunftshof, P5 und P6, ist eine zunehmende Bindigkeit des Materials in Bezug auf die Tiefe zu verzeichnen. Diese bildet sich bei geringerer Abweichung der Tiefe wesentlich stärker ab. Die Proben variieren in der Zuordnung von mager zu fett innerhalb eines Tiefenunterschiedes von 0,8 Metern. Bei den Proben P8 und P9 des FH Campus Wien ist hingegen, trotz verschiedener Tiefen, die gleiche Bindekraft gegeben.

Überraschend fallen die Ergebnisse der Proben P10 und P11 aus, welche aufgrund ihrer Grobanteile ganzheitlich nicht die hohe Bindekraft der „Tone“

vermuten lassen. Es ist allerdings anzumerken, dass die oben genannte Problematik des Bezugs auf die Gesamtheit des Materials miteinspielt.

Bei Probe P18, welche zu Putz verarbeitet wurde, handelt es sich um einen fast fetten Lehm, der entsprechend seinem Verwendungszweck abgemagert werden musste. Auch Probe 14 verfügt über eine recht hohe Bindigkeit, sodass die zugeführten Zuschlagstoffe, Sand, Kies und Holzfasern, gut gebunden werden konnten, ohne unzureichende Druckfestigkeit im späteren Baustoff zu generieren.

Die angegebene Einhaltung einer Abweichung von 10 Prozent war verhältnismäßig selten umsetzbar und führte zu vermehrten Wiederholungen des gesamten Prüfungsprozesses einer Probe. Insgesamt mussten 28 Durchführungen für 16 Proben getätigt werden. Oftmals trat die Abweichung des Ergebnisses erst bei dem dritten Probekörper auf.

Probekörper	PK1	PK2	PK3
Wiederholungen	3	2	7

Wiederholungen gesamt	Proben gesamt	Durchführungen gesamt
12	16	28

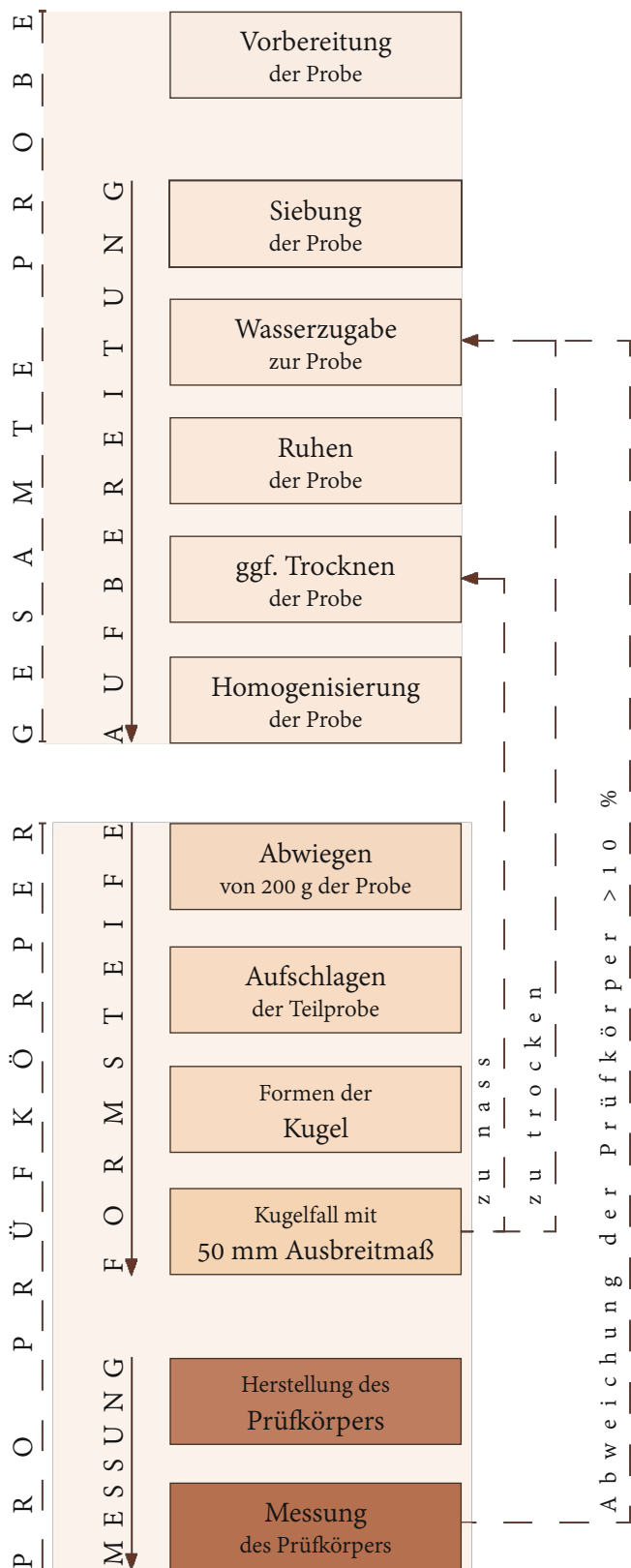
Tab. 5.15 | Durchläufe und Wiederholungen

Probe	Einschätzung Feldversuche	Ton/Schluff Feldversuche	Bindekraft [g/cm ²]	Bezeichnung
P1	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	497,27	Ton
P2	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	378,93	Ton
P3	Fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	337,40	sehr fett
P4	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	249,87	fett
P5	Fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	266,20	fett
P6	Fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	92,07	mager
P7	Sehr magerer Lehm, wenig Bindekraft	schluffig	-	-
P8	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	schluffig	54,40	sehr mager
P9	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	schluffig	53,93	sehr mager
P10	Fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig, sandig	400,13	Ton
P11	Fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig, sandig	465,27	Ton
P13	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig, sandig	183,73	fast fett
P14	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig, sandig	215,87	fett
P15	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	204,53	fett
P16	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	509,07	Ton
P17	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig	630,47	Ton
P18	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	tonig, sandig	157,47	fast fett

Tab. 5.16 | Einschätzungen der Feldversuche in Verhältnis zur Bindekraft

Im Vergleich zu den Einschätzungen durch die Feldversuche ist festzustellen, dass diese recht adäquat im Rahmen ihrer beschränkten Zuordnungsmöglichkeiten ausfallen. Nur bei den Proben P8 und P9 und bei Probe P6 wurden Fehleinschätzungen getroffen. Während die Feldversuche auf fette Lehme schließen ließen, resultiert die Bindigkeitsprüfung im Gegenteil. Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich bei dem

Material um sogenannte „Täuschlehme“ handelt. Grund dafür ist ein hoher Schluffanteil, der bei den Feldverfahren den falschen Eindruck einer hohen Bindekraft hervorruft. Auch bei Probe P7, welche keine genügende Bindekraft für die eigentliche Durchführung der Achterlingsprüfung aufweist, wurde eine falsche Vermutung getroffen.



5.5.5 Diskussion zur Prüfung

Die Bindekraftprüfung stellt aktuell die wohl relevanteste Eignungsprüfung von Baulehm in Bezug auf seine Charakterisierung dar. Sie zielt darauf ab, die Kohäsionskraft im zähplastischen Zustand des Materials zu messen. Damit lassen sich wiederum Tendenzen zu den bauphysikalischen Eigenschaften des späteren Baustoffs ableiten. Die Prüfung sieht sich allerdings mit einer Reihe von Herausforderungen konfrontiert, die ihre Aussagekraft und Genauigkeit beeinflussen können. Diese gliedern sich in die grundlegende Kritik an dem Verfahren sowie Bewertung der Durchführbarkeit basierend auf im Rahmen dieser Arbeit gesammelten Erkenntnissen.

Allgemeine Bewertung

Es stellt sich die Frage, welche Relevanz die Prüfung bezüglich der Lehmpraxis hat. Unter der Voraussetzung der Richtigkeit und Allgemeingültigkeit der Ergebnisse kann eine Klassifizierung stattfinden. Diese steht in direkter Verwertungsabsicht des Materials durch das Aufzeigen von Tendenzen für die Eignung bestimmter Lehmstoffe. Jedoch erfolgt dies unter Vorbehalt ausreichender Kenntnisse und Erfahrungen des/der Bewertenden. Dabei kann eine materialeffiziente Baustoffherstellung angestrebt werden, was sich in geringen Zuschlagmengen und Aufbereitungsaufwand äußern würde.

Bereits bei ihrer Veröffentlichung galt die Prüfung wohl als recht umstritten, was die Genauigkeit und Gültigkeit der daraus resultierenden Ergebnisse betrifft, und auch in aktuellen Literaturwerken wird Kritik an der Prüfung angebracht.

1. Siebung des Probematerials:

In der Fachliteratur wird hauptsächlich die Meinung vertreten, dass durch das Aussieben der Körnung über 2 mm nicht die Realität abbildet und die Einflussnahme des Mineralgerüsts auf die Bindekraft bei der Prüfung dadurch nicht berücksichtigt wird.⁶³ Röhlen und Ziegert merken an, dass Lehme zum Teil durch die Bindigkeitsprüfung als ungeeignet eingestuft werden, aber durch die Einflussnahme von anderen Materialgegebenheiten, wie beispielsweise eine günstige Korngrößenverteilung, im Lehmbau Verwendung finden könnten.⁶⁴

2. Aufbereitung des Prüfmaterials:

Schneider, Schwimann und Bruckner bemängeln den fehlenden Einbezug der Aufbereitung des Materials in der Prüfung, welche zusätzlich Einfluss auf die Bindekraft nehmen kann.⁶⁵

Neuere Studien bestätigen dies bedingt: In dem österreichischen Forschungsprojekt „aktiLehm“ aus dem Jahr 2021 - 2022 wurde beispielsweise eine Erhöhung der Druckfestigkeit von Lehmen durch mechanische physikalische Aktivierung nachgewiesen. Durch Mahlen des Lehms mit unterschiedlichen Zeitperioden (0 – 30 – 60 Minuten) konnten Steigerungen der Druckfestigkeit von bis zu 74 Prozent erzielt werden.⁶⁶ Ähnliches wird bewirkt bei Zugabe von Dispersionsmittel, welche eine chemische „Entflockung“ der Tonpartikel bewirkt.⁶⁷ Zwar sind die zwei genannten Aufbereitungen in der Praxis aufgrund ihrer Extremität nicht direkt von Bedeutung, jedoch ist es denkbar, dass verschiedene gängige Aufbereitungsverfahren, wie Aufschlänmen oder Mahlen, auch unterschiedliche Voraussetzungen im tatsächlichen Bauprozess generieren.

Im Fokus der Kritik steht die vermehrte Aktivierung der Tonminerale als Folge der intensiven Bearbeitung der Proben, welche eine höhere Bindekraft des untersuchten Materials generiert.⁶⁸ Schröder führt diesen Aspekt als Voraussetzung der Durchführbarkeit der Prüfung an. Mit dem ‚gleichen Grad der Aufgeschlossenheit der Tonminerale‘⁶⁹ sind die verschiedenen Lehme erst vergleichbar.

Den tatsächlichen Einfluss der Aufbereitung auf die Bindekraft und ob dieser immer den gleichen Grad erreicht - insbesondere, wenn die Probe vermehrte Wiederholungen bei der Aufbereitung aufweist - gilt es zu überprüfen.

3. Konsistenz der Prüfkörper:

Die Prüfung wird an zähplastischen Proben durchgeführt und bestimmt deren Zugfestigkeit. Um verschiedene Lehme ins Verhältnis setzen zu können, bedarf es der einheitlichen Konsistenz der Formsteife. Minke beschreibt die Abhängigkeit der Bindekraft vom Wassergehalt und damit auch von der Plastizität.⁷⁰ Schröder führt zudem eine Studie der Bauhaus-Universität Weimar an, welche diese Relation der bauphysischen Eigenschaften belegt.⁷¹ Diesen Aspekt greifen Schneider, Schwimann und Bruckner

hinsichtlich der Baustoffentwicklung auf und sprechen sich gegen die Zweckmäßigkeit der Prüfung aus, da die Resultate des zähplastischen Lehms nur recht ungenaue Rückschlüsse auf die spätere Druckfestigkeit des getrockneten Materials zulassen.⁷² Auch Röhlen und Ziegert führen die starke Zunahme der Tonbindung im trockenen Material an.⁷³

4. Bezug zu Lehmbaustoffen:

Das direkte Verhältnis zur Verwertung des Baulehms ist aktuell nicht zur Gänze geklärt. Wie bereits beschrieben besteht keine Proportionalität zur Druckfestigkeit, was im Endeffekt eine Klassifizierung des Lehmes erlaubt, die jedoch keinen Bezug zum weiteren Verfahren hat. Jeder Lehm ist trotz Einteilung wiederum individuell zu betrachten und zu Baustoffen weiterzuentwickeln.

Niemeyer argumentiert bereits bei der Veröffentlichung seines Buches gegen genauere wissenschaftliche Verfahren, da diese für den Lehmbau nicht geeignet bzw. zielführend seien. Seine Klassifizierung stellt bis dato den einzigen Ansatz für die Charakterisierung von Lehm im deutschsprachigen Raum dar. Schröder führt im internationalen Kontext die Plastizitätsgrenze als Klassifizierungskriterium an, welche ebenfalls den Bezug von Aushub zum Lehmbaustoff offenlässt.⁷⁴

Bewertung der Durchführung

Die Durchführung der Bindigkeitsprüfung fällt recht zeitaufwändig aus. Zudem ist anzumerken, dass ein gewisses Maß an Kenntnis und Erfahrung gefordert ist, damit die Abläufe reibungslos funktionieren. Im eigenen Versuch ist dies nach 17 Proben in Ansätzen vorhanden. Trotzdem gestalteten sich einige Bereiche der Prüfung recht problematisch.

1. Personenabhängigkeit der Durchführung:

Es ist vorstellbar, dass die Ergebnisse durch die Art und Weise der Verfahrensdurchführung beeinflusst werden könnten. Beispielhaft dafür ist der Kraftaufwand bei der Einbringung des Lehmes in die Form bzw. die Anzahl der Wiederholungen. In vergleichbaren Verfahren, wie beispielsweise der Proctorversuch in der Bodenmechanik, ist Stoßkraft und Anzahl

63 vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 204 - 205

64 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 22 - 23

65 vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 204 - 205

66 vgl. Streit, Liberto, Kirchengast, Korjenic, 2023 | S. 35 - 43

67 vgl. Ardant, Brumaud, Habert, 2020

68 vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 204 - 205

69 Schröder, 2019 | S. 111
70 vgl. Minke, 2017 | S. 32
71 vgl. Schröder, 2019 | S. 110

72 vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 204 - 205

73 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 22

74 vgl. Schröder, 2019 | S. 108

⁵ vgl. Niemeyer, 1982 | S. 31

⁶ vgl. Niemeyer, 1982 | S. 34

⁷ Niemeyer, 1944 | S. 174 ebd.

genau festgelegt, um eine Vergleichbarkeit zu generieren. Die fehlende Festlegung dieses Vorgangs kann zu Ungenauigkeiten führen und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigen. Niemeyer selbst führt in seinem Buch an, die Methode an 400 Proben durchgeführt zu haben.⁷⁵ Weitere umfangreiche Studien oder detaillierte Beschreibungen der Durchführung sind nicht bekannt, um vergleichende Beobachtungen anzustellen.

2. Zeitabhängigkeit der Ergebnisse:

Das Verfahren unterliegt einer großen Zeitabhängigkeit, was wiederum einen starken Bezug auf die ausführende Person nimmt. Da die Bindigkeit sehr schnell zunehmen kann, sind die Ergebnisse von der Zeit zwischen der Erlangung der Formsteife und dem Einhängen des Prüfkörpers abhängig. Niemeyer verweist zwar auf einen „Nachreife-Prozess[es] durch „Mauken““, beschreibt die Zeitspanne zwischen Herstellung der Formsteife und Prüfkörperanfertigung nur als „unmittelbar nach der Aufbereitung“⁷⁶. Die Einhaltung festgelegter Zeiten für die einzelnen Schritte stellte sich als hilfreich für auswertbare Ergebnisse heraus. Allerdings dauerte der Arbeitsschritt bei den ersten Durchführungen länger als bei den Proben gegen Ende. So ist das Ergebnis wahrscheinlich unmittelbar mit der Arbeitsweise der:s Ausführenden verbunden.

3. Verständnis für das Material:

Niemeyers Absicht eine Methode zu entwickeln, die unabhängig vom Erfahrungs- bzw. Wissensstand der durchführenden Person ist, stellte sich im Selbstversuch als problematisch heraus. Ein Verständnis für das untersuchte Material ist nach eigener Einschätzung für eine erfolgreiche Durchführung erforderlich. Der Informationsbedarf nach detaillierten Erklärungen in den verschiedenen Anleitungen des Verfahrens ist nicht gedeckt. Die größte Hilfestellung bot der originale Artikel Niemeyers in der Bauweltwelt von 1944, worin er seine Erfahrungen und Begründungen zu den einzelnen Arbeitsschritten etwas vertieft. Zugleich ist anzumerken, dass es sich bei der Prüfung von Lehm nicht anders verhalten sollte als bei anderen Baustoffen, bei denen grundsätzlich Expertise für die Ausführung und Bewertung dieser gefordert ist.

4. Ungenauigkeit des Prüfgeräts:

Das Prüfgerät selbst ist sehr empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen, insbesondere Schwingungen, was die Genauigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen kann. Durch die doch recht primitive Ausführung der Gerätschaft sind zusätzlich Unterschiede zwischen verschiedenen Prüfgeräten vorstellbar; Besonders hinsichtlich der Einflussgeschwindigkeit des Sandes, welche nur durch einen Maximalwert begrenzt ist und daher eine große Variabilität zulässt. Die Vermutung liegt nahe, dass auch während der Messung die Zeit wiederum eine wichtige Komponente ist – also die Zeit, in welcher der Prüfkörper belastet wird.

Die aufgezählten Gründe resultierten während der Durchführung zur Notwendigkeit vieler Wiederholungen, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen.

Niemeyer beschreibt in seinem Artikel die Schwierigkeit und Zeitintensität des gesamten Verfahrens – insbesondere, die Herstellung der Formsteife, welcher sich nach einem fehlgeschlagenen Versuch wieder angenommen werden muss. „Das Treffen der richtigen Steife ist die Hauptarbeit bei dem ganzen Verfahren!“⁷⁷ Zusätzlich verweist er ebenfalls auf die Abhängigkeit von der ausführenden Person sowie die Empfänglichkeit für Fehlerquellen. „Das Verfahren ist recht empfindlich und muss gewissenhaft ausgeführt werden.“⁷⁸

Niemeyer war sich den Herausforderungen bewusst, welche die Durchführung mit sich bringt. Hinsichtlich des historischen Kontexts und des Aspekts, dass es bisher keine alternativen Ansätze zur Klassifizierung von Lehmen gibt, hat Niemeyer trotz umfangreicher Kritik eine funktionsfähige Methode zur Bestimmung und Einordnung von Lehmen nach ihrer Bindekraft geschaffen. Im heutigen Kontext besteht dringender Handlungsbedarf weitere Untersuchungen durchzuführen und das Verfahren auf den Stand der Technik zu bringen, um Lehm den massentauglichen Einsatz zu ermöglichen.



Abb. 5.66 | Impressionsbilder von Lehm (in der Aufbereitung)

5.6 Korngrößenverteilung



Zielstellung

Die Korngrößenverteilung gibt im Lehm- und Schluffbau Aufschluss zum möglichen und sinnvollen Einsatz des Materials. Die Optimierung des Baulehms ist durch Zuschlagstoffe und Art der Aufbereitung bestimmt. Die Korngrößenverteilung ist demnach kein Kriterium für einen Ausschluss der Verwertbarkeit von Lehm.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verfahren als mögliche Ergänzung der Bindekraftprüfung hinsichtlich einer klassifizierten Ablagerung durchgeführt.

5.6.1 Theoretischer Hintergrund

Lehm besteht aus Ton, Schluff, Sand und gegebenenfalls Kies - die Anteile variieren je nach Lehmart. Die Korngrößenverteilung analysiert das Verhältnis dieser Komponenten durch die Differenzierung ihrer Größen.

Daraus können bauphysikalische Eigenschaften des Lehms abgeleitet werden, wie dessen Druckfestigkeit, Verdichtbarkeit, Quell- und Schwindverhalten sowie die Erosionsstabilität.⁷⁹ Röhlen und Ziegert ordnen die Prüfung als ‚*sinnvolles ergänzendes Prüfverfahren*‘⁸⁰ ein, welches der Baustoff- bzw. Rezepturenentwicklung zuzuordnen ist.

Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1 gilt es in drei Boden-
gruppen zu unterscheiden: Sehr grobkörniger Boden,

grobkörniger Boden und feinkörniger Boden.⁸¹ Feinkörnige Böden haben maximale Korngrößen von 0,63 mm, worunter beispielsweise Lösslehme zählen. Grobkörnige Böden weisen größere Bestandteile auf, welche bis zum Grobkies mit einer Korngröße von 63 mm reichen. Auch in Lehm sind oftmals Grobkornanteile befindlich und je nach Lehmbautechnik auch gewünscht bzw. essenziell.

Eine genaue Aufschlüsselung von fein- und grobkörnigen Böden folgt den definierten Korngrößen der Bodenbestandteile Ton, Schluff, Sand und Kies. Im Lehm-
bau sind die verschiedenen Komponenten unter den Begriffen Schlämmkorn / Feinkorn und Siebkorn / Grobkorn bekannt.

Bodengruppe	Bezeichnung		Abkürzung	Korngröße	Bezeichnung im Lehm- bau
Feinkörniger Boden	Ton (auch Feinstkorn)		Cl	$\leq 2 \mu\text{m}$	Schlammkorn / Feinkorn
	Schluff	Feinschluff	fSi	$2 < x \leq 6,3 \mu\text{m}$	
		Mittelschluff	mSi	$6,3 < x \leq 20 \mu\text{m}$	
		Grobschluff	cSi	$20 < x \leq 63 \mu\text{m}$	
Grobkörniger Boden	Sand	Feinsand	fSa	$0,063 < x \leq 0,2 \text{ mm}$	Siebkorn / Grobkorn
		Mittelsand	mSa	$0,2 < x \leq 0,63 \text{ mm}$	
		Grobsand	cSa	$0,63 < x \leq 2 \text{ mm}$	
	Kies	Feinkies	fGr	$2 < x \leq 6,3 \text{ mm}$	
		Mittelkies	mGr	$6,3 < x \leq 20 \text{ mm}$	
		Grobkies	cGr	$20 < x \leq 63 \text{ mm}$	

Tab. 5.17 | Unterteilung nach Bodengruppen gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1

Klassifizierung von Böden

A. Klassifizierung von Böden nach

ÖNORM EN ISO 14688-2

Da Böden zumeist eine Mischform verschiedener Bestandteile sind, unterscheidet die Norm zusätzlich in Haupt- und Nebenanteile, welche in der Nomenklatur aufgeschlüsselt werden. Der Hauptanteil wird bei grobkörnigen Böden anhand seiner Masse bestimmt, während er bei feinkörnigen Böden durch die Plastizität definiert wird. Grund hierfür sind die

bauphysikalischen Eigenschaften des Bodens, welche sich in den beiden Bodengruppen aufgrund der Körnung grundlegend unterscheiden. Zu erwähnen gilt, dass auch in dieser Norm zur Ermittlung des Hauptanteils Feldversuche (In-situ) herangezogen werden. Die Nomenklatur erfolgt nach einem festgelegten System. Für den Lehm-
bau sind folgende Begrifflichkeiten relevant:

79 vgl. Schröder, 2019 | S. 91
80 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 21
81 vgl. ÖNORM EN ISO 14688 – 1:2020 | S.11

Hauptanteile:

- Die Hauptanteile werden als Nomen in Großbuchstaben ausgeschrieben.
- Während bei zwei gleichwertigen Hauptanteilen aus dem Grobkornbereich beide Begrifflichkeiten in Großbuchstaben geschrieben werden, wird im Feinkornbereich anhand der Plastizität zwischen ‚schluffigem TON‘ und ‚tonigem SCHLUFF‘ unterschieden.

Nebenanteile:

- Die Nebenanteile werden als Adjektiv vor dem Hauptanteil aufgeführt.
- Sind die Nebenanteile in einem geringen oder starken Verhältnis vorhanden, kann dies durch die Anführung von „stark“ und „schwach“ kenntlich gemacht werden.
- Ton und Schluff als Nebenanteile werden anhand ihrer Plastizität bestimmt.

Beispiele der korrekten Bezeichnung sind ‚feinkiesiger, schluffiger GROBSAND‘, ‚sehr schluffiger FEINSAND‘ und ‚mittelsandiger TON‘. Diese Bezeichnungen ermöglichen einen direkten Aufschluss zur Bodenzusammensetzung.

B. Klassifizierung von Böden im Lehm- und Schluffbau

Im Lehm- und Schluffbau sind wiederum andere Bezeichnungen der Bodenarten gängig, welche durch die Anteile ihrer Komponenten bestimmt werden. Die im Anhang der ÖNORM L 1050 befindlichen Begrifflichkeiten für gemischte Böden stimmen mit den im Lehm- und Schluffbau bekannten Bezeichnungen überein. Aus den variierenden Anteilen der Komponenten Ton, Schluff und Sand werden demnach verschiedene Bodenarten definiert. Auch die Zusammensetzung von Lehm ist darin bestimmt.

Kurzzeichen	Bodenart	Tongehalt (t) [%-M.]	Schluffgehalt (u) [%-M.]	Sandgehalt (s) [%-M.]
S	Sand	$0 \leq t \leq 10$	$0 \leq u \leq 30$	$65 < s \leq 100$
uS	Schluffiger Sand	$0 \leq t \leq 5$	$30 < u \leq 55$	$40 < s \leq 70$
lS	Lehmiger Sand	$5 < t \leq 15$	$10 < u \leq 55$	$30 < s \leq 80$
tS	Toniger Sand	$10 < t \leq 25$	$0 \leq u \leq 10$	$65 < s \leq 90$
sU	Sandiger Schluff	$0 \leq t \leq 15$	$55 < u \leq 75$	$10 < s \leq 45$
U	Schluff	$0 \leq t \leq 15$	$75 < u \leq 100$	$0 \leq s \leq 25$
lU	Lehmiger Schluff	$15 < t \leq 25$	$55 < u \leq 75$	$0 \leq s \leq 30$
sL	Sandiger Lehm	$15 < t \leq 25$	$10 < u \leq 55$	$20 < s \leq 75$
L	Lehm	$25 < t \leq 40$	$10 < u \leq 55$	$5 < s \leq 65$
uL	Schluffiger Lehm	$25 < t \leq 45$	$55 < u \leq 75$	$0 \leq s \leq 20$
sT	Sandiger Ton	$25 < t \leq 40$	$0 \leq u \leq 10$	$50 < s \leq 75$
lT	Lehmiger Ton	$40 < t \leq 50$	$0 \leq u \leq 55$	$0 \leq s \leq 60$
T	Ton	$50 < t \leq 100$	$0 \leq u \leq 50$	$0 \leq s \leq 50$

Tab. 5.18 | Korngrößenklassen nach ÖNORM L 1050

In der Norm wird zudem das Österreichische Bodenartendreieck aufgeführt. Dieses ermöglicht mithilfe eines Koordinatensystems das Ablesen der Bodenart anhand der prozentualen Anteile von Ton und Schluff. Sand wird als Variable in das Diagramm einbezogen, wodurch die lediglich die Korngrößenverteilung im Feinkornbereich ($<63 \mu\text{m}$) notwendig ist.

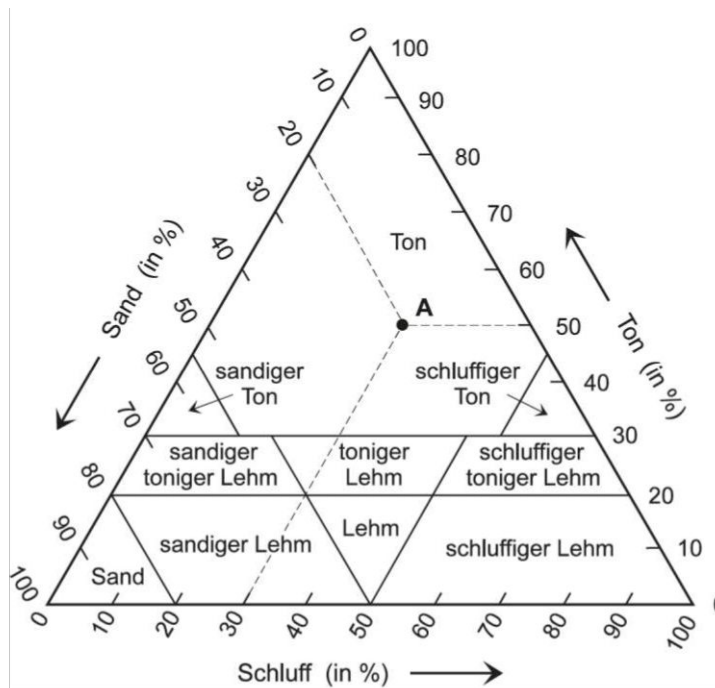


Abb. 5.67 | Österreichisches Bodenartendreieck

Eine ähnliche Vorgehensweise weist die im Lehmbau bekannte Dreiecksdarstellung zur Bestimmung der Bodenarten auf. Sie berücksichtigt die Komponenten Ton, Schluff und Sand nach ihrem prozentualen Anteil und gewährleistet ein vereinfachtes Ablesen.⁸²

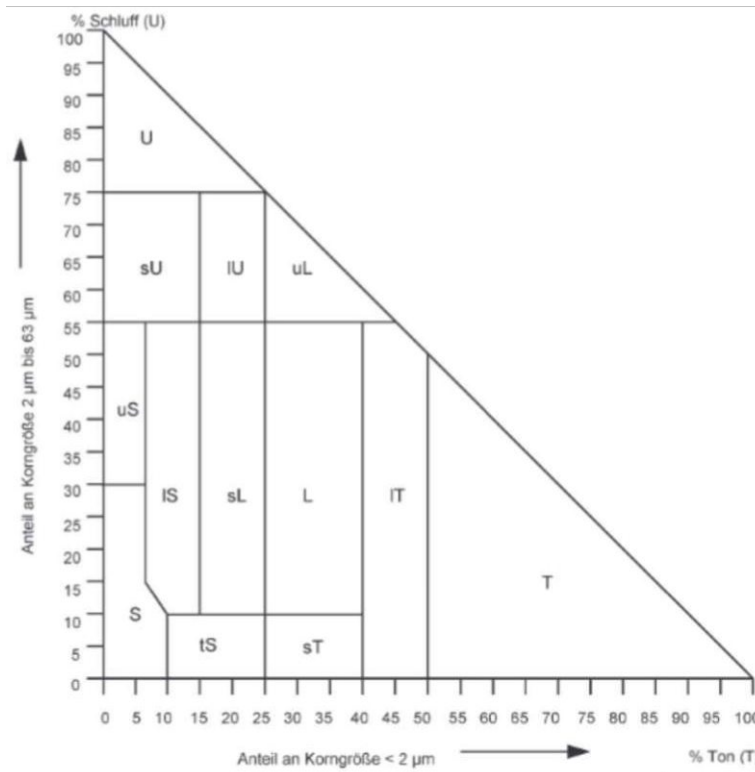


Abb. 5.68 | Dreiecknetz des Lehms

⁸² vgl. Minke, 2017 | S. 17

C. Klassifizierung von Böden nach DIN 18196 – Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

Schröder verweist zudem auf die DIN 18196, welche wiederum eine andere Definition für gemischte Böden aufweist. Ersichtlich werden hierbei die definierten prozentualen Anteile unter Berücksichtigung der Ungleichförmigkeitszahl und Krümmungszahl. Anhand einiger Beispiele ordnet Schröder verschiedene Lehmarten den gemischten Böden zu.

D. Klassifizierung von Lehm gemäß der Lehmbau Regeln

Die *Lehmbau Regeln* behandeln die Einordnung von Lehm bezüglich seiner Korngrößenverteilung recht simpel. Sie legen fest, dass der Hauptteil der vertretenen Körnung die Beschreibung eines Baulehms bestimmt. Gemischtkörnige Lehme sind nach ihren Anteilen zu benennen.

Grobsandig	0,2	–	2 mm
Feinsandig	0,06	–	0,2 mm
Schluffsandig	< 0,06		mm

Boden	Korngrößenanteile		Gruppe	Symbol	Beispiel
	≤ 63 µm	≤ 2 mm			
Gemischtkörnige Böden	5 – 40 %	≤ 60 %	Kies-Schluff-Gemische	GU	Verwitterungskies (GU*)
			Kies-Ton-Gemische	GT	Geschiebelehm (GT*)
	5 – 40 %	> 60 %	Sand-Schluff-Gemische	SU	Auelehm, Sandlöss (SU*)
			Sand-Ton-Gemische	ST	Geschiebelehm (ST*)
Feinkörnige Böden	> 40 %		Leicht plastische Schluffe	UL	Löss, Hochflutenlehm
			Mittelpastische Schluffe	UM	Seeton, Beckenschluff
			Ausgeprägt plastische Schluffe	UA	Vulkanische Böden
			Leicht plastische Tone	TL	Geschiebemergel
			Mittelpastische Tone	TM	Lösslehm, Becken-, Seeton
			Ausgeprägt plastische Tone	TA	Beckenton

Tab. 5.19 | Einteilung nach DIN 18196

Verfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung

Um die prozentualen Anteile der Böden zu bestimmen, werden die enthaltenen Korngrößen ausgewertet. Durch die verschiedenen Korngrößen kann wiederum bestimmt werden, um welchen Bodenbestandteil es sich handelt.

Grobkörnige und feinkörnige Böden werden gemäß ÖNORM L 1050 unterschiedlich ausgewertet. Feinböden werden durch den Äquivalentdurchmesser

bestimmt, welcher die Messung eines unregelmäßigen Partikels im scheinbaren Durchschnitt bezeichnet. Grobbodenbestandteile werden dagegen nach dem größten Korndurchmesser definiert. Grund hierfür sind die verschiedenen Auswertungsprozesse der im Lehmbau bekannten Verfahren: Die Siebanalyse wird für den Grobanteil angewendet und der Sedimentationsversuch bestimmt den Feinanteil.⁸³

Die ÖNORM EN ISO 17892-4 normiert unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung. Sie empfiehlt die Festlegung des Verfahrens anhand der geschätzten Mengen der Bestandteile der Probe. Wenn der Feinanteil unter 10 Prozent liegt, ist eine Siebanalyse ausreichend. Sollte es sich bei der Probe um einen Feinboden handeln und 90 Prozent der Korngrößen im Bereich Schluff und Ton (<63 µm) liegen, kann ausschließlich der Sedimentationsversuch durchgeführt werden. Für alle Bodenproben dazwischen ist eine Kombination (kombinierte Sieb-Schlammmanalyse) der beiden Verfahren empfohlen.⁸⁴

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung werden mittels grafischer Darstellung im Koordinatensystem ausgewertet. Folgendes Beispiel wird in der Norm exemplarisch aufgeführt, welches die Grenze zwischen den zusammengeführten Ergebnissen aus dem Sedimentationsversuch [1] und der Siebanalyse [2] kenntlich macht. Zudem werden die Korngrößenbereiche der verschiedenen Bestandteile [A, B, C, D] und deren Abstufung [E, F, G] dargestellt.

Die meisten deutschsprachigen Literaturwerke im Lehmbau verweisen auf die DIN 18123. Im Vergleich zur oben genannten ISO-Norm fallen die Verfahren zur Auswertung der Korngrößenverteilung in der DIN etwas kompakter aus, jedoch ist diese seit 2017 nicht mehr aktiv. Auch in der DIN-Norm wird zwischen Siebung und Sedimentation differenziert. Wie eingangs beschrieben, ist vor allem die Siebung ausschlaggebend für den Lehmbau.

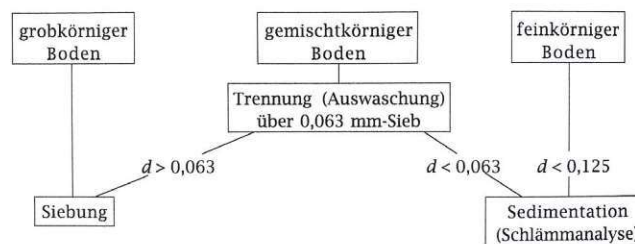
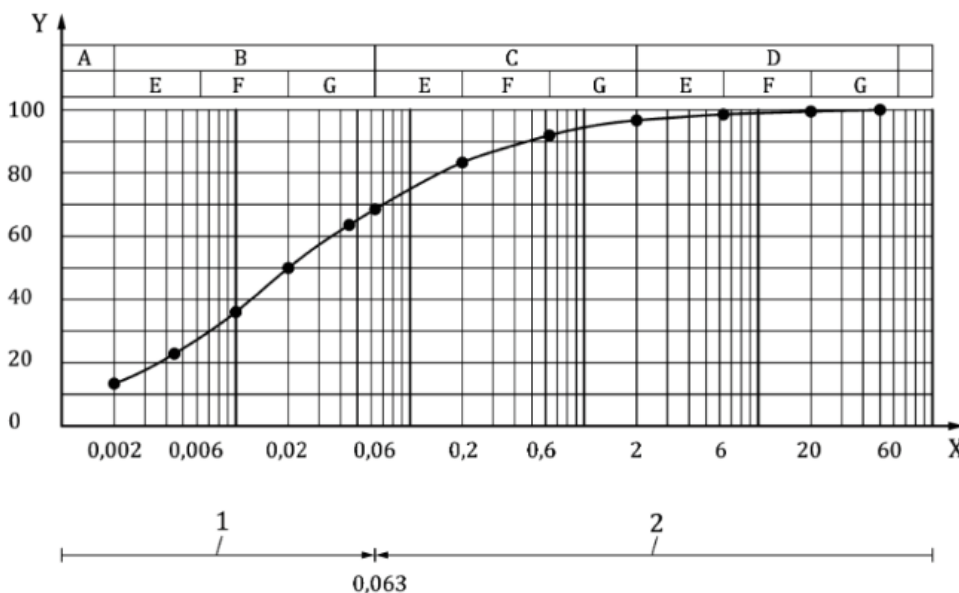


Abb. 5.69 | Prüfmethode für Böden



- LEGENDE
- [1] Sedimentation
 - [2] Siebung
 - [A] Ton
 - [B] Schluff
 - [C] Sand
 - [D] Kies
 - [E] fein
 - [F] mittel
 - [G] grob
 - [X] Korngröße in mm
 - [Y] Siebdurchgang in %

Abb. 5.70 | Beispiel für eine Korngrößenverteilung

84 vgl. ÖNORM EN ISO 17892-4:2017 | S. 13

vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 59
Niemeyer, 1982 | S. 36
vgl. Schneider, Schwimann, Bruckner, 1996 | S. 60

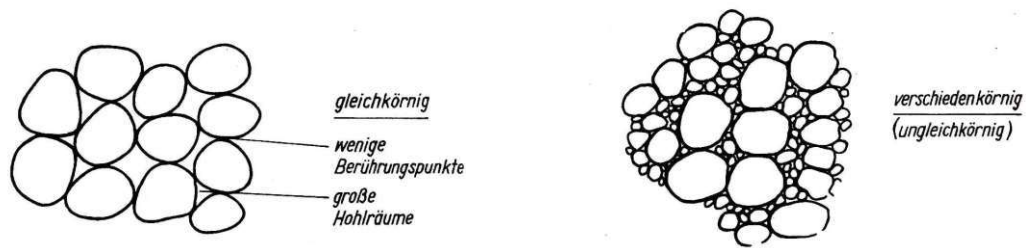


Abb. 5.71 | Günstiges und ungünstiges Korngemisch

Siebanalyse

Durch die Siebung können Grobkornanteile $>63 \mu\text{m}$ bestimmt werden. In der Fachliteratur beschränken sich die meisten Lehmbauwerke auf eine genauere Auswertung der Korngrößen im Bereich bis 2 mm. Dies stellt den Korngrößenbereich von Sand mit der Abgrenzung zum Kies dar.

Der Einsatz sogenannter Regelsieblinien im Grobkornbereich wird in der Mörtel- und Betonherstellung genutzt, um mit der idealen Korngrößenverteilung die bauphysikalischen Eigenschaften des Materials zu beeinflussen. Die bekannte FULLER-Kurve zielt darauf ab, durch ein möglichst dichtes Korngerüst wenig Oberfläche zu generieren. Diese Aspekte nehmen auch im Lehmbau Einfluss auf die Festigkeit des Materials sowie die Menge an benötigtem Bindemittel (Ton).⁸⁵ Im Unterschied zu Beton werden Lehmmischungen jedoch nicht (komplett) künstlich hergestellt, sondern liegen bereits natürlich vor. Die Analyse der Sieblinie kann Aussagen zu möglichen Zuschlägen verschiedener Korngrößen geben, um den gewünschten Lehmabbaustoff zu optimieren.

Niemeyer bedauert in seinem Literaturwerk *Der Lehm*, dass Körnungen über 0,5 mm ‚leider‘⁸⁶ eine Seltenheit im Lehm sind. Grund dafür ist die Notwendigkeit von grober Körnung in massiven

Lehmbautechniken, wofür oft grobkörnige Zuschläge notwendig sind. Daher würde eine Regelsieblinie für Lehmmischungen vor allem im Stampflehm-Anwendung finden können, da dessen Hauptbestandteile grobkörnig sind. Jedoch wäre die Anwendung von definierten Sieblinien ebenfalls im Feld der Lehmputze denkbar, da die Abriebfestigkeit und das Erscheinungsbild u.a. ebenfalls mit den Grobkornanteilen zusammenhängt.

Das Verhältnis zwischen Fein- und Grobkorn nimmt vor allem Einfluss auf die Druckfestigkeit des späteren Materials. Nach Schröder ist das Prinzip der „dichtesten Kugelpackung“ auch im Lehmbau anwendbar, welches das optimale Verhältnis zwischen Sand und Kies zum Feinanteil beschreibt. Nach Schneider, Schwimann und Bruckner liegt dieses bei etwa 1:5 für Lehm mit hoher Stabilität, wobei der Feinanteil die Hohlräume zwischen den Grobkörnern ausfüllt und damit eine hohe Rohdichte generiert.⁸⁷

Die Definition einer Regelsieblinie könnte ein Anhaltspunkt für die Rezeptentwicklung sein und diese vereinfachen sowie beschleunigen, weshalb diese Thematik in dem Bereich des Lehmbaus sehr aktuell ist.



Abb. 5.72 | Einfluss verschiedener Verhältnisse des Grobkornanteils in Lehmputz (Lehm: Sand)

Sedimentation

In der Geologie und Mineralogie spielt der Feinkornbereich eine wichtige Rolle und auch die für den Lehmbau essenziellen Tone befinden sich in dieser Korngrößenordnung. Durch die Sedimentation können Korngrößen von 1 µm bis 125 µm bestimmt werden, jedoch ist im Lehmbau die Maximalgrenze bei 63 µm festgelegt, was den Fein- vom Grobkornbereich unterscheidet.

Für die Bestimmung der Korngrößen im Mikrometerbereich gibt es unterschiedliche Verfahren. Christina Janson untersucht in ihrer Dissertation die Tauglichkeit von drei Prüfmethode, welche aktuelle Verfahren inkludieren. Sie kommt zu dem Ergebnis, dass das im Lehmbau herkömmliche Verfahren der Aräometer-Methode, auch als Schlämmanalyse bekannt, für den Lehmbau am praktikabelsten ist.⁸⁸ Das Verfahren ist recht zeitaufwändig, da die Messungen 24 Stunden andauern, und entspricht in der Mineralogie nicht mehr dem Stand der Technik (siehe Kap. 5.6.7 - Sedigraph).

Die Aräometer-Methode basiert auf dem Stokeschen Gesetz, welches die unterschiedlichen Absinkgeschwindigkeiten von Partikeln in einer Flüssigkeit ermittelt. Hierzu wird die Probe (<63 µm) mit Wasser und Dispersionsmittel vermenget. In der Suspension sinken die Partikel mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ab, was sich wiederum in deren

Dichte widerspiegelt. Ein Tonpartikel benötigt etwa 6 ½ Stunden um 10 cm abzusinken, während Schluff deutlich schneller ist. Die Veränderungen der Suspensionsdichte werden im zeitlichen Kontext mittels des Aerometers gemessen und durch das Stokes'sche Gesetz ausgewertet.

Das Ergebnis der Methode ist also nicht die direkte stoffliche Auftrennung der verschiedenen Korngrößen, sondern die Bestimmung derer Anteile. Man kann in Ton, Fein-, Mittel- und Grobschluff unterscheiden (siehe Tab. 5.17).

Ursprünglich war die Intention der Prüfung die Bestimmung des Tonanteils ($\leq 2 \mu\text{m}$), worauf man wiederum auf die Bindekraft eines Materials schließen kann. In der Fachliteratur wird die Prüfung im Allgemeinen angeführt, jedoch wird zumeist darauf hingewiesen, dass nach neusten Erkenntnissen keine Rückschlüsse auf die Bindekraft möglich seien. Röhlen und Ziegert konkretisieren diese Behauptung und führen drei Begründungen hierfür auf.⁸⁹ Anhand Jansons Arbeit lassen sich diese in der Praxis beispielhaft belegen, da sie über die Sedimentation hinaus Proben mittels Röntgendiffraktometrie analysierte. Somit zeigt sie die genaue Aufschlüsselung der Bestandteile im Feinkornbereich.*

* Während Jansons Proben aus der Region Berlin/Brandenburg stammen, zeigen die in Österreich gewonnenen Proben des Forschungsprojekts „Clay to stay“ vom Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie (IBO) ähnliche Tendenzen auf.

1. Kaolinite (Zweischichttonminerale) können größer als 2 µm ausfallen und werden daher nicht im Tongehalt erfasst:

Janson untersucht insgesamt fünf Grubenlehme und weist bei jeder Probe Kaolinite im Korngrößenbereichen von Fein- (2 – 6 µm) und Mittelschluff (6 – 20 µm) nach. Zudem sind in diesen Bereichen ebenfalls Chlorite in vier der fünf Proben vorhanden.⁹⁰ Röhlen und Ziegert geben an, dass Kaolinite Korngrößen von 0,5 – 4 µm erreichen können, je nach Anzahl der verknüpften Mineralstrukturen.⁹¹

➔ Verfälschung des Ergebnisses durch Verfehlung der Erfassung aller Tonminerale.

2. „Nicht bindige“ Minerale können kleiner als 2 µm sein und treten daher im Messbereich der Tonminerale auf:

Durch die Identifikation der Minerale weist Janson in ihren Proben hohe Anteile von Mineralen ohne Einfluss auf die Bindekraft nach. Diese machen bei allen Proben über die Hälfte der Minerale aus.

Probe	GL-1	GL-2	GL-3	GL-4	GL-5
Mineralische Bestandteile ohne bautechnisch wirksame Bindekraft [M.-%]	74	56	57	76	58
Tonminerale [M.-%]	26	44	43	24	42

Tab. 5.20 | Mineralische Bestandteile der Grubenlehme <2 µm

88 vgl. Janson, 2013 | S. 52
 89 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 21
 90 vgl. Janson, 2013 | S. 60
 91 vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 15

Vor allem der Quarzanteil fällt sehr hoch aus (26 – 47 M.-%), was nach Röhlen und Ziegert nicht unüblich ist.

- ➔ Verfälschung des Ergebnisses durch Erfassung von Mineralen im Tonmineralbereich, die keine Auswirkung auf die bautechnische Bindekraft haben.

3. Zweischicht- und Dreischichttonminerale haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Bindigkeit:

Janson vergleicht die Anteile der vier Tonminerale Kaolinit (Zweischichtsilikat), Montmorillonit (Dreischichtsilikat), Illit (Dreischichtsilikat) und Chlorit (Vierschichtsilikat) anhand deren spezifischen Oberfläche, welche bei Dreischichttonmineralen größer ausfällt als bei Zweischichtmineralen. Kleine Korngrößen haben eine größere spezifische Oberfläche, was wiederum eine bessere „Bindigkeit“ bedeutet. Janson weist nach, dass die Probe mit dem deutlich geringsten Tonmineralanteil bei der spezifischen Oberfläche ähnliche Ergebnisse aufweist wie die anderen Proben.⁹²

- ➔ Verfälschung des Ergebnisses durch Annahme der gleichwertigen Auswirkung aller Tonminerale auf die Bindekraft.

In den Lehmregeln wird daher darauf hingewiesen, dass eine Siebung im Bereich 2 – 1 – 0,25 – 0,63 mm ausreichend ist. Die Argumentation beläuft sich auf die Anführung der bedingten Relation zur Bindekraft und dem plastischen Verhalten.⁹³

Auch Diplomingenieurin Jasmine Alia Blaschek aus dem Berliner Büro ZRS Ingenieure GmbH argumentiert bei der Baulehmeinungsprüfung gegen die Notwendigkeit einer Tonfraktionsanalyse. Jasmine Blaschek dazu: *„[...] Eine Unterscheidung der anteiligen Tonfraktionen ist im Lehmgebäudebau nicht primär erforderlich, da wir uns im Lehmgebäudebau auf die Bindekraft stützen und nicht unbedingt das anteilige Zusammenspiel der einzelnen Tonmineralarten genau aufgeschlüsselt brauchen. Tonfraktionsanalysen sind technisch sehr aufwändige, langwierige und demnach auch sehr kostspielige Analysen, die für die Frage nach der Eignung des Lehms als Baustoff noch keine entsprechend einzuschätzende Aussage mit sich bringen. Mit der Bindekraftprüfung wissen wir hingegen ganz konkret in N/cm², wie sich dieses Zusammenspiel kräftetechnisch auswirkt. Tonfraktionsanalysen sind u. a. für ArchäologInnen und die Zuordnung von Keramikstätten relevant sowie für all jene Fragestellungen, die sich explizit auf die Anteilsverhältnisse der Tonmineralarten konzentrieren.“*

Jasmine Alia Blaschek
Mailaustausch | 09.02.2023

Erkenntnisse durch die Korngrößenverteilung

Schröder führt einige Sieblinien für unterschiedliche Lehme beispielhaft an. Die Korngrößenverteilung ist demnach auch aufschlussreich für die Bestimmung einer Lehmart.⁹⁴

Im direkten Vergleich der Körnungslinien von Löss- und Verwitterungslehm ist erkenntlich, dass bei Verwitterungslehmen die Linie wesentlich flacher ausfällt als bei Lösslehmen, welche einen steilen Kurvenverlauf aufweisen. Bei den Lösslehmen fällt der Feinkornbereich zudem prozentual höher aus.

Der Verlauf der Körnungslinien kann durch die ÖNORM EN ISO 14688-2 bestimmt und ausgewertet werden. Die Norm gliedert die Korngrößenverteilung in unterschiedliche Kategorien, welche Aufschluss über die daraus resultierenden Einschätzungen des Materials geben.

Die Korngrößenverteilung wird mittels der Parameter Krümmungszahl (C_u) und Ungleichförmigkeitszahl (C_u) vorgenommen.

Die Krümmungszahl ergibt sich aus dem Verhältnis der Siebdurchgänge bei 60 (D_{60}), 30 (D_{30}) und 10 (D_{10}) Prozent und wird mittels der folgenden Formel errechnet:

$$C_u = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60})$$

Die Ungleichförmigkeitszahl ist aus den Werten des 10- und 60-prozentigen Siebdurchlasses auszuwerten und lässt sich anhand folgender Formel ermitteln:

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

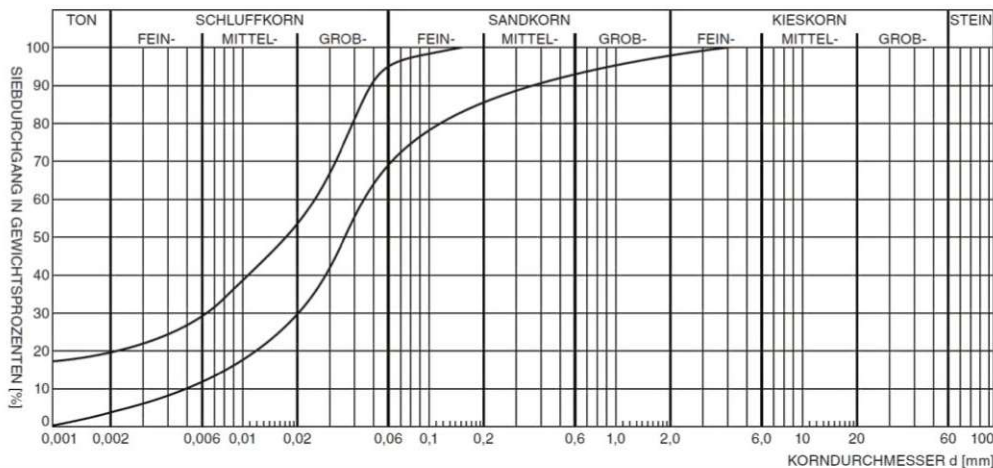


Abb. 5.73 | Körnungslinie von Lösslehm

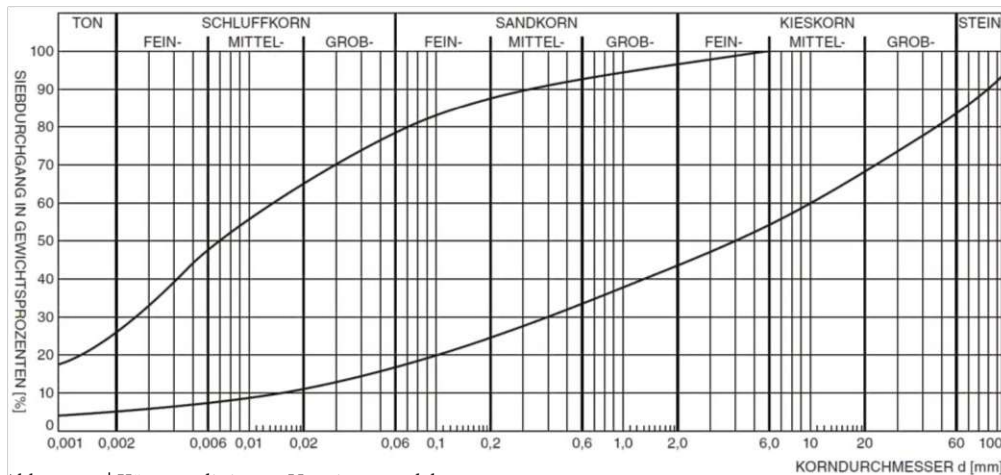


Abb. 5.74 | Körnungslinie von Verwitterungslehm

Abkürzung	Bezeichnung	Verlauf	C_u	C_c	Eigenschaften
S	Sehr eng gestuft / gleichmäßig gestuft	Sehr steil	< 3	< 1	Sehr wenige vertretene Korngrößen (in sehr großer Menge)
E	Eng gestuft	Steil	3 - 6	< 1	Wenige vertretene Korngrößen (in großer Menge)
M	Mittel gestuft	Recht flach	6 - 15	< 1	Einige wenige Korngrößen (in mittlerer Menge)
W	Weit gestuft	Sehr flach	> 15	1 - 3	Mehrere vertretene Korngrößen (in geringerer Menge)
I	Intermittierend gestuft	Stufig	> 15	$< 0,5$	Fehlen von Korngrößen / ungleichmäßige Mengen

Tab. 5.21 | Deutung der Körnungslinien nach ÖNORM EN ISO 14688-2

5.6.2 Prüfmethodik

Arbeitsschritt	Ort	Kooperation
Nasssiebung	Zeichensäle Arsenal (FS Architektur)	Siebe vom Forschungsbereich Baustofflehre und Werkstofftechnologie (Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer)
Trocknung	Labor	Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien (Dipl.-Ing. Erich Streit)
Trockensiebung	Labor	Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik (Andreas Hausenberger)
Alternative: Sedigraph	Labor	Institut für Angewandte Geologie, BOKU (Dipl.-Ing. Maria Mayrhofer)
Alternative: Camsizer	Labor	Forschungsbereich Baustofflehre und Werkstofftechnologie (Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer)
Zeitlicher Aufwand		Geräte und Materialien
Vorbereitung	2 Tage	Labor-Siebmaschine Analysesiebe aus Metalldrahtgewebe mit verschiedenen Maschenweiten (s.u.) Waage Trocknungsöfen Diverses Zubehör
Nasssiebung (Abtrennen der Feinanteile)	8 Tage	
Trockensiebung	1,5 Tage	
Zzgl. Trocknungszeiten		

Hinweis zur Durchführung

Aufgrund der angeführten Argumentation zur Sedimentation wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Bestimmung der Korngrößenverteilung im Feinkornbereich verzichtet. Diese Entscheidung basiert auf dem übergeordneten Ziel der vorliegenden Arbeit, welches Ausschlusskriterien, tendenzielle Eignungen für Lehmbaustoffe sowie eine mögliche sortierte Ablagerung von Aushub untersucht. Zusätzlich erschien die Bestimmung des Tonanteils nicht relevant, da dieser in der Bindekraftprüfung berücksichtigt wird. Die Ergebnisse werden in der weiteren Abhandlung mit denen der Bindekraft zusammengeführt.

Als weiteren Punkt der Argumentation wird auf die unterschiedlichen DIN-Normen von Lehmbaustoffen verwiesen. Zwar wird beispielsweise in der *DIN 18947 Lehmputzmörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung* auf die genormte Bestimmung der Korngrößenverteilung (nach *DIN EN 1015-1*) hingewiesen, jedoch bewegt sich auch diese ausschließlich

im Bereich $> 63 \mu\text{m}$. Daher erfolgt in dieser Arbeit zwar die Erfassung des Feinkornanteils als Gesamtheit, jedoch wird dieser nicht weiter aufgeschlüsselt. Schluff bewegt sich in einer Größenklasse von 2 bis $63 \mu\text{m}$. Welche Auswirkung die Differenzierung von Fein-, Mittel- und Grobschluff im Lehmabau hat, gilt es in weiteren Forschungen zu analysieren.

Analysesiebe

Gemäß Norm werden Siebe mit Loch- und Maschenweiten von $0,063 - 63 \text{ mm}$ für die Prüfung verwendet. Während sich die empfohlenen Maschenweiten der Siebe gemäß *Lehmbau Regeln / DIN 18123* an den normierten Siebsatz orientiert, empfiehlt die *ÖNORM EN ISO 17892* Maschenweiten, welche in Relation zu den Korngrößenbereichen der verschiedenen Komponenten von Lehm stehen.⁹⁵ Aufgrund der Laborausstattung wurde der Siebsatz der *Lehmbau Regeln* herangezogen.

Maschenweite [mm]		Bezeichnung	Korngröße nach ÖNORM L 1050 [mm]
Lehmbau Regeln bzw. DIN 18123*	Nach ÖNORM EN ISO 17892**		
0,06	0,06	Schluff	<0,063
0,25	0,20	Feinsand	0,063 – 0,20
1,00	0,60	Mittelsand	0,20 – 0,63
2,00	2,00	Grobsand	0,63 – 2,00
>2,00	>2,00	Kies	2,00 – 6,30

* Nicht alle Maschenweiten der DIN 18123 wurden von den Lehmbau Regeln übernommen.
** Weitere Maschenweiten (>2,00 mm) werden in der Norm aufgeführt, sind jedoch nicht relevant für Beprobung

Tab. 5.22 | Maschenweiten der Analysensiebe für den Rüttelsieb

Durchführung

A. Bestimmung der Probemenge

Die Probemenge wird nach dem repräsentativen Größtkorn bestimmt, während einzelne größere Bestandteile nicht beachtet werden. Aufgrund der feinkörnigen Proben wurden die größeren Probemengen der *DIN 18123* verwendet.

B. Abtrennen der Feinkörnigkeit

Zunächst werden die Lehmproben bei 105 °C getrocknet, woraufhin das Einwiegen auf 0,1 Prozent erfolgt. Anschließend wird eine Nasssiebung für Lehmproben mit Feinkorn empfohlen, was damit bei allen geprüften Lehmproben einhergeht.

Hierzu wird die Probe mit Wasser vermengt und mit den Händen gut aufgerührt, damit sich Feinkorn von Grobkorn trennt. Im manuellen Verfahren wird die aufgeschlammte Probe in der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit einer Maschenweite von 0,063 mm (Obergrenze Feinkorn) gewaschen. Der Vorgang wird so oft wiederholt, bis das Wasser klar bleibt. Der Siebdurchgang wird für den weiteren Prüfungsverlauf aufgefangen und bei 105 °C bis zur Trockenkonstante getrocknet.

C. Siebung

Das Grobkorn wird wiederum bei 105 °C bis zur Trockenkonstante getrocknet. Nach Abkühlen und Abwiegen der Probe findet die Trockensiebung statt.

Geschätztes Größtkorn der Probe [mm]	Probemenge [g]	
	Nach <i>DIN 18123</i>	Nach <i>ÖNORM EN ISO 17892</i>
2	150	100
5	300	300
10	700	500
20	2.000	2.000
30	4.000	Keine Angabe
~40	7.000	14.000

Tab. 5.23 | Probemengen nach geschätztem Größtkorn

Im maschinellen Verfahren ist hierfür eine Siebdauer von 10 Minuten notwendig, wobei Maschenweiten unter 0,5 mm nochmals durch Einzelsiebung von Hand nachbearbeitet werden. Hierfür wird der Siebrückstand auf den entsprechenden Analysensieben mittels einer weichen Bürste bearbeitet. Im manuellen Verfahren wird generell eine waagrechte Schüttelbewegung ausgeübt.

Die Siebrückstände werden jeweils in einer Auffangschale gesammelt und anschließend abgewogen.

D. Auswertung

Die Auswertung der Siebrückstände findet nach einer Genauigkeit von 0,1 Prozent statt. Dabei darf der Massenunterschied zum anfänglichen Einwiegen nicht größer als 1 Prozent ausfallen, sonst wird das Verfahren mit einer neuen Probe wiederholt. Die Ergebnisse werden in einem genormten Diagramm dargestellt.

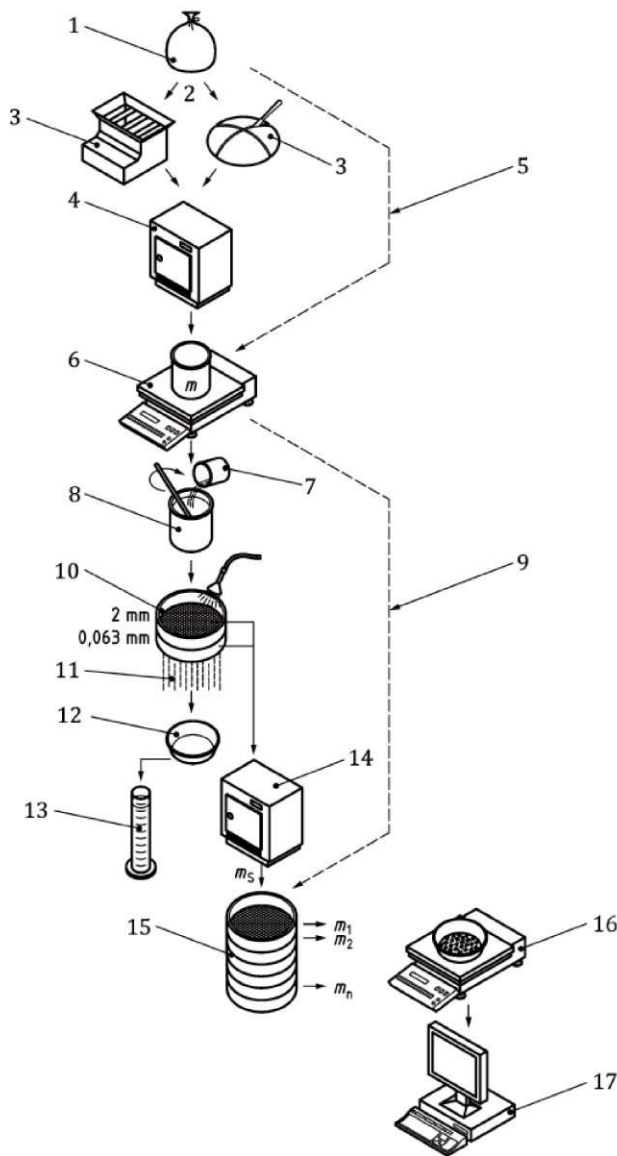


Abb. 5.75 | Ablauf der Siebung nach ÖNORM EN ISO 17892-4

LEGENDE

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| [1] Probe | [10] Fein- / Grobkorntrennung |
| [2] Vorgehen bei trockener Probe | [11] SchlÄmme |
| [3] Probenteilung | [12] Auffangen von <63 µm |
| [4] Trocknung | [13] Sedimentationsanalyse |
| [5] Vorgehen bei feuchter Probe | [14] Trocknen des Rückstands |
| [6] Wägung | [15] Siebung |
| [7] Dispersierungsmittel* | [16] Wägung der Siebrückstände |
| [8] Durchtränken und Mischen | [17] Auswertung |
| [9] Trockensiebung | |

5.6.3 Prüfungsdurchführung

A. Bestimmung der Probemenge

Nach Sichtung und Vermessung des Größtkorns in der Gesamtprobe wurden die daraus resultierenden Probemengen bestimmt, welche anschließend getrocknet und abgewogen wurden. Bei der Vermessung des Größtkorns gilt es zu beachten, dass die Kornform bei den Kiesen oftmals recht ungleichmäßig ausfällt. Zu bemessen ist daher der zweitkleinste Durchmesser, der den Durchgang durch die entsprechende Maschenweite bestimmt. Hierfür wurde ein Messschieber verwendet.

Während der Hauptteil der Proben eine recht feine Körnung aufwies, verfügten einige Lehme über Korngrößen von 30 mm. Daraus ergab sich wiederum eine hohe Varianz der Probemengen; Sie reichten von 150 g bei sehr feinen bis hin zu 4.000 g bei grobkörnigen Lehmen, wie es bei den Proben P10 und P11 der Fall war.



Abb. 5.76 | Nasssiebung



Abb. 5.77 | Vorsiebung im Bottich

B. Abtrennen der Feinkörnung

Für die Nasssiebung wurden die Proben bereits am Vortag in genügend Wasser aufgeschlämmt und manuell vermengt. In den darauffolgenden Tagen wurden die Siebungen durchgeführt. Zuzüglich zum 63- μm -Sieb wurde ein 5-mm-Sieb verwendet, da Ersteres aufgrund seiner feinen Maschenweite empfindlich gegenüber hohem Gewicht und scharfkantiger Körnung ist.

Nach dem anfänglichen Versuch die aufgeschlämmt Proben direkt durch die Siebe zu waschen, etablierte sich vor allen bei den großen Proben (>700 g) die Waschung in Bottichen. Dadurch wurde weniger Flüssigkeit beim Siebdurchgang benötigt. Zusätzlich wurde ein Teigschaber zum Bewegen der Proben auf den Sieben verwendet. Aufgrund der weichen flexiblen Spitze kann die versehentliche Zerreibung der Körnung vermieden werden. Mittels eines Druckpumpzerstäubers konnte zusätzlich mit einem feinen Wasserstrahl gearbeitet werden, welcher sich vor allem beim 63- μm -Sieb als hilfreich erwies.

Die Siebrückstände sowie die -durchgänge wurden gesammelt. Bei den Siebdurchgängen fielen große Mengen schlammartiger Flüssigkeit an, die nicht vermeidbar waren. Daher wurden die Siebdurchgänge einige Zeit - zumeist über Nacht - stehen gelassen, damit sich Schluff und Ton absetzten. Anschließend wurde mit einem Schlauch überschüssiges klares Wasser abgesaugt, um die spätere Trocknungszeit zu verringern. Bei den Siebrückständen konnte dieser Vorgang direkt nach der Sammlung stattfinden.



Abb. 5.78 | Siebrückstände (5 mm und 63 μm) und Siebdurchgang (Anteil)



Abb. 5.79 | Nasssiebung in Schritten

C. Trockensiebung

Nach der Trocknung der Siebrückstände bei 105 °C wurden diese wiederum zur Trockensiebung herangezogen. Die Proben wiesen jedoch aufgrund ihrer Ursprungsmengen und der zum Teil vorherrschenden hohen Feinkörnigkeit oftmals einen sehr kleinen Anteil der Grobkörnigkeit auf, weshalb zwei Arten der Siebung durchgeführt wurden. Für die Proben P10 und P11, welche einen erhöhten Grobkornanteil aufwiesen, wurde eine mechanische Siebung unter der Verwendung eines Siebsatzes mit einem Durchmesser von 40 cm durchgeführt. Die restlichen Proben wurden manuell durch einen Siebsatz mit einem Durchmesser von 20 cm gesiebt. Zusätzlich wurde mit einer weichen Bürste gearbeitet, um potenzielle Feinteile vom Grobkorn zu lösen. Durch das anschließende Abwiegen wurden die Siebrückstände additiv dokumentiert.



Abb. 5.82 | Trocknung (Grobkornanteil)



Abb. 5.81 | Kleiner Siebturm



Abb. 5.80 | Großer Siebturm

5.6.4 Ergebnisse und Auswertung

A. Bestimmung der Probemenge

Die Bestimmung des Größtkorns erwies sich als problematisch, da bei einigen Proben grobe Fehleinschätzungen gemacht wurden. Grund dafür war die Sichtung des Größtkorns, welches in der ganzheitlichen Probe nach eigenem Ermessen herausgesucht wird. Aufgrund der Gesamtheit der Probe scheint dies nicht immer zutreffend zu sein. Deshalb ist es empfehlenswert, tendenziell größere Korngrößen anzunehmen.

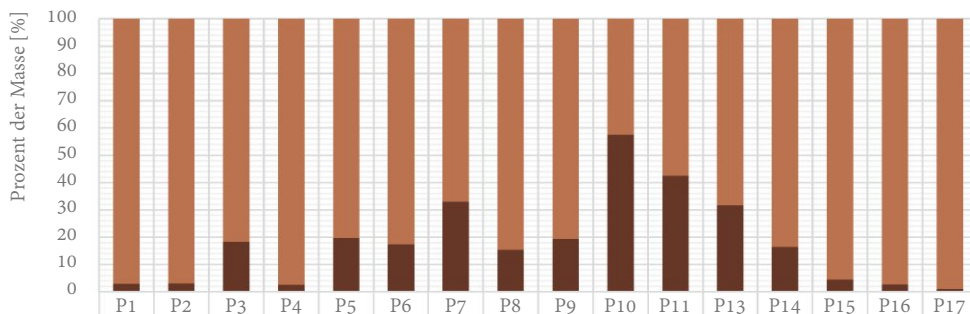
B. Verhältnis von Grob- und Feinkornanteil

Da die Ermittlung des tatsächlichen Größtkorns erst gegen Ende der Prüfung erfolgt, wurden die zu Anfang bestimmten Probemengen im weiteren Verlauf analysiert. Nach der Nasssiebung und anschließenden Trocknung wurde wiederum eine Wiegung der jeweiligen Grob- und Feinkornanteile durchgeführt. Abb. 5.38 zeigt die Verhältnisse innerhalb der Proben bezogen auf ihre prozentualen Anteile.

Es ist erkennbar, dass bei fast allen Proben der Feinkornanteil wesentlich höher ausfällt als der Grobkornanteil. Eine Ausnahme bildet Probe P10, welche knapp 60 Prozent Grobkorn aufweist. Bei insgesamt sechs Proben (P1, P2, P4, P15, P16, P17) liegt der Anteil des Grobkorns deutlich unter 10 Prozent, weshalb normgerecht ausschließlich eine Sedimentationsprobe gemacht werden sollte.

Probe	Geschätztes Größtkorn [mm]	Probemenge [g]	Tatsächliches Größtkorn [mm]
P1	2,00	150,00	3,50
P2	2,00	150,00	4,50
P3	2,00	150,00	3,00
P4	2,00	150,00	10,50
P5	10,00	700,00	15,00
P6	20,00	2000,00	18,50
P7	2,00	150,00	4,00
P8	10,00	700,00	14,00
P9	10,00	700,00	16,00
P10	30,00	4000,00	31,50
P11	30,00	4000,00	34,50
P13	20,00	2000,00	37,00
P14	20,00	2000,00	16,00
P15	5,00	300,00	6,50
P16	5,00	300,00	2,50
P17	2,00	150,00	6,50

Tab. 5.24 | Größtkorn und Probemenge



	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P13	P14	P15	P16	P17
Feinkorn (<63 µm) [%]	97,00	96,93	81,66	97,43	80,29	82,59	66,95	84,64	80,60	42,48	57,54	68,26	83,49	95,50	97,31	99,04
Grobkorn (>63 µm) [%]	3,00	3,07	18,34	2,57	19,71	17,41	33,05	15,36	19,40	57,52	42,46	31,74	16,51	4,50	2,69	0,96

Abb. 5.83 | Prozentuales Verhältnis von Fein- und Grobkorn

Die Probegruppen aus den gleichen Schürfen, jedoch unterschiedlichen Tiefen (P5|P6 , P8|P9 , P15|P16|P17) weisen jeweils eine ähnliche Verteilung von Grob- und Feinkorn auf.

Durch die Ermittlung des Verhältnisses zwischen Fein- und Grobkorn sind bereits Tendenzen ersichtlich, für welchen Baustoff sich das Material eignet. So sind beispielsweise die Proben unter 10 Prozent Grobkornanteil eher ungeeignet für den tragenden Lehmbau. Tendenziell würde aus sehr feinkörnigem Material, je nach vorhandenem Tonanteil und -arten, entweder Tonmehl oder Lehmputz entstehen (abhängig vom Ton- und Schluffanteil). Der Grobkornbereich bei den Proben P7, P13, P11 und P10 macht mindestens 30 Prozent des Materials aus. Tendenziell könnten hieraus tragende Lahmbaustoffe oder Schüttungen entstehen, wobei der Grobkornbereich dafür auch höher ausfallen könnte. Für weitere Erkenntnisse gilt es, die genaue Korngrößenverteilung des Grobkorns zu ermitteln.

C. Korngrößenverteilung im Grobkornbereich

Die grafische Darstellung nach ÖNORM EN ISO 17892-4 ermöglicht es, die Ergebnisse der Korngrößenverteilung ins Verhältnis zu setzen. Die sogenannte Körnungslinie repräsentiert die Siebdurchgänge in Prozent anhand der verwendeten Maschenweiten der Analysesiebe und äußert sich daher in einem Gefälle von Grob- zu Feinkorn. Aufgrund der Bandbreite und Größenordnung der Körnung wird auf der horizontalen Achse eine logarithmische Skalierung verwendet, welche die Darstellung im Feinkornbereich ermöglicht.

Abb. 5.84 zeigt das normgerechte Diagramm gemäß ÖNORM EN ISO 17892-4. Die dargestellte Körnungslinie der Probe P10 verdeutlicht die Problemstellung beim Wegfall der Bestimmung der Korngrößenverteilung im Feinkornbereich, welche schraffiert angedeutet wird. Anzumerken ist, dass Probe P10 den höchsten Grobkornanteil aufweist und daher in der Skalierung des Diagramms gut erkennbar ist. Proben mit einem geringen Grobkornanteil zeichnen sich weniger gut ab, da die eigentliche Kurvenentwicklung im Feinkornbereich liegt.

Zudem ist durch die Auswertung von Lehm im Grobkornbereich keine Bestimmung der Bodenart möglich, was jedoch nicht unbedingt zielführend für die Verwertung im Lehmbau ist.

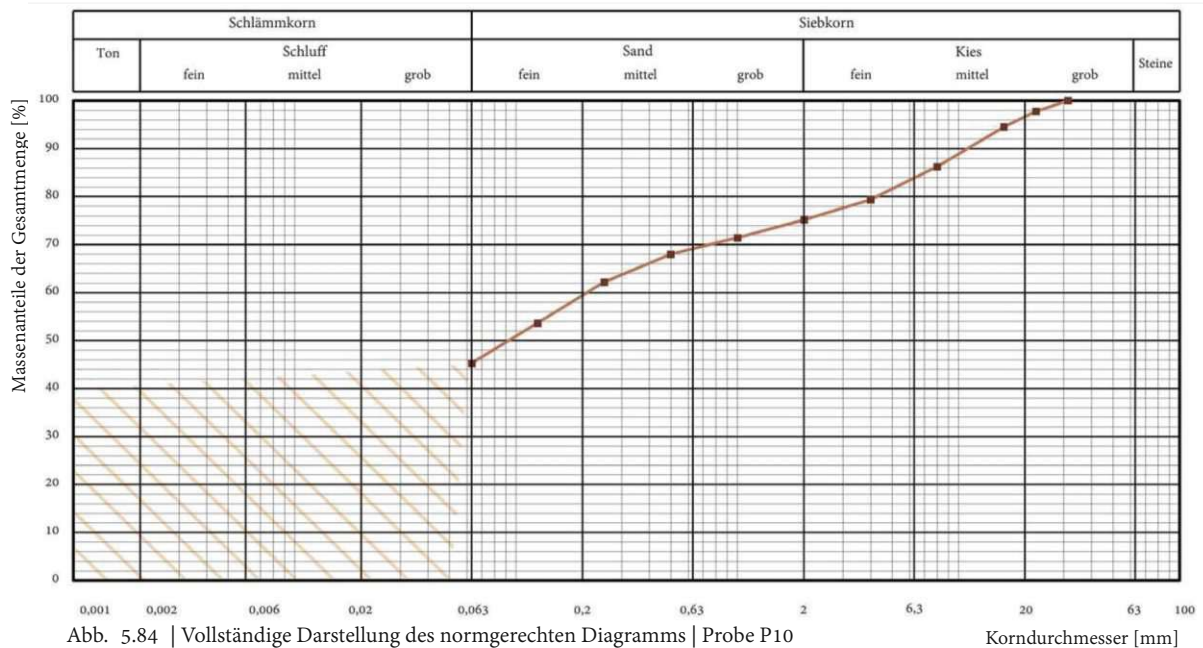


Abb. 5.84 | Vollständige Darstellung des normgerechten Diagramms | Probe P10

Korndurchmesser [mm]

Folgend werden anhand von zwei Beispielen die Erkenntnisse zu den Korngrößenverteilungen erklärt. Grundsätzlich bildet die Ausgangsposition der 63- μm -Grenze den Übergangsbereich zum Feinkornbereich. Wie bereits erläutert, zeichnet sie je nach

Anteil dessen einen entsprechenden Ausgangspunkt ab. Zur besseren Sichtbarkeit der Größenverteilung des Grobkorns, welche in den analysierten Proben immer unter 60 Prozent ausmacht, werden die Diagramme angepasst dargestellt.

Beispiel 1 – Verhältnis Grob- und Feinkornbereich

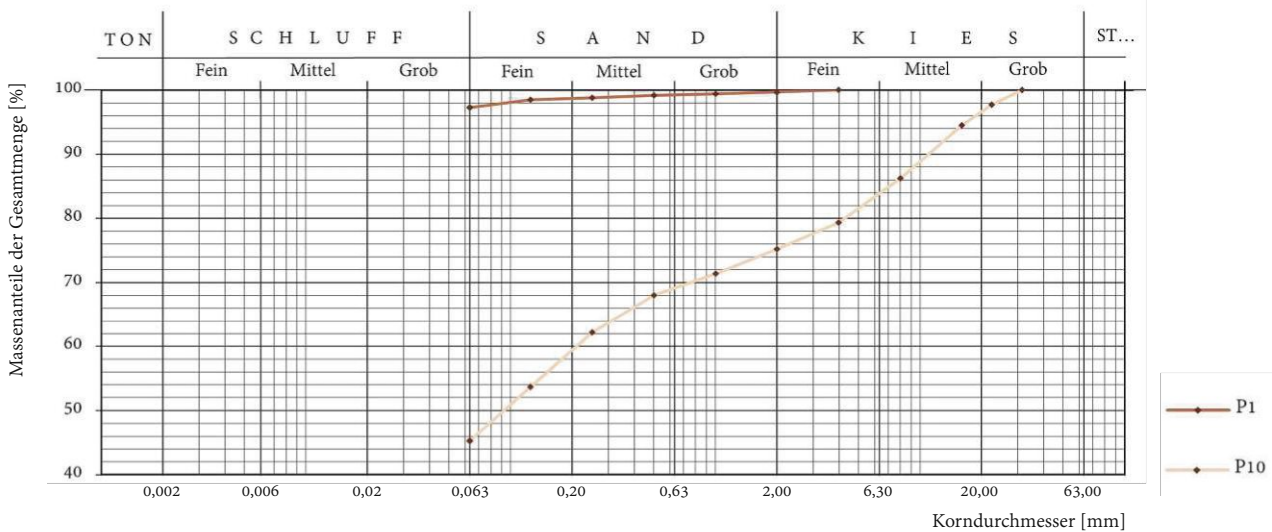


Abb. 5.85 | Körnungslinie P1 und P10

Abb. 5.85 zeigt den Verlauf zweier gegensätzlicher Proben; Während Probe P1 kaum Grobkörnung aufweist, macht diese bei Probe P10 knapp 60 Prozent des Materials aus. Der eigentliche Kurvenverlauf von Probe P1 ist daher im Feinkornbereich zu erwarten. Die Probe weist im Grobkornbereich zudem eine geringere Vielfalt der Körnungen auf. Im Körnungsbild äußert sich dieser Unterschied bei Probe P1 durch einen höheren Feinkornanteil und vereinzelt kleinere Grobkörnung, während es sich bei Probe P10 gegensätzlich dazu verhält.

Für den Lehmbau wäre Probe P1 abhängig von der Bindekraft eher für Putz oder Tonmehl zu verwenden, während das Material der Probe P10 beispielsweise für Stampflehm angedacht werden könnte.

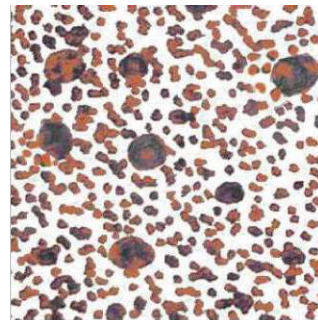


Abb. 5.86 | Körnungsbild P1

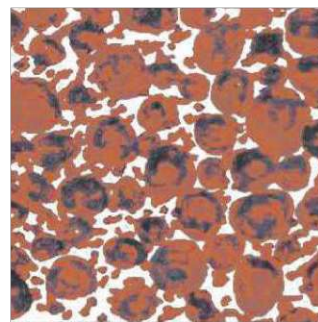


Abb. 5.87 | Körnungsbild P10

Beispiel – Vielfalt der vertretenen Korngrößen

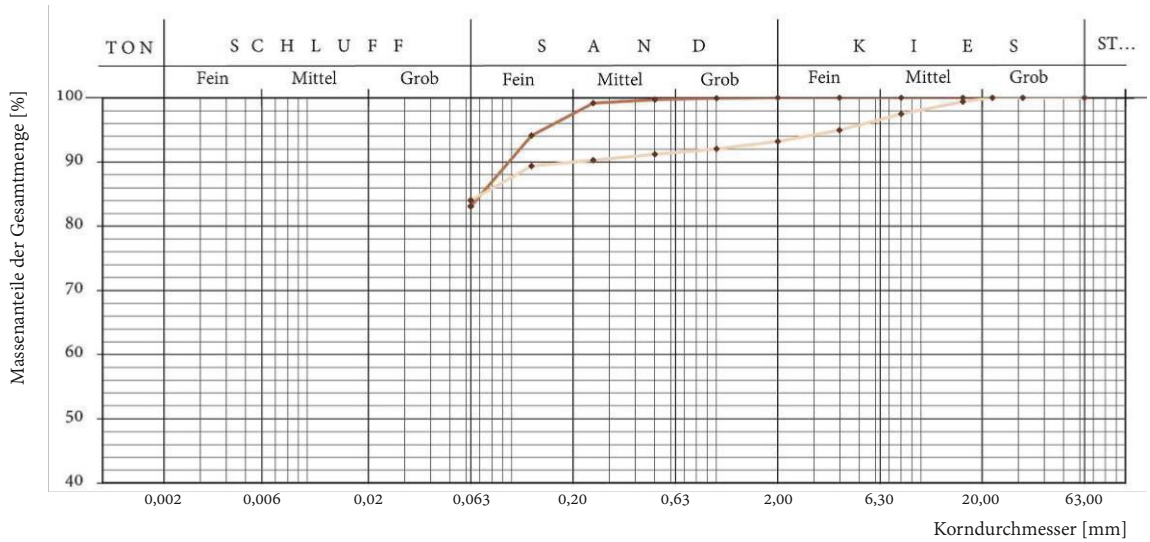


Abb. 5.88 | Körnungslinie P3 und P6

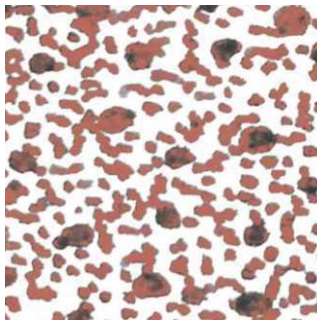


Abb. 5.89 | Körnungsbild P3

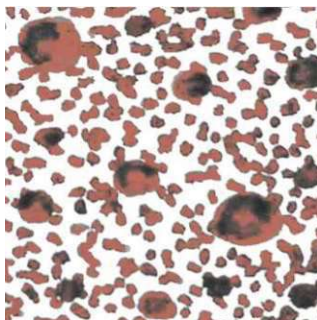


Abb. 5.90 | Körnungsbild P6

Im Vergleich der Proben P3 und P6 ist erkenntlich, dass bei gleichen Feinkornanteil unterschiedliche Korngrößen vertreten sein können. Bei der Probe P6 fällt das Körnungsbild vielfältiger aus mit variierenden Körnungen, während der Grobkornbereich von Probe P3 hauptsächlich aus Feinsand besteht.

Für den Lehm bau wäre daraus zu schließen, dass Probe P3 durch Abmagerung einen Feinputz bilden könnte. Probe P6 müsste hierfür zunächst gesiebt werden, um Korngrößen >2 mm auszuschließen.

D. Auswertung für die Klassifizierung

Im Rahmen der Auswertung als Ergänzung zur Bindekraftprüfung ist es notwendig die Grobkornanteile näher aufzuschlüsseln. Ziel ist die Bestimmung des Grobkornanteils im Bereich der Korngrößen >2 mm, da diese nicht in der Bindekraftprüfung erfasst werden. Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1 sind Körnungen >2 mm Kies (Gr) zuzuordnen.

Aus Abb. 5.91 ist ersichtlich, dass die Anteile >2 mm bei allen Proben wesentlich geringer als der gesamte Grobkornanteil ausfallen oder zum Teil nicht vorhan-

den sind. Der Sandanteil (Feinsand fSa, Mittelsand mSa, Grobsand cSa) macht bei allen Proben die Hauptmenge des Grobkorns aus.

Probe P10 weist einen verhältnismäßig hohen Kiesanteil von 25 Prozent auf, gefolgt von den Proben P11 und P13, welche sich den 20 Prozent annähern. Interessant ist zudem das Verhältnis der Gruppenproben P5 und P6. Während die Probe P6 aus -1,3 m Tiefe einen wesentlich höheren Kiesanteil aufweist, ist dieser bei der in -0,5 m Tiefe gewonnenen Probe P5 kaum vorhanden.

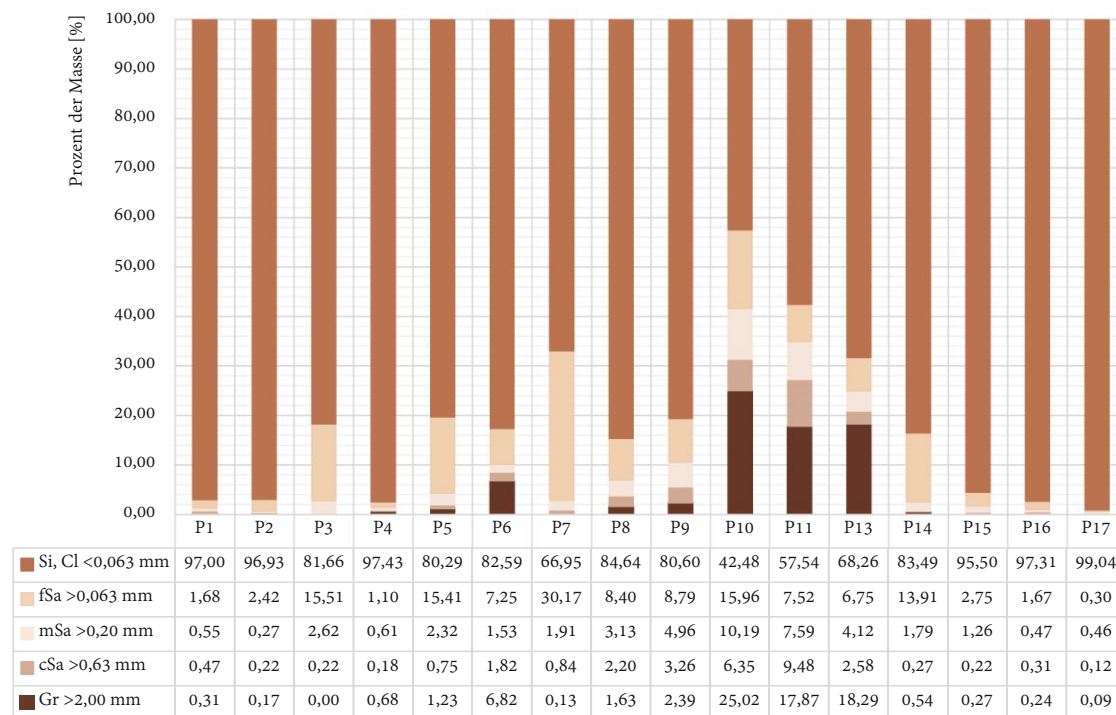


Abb. 5.91 | Aufschlüsselung des Grobkornanteils

5.6.5 Diskussion zur Prüfung

Die Prüfung zur Bestimmung der Korngrößenverteilung generiert vertiefende Erkenntnisse zu dem vorliegenden Material und ist nach eigener Einschätzung ein hilfreiches Verfahren der Eignungsprüfung von Baulehm. Zwar ist sie nicht als Ausschlusskriterium anzusehen, jedoch stellt sie eine relevante Ergänzung zur Bindekraftprüfung dar. Sie kann Aussagen zur Gültigkeit der Bindekraft in Bezug auf die Gesamtprobe geben, indem sie den Grobkornbereich prozentual bestimmt. Auch das Zusammenspiel der Ergebnisse aus der Bindekraftprüfung und der Bestimmung der Korngrößenverteilung könnte hinsichtlich der Effizienz in Aufbereitungsprozessen sowie der benötigten Zuschlagstoffe aufschlussreich sein.

Die Durchführung der Prüfung war im Allgemeinen gut zu bewerkstelligen, dennoch traten einige Herausforderungen auf.

Zu Beginn ist anzumerken, dass wie bereits beschrieben, die Bestimmung der Probemenge tendenziell größer gewählt werden sollte. Insbesondere bei Proben mit einem Größtkorn <5 mm kann dies positiven Einfluss auf den späteren Verlauf nehmen.

Durch die Nasssiebung kann sich die Bestimmung der Korngrößenverteilung recht zeitaufwändig gestalten. Bei feinkörnigen Proben fällt eine überschaubare Probemenge von 150 g oder 300 g an, welche in der anfänglichen Nasssiebung zur Abtrennung der Feinkornanteile gut durchführbar ist. Bei Probemengen von 4 kg erwies sich das Verfahren als zeitintensiv. Die Durchführung dauerte bei einigen Proben mehrere Stunden an und bedurfte je nach Feinkornanteil einen ganzen Tag. Zusätzlich fiel extrem viel Flüssigkeit an, deren Reduktion durch Absetzen und Absaugen ebenfalls einige Zeit beanspruchte. Dennoch stellte die angefallene Menge der Suspension eine Herausforderung für die Trocknung dar. Im Trocknungssofen herrschte durch den hohen Wasseranteil eine erhöhte Luftfeuchtigkeit (>80 %), weshalb die Proben viel Zeit zum Trocknen benötigten. Jedoch ist anzumerken, dass die labortechnische Ausstattung in diesen Aspekt stark einspielt. In der Bodenmechanik ist dies ein gängiges Verfahren und entsprechenden Laboren besser zu bewerkstelligen.

In der anschließenden Trockensiebung fielen vorrangig bei den kleinen Probemengen sehr geringe Grobkornanteile an. Einige wiesen Gesamtgewichte von unter 5 g auf, was vor allem hinsichtlich des erlaubten Siebverlustes von 0,1 Prozent eine Herausforderung darstellte. Dennoch waren diese entgegen der Erwartung einhaltbar. Hierfür bedurfte es Analysesiebe mit kleinerem Durchmesser und präzises Vorgehen, wobei zudem eine manuelle Siebung oder mit regulierbarem Rüttler zu präferieren ist.

In Bezug auf die Ergebnisauswertung ist aktuell nicht der richtige Rahmen für eine übersichtliche Darstellung bei Ausschluss der Korngrößenverteilung im Feinbereich gegeben. Nach eigener Einschätzung sollte eine Kombination des Verhältnisses von Grob- und Feinkorn in Relation zur Korngrößenverteilung >63 μm entwickelt werden.

Bei sehr geringen Grobkornanteil ist der Aufwand der Versuchsdurchführung in Vergleich zum daraus resultierenden Ergebnis nicht gerechtfertigt. Bei Proben mit weniger als 10 Prozent Grobkornanteil könnte davon ausgegangen werden, dass der Anfall von Körnung >2 mm eher unwahrscheinlich ist oder so gering, dass es kaum bis wenig Einfluss auf die Eigenschaften des Lehms nimmt. Nach *ÖNORM EN ISO 17892* in dem Fall nur eine Sedimentation durchzuführen ohne Aufschlüsselung des Grobkornbereichs, was diese Behauptung befürwortet.

Zuletzt ist die Durchführung der Sedimentation im Rahmen der Eignungsprüfung von Baulehm zu hinterfragen. Der fehlende Bezug zwischen Bindekraft und Tonanteil (<2 μm) zieht die Frage nach sich, ob die Bestimmung der Korngrößenverteilung aufgrund der geringen Größenordnungsspanne von Schluff notwendig ist. Einleuchtend ist die Anführung im Aspekt der Gesamtheit der Prüfung sowie deren Ursprungs. In der Bodenmechanik ist das Verfahren aufschlussreich zum Verhalten des Untergrunds, während es im Lehmabau keine relevante Aussagekraft zu besitzen scheint. Die Bestimmung der ganzheitlichen Körnungslinie würde Sinn machen, wenn Vergleichswerte in Form von ‚Idealkurven‘ oder definierte Bereiche zur Verfügung stünden. Im Lehmabau gibt es derzeit noch keine offiziellen Ergebnisse oder Richtwerte hierzu.



Abb. 5.92 | Siebdurchgang getrocknet (Feinkornanteil)

5.6.6 Alternativen

5.6.6.1 Nasssiebung

In der Mineralogie wird im Zuge der Gesamtmineral- und Tonmineralanalyse die ganzheitliche Nasssiebung von Bodenproben angewendet (siehe Kap. 5.7). Die Proben fallen entsprechend kleiner aus und umfassen Mengen von beispielsweise 50 g bis 100 g.

A. Durchführung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden im Kontext der Gesamtmineral- und Tonmineralanalyse bei zwei Proben, P5 und P17, durch Nasssiebung die Korngrößenverteilung bestimmt. Die Proben wurden zunächst grob zerkleinert und anschließend eingewogen. Probe P17 wies eine feine Körnung auf und wurde daher auf 50 g festgelegt, während Probe P5 gröbere Körnung enthielt, weshalb 100 g abgewogen wurden. Die Proben befanden sich zum Zeitpunkt der Einwaage im luftgetrockneten Zustand. Anschließend wurde das Material mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2) behandelt, welches organische Verbindungen im Material löste. Die Behandlung dauerte über einen längeren Zeitraum an, da die Reaktion in der Regel zeitverzögert und langsam abläuft. Mit dem Abschluss der sichtbaren Reaktion (Blasenbildung)

konnte die Probe daraufhin ausgekocht werden, um die organischen Bestandteile zu entfernen. Zur Dispersion wurde sie anschließend mit deionisiertem Wasser verdünnt und in ein Ultraschallbad gegeben. Für die anschließende Siebung wurden Analysesiebe mit den Maschenweiten $20\ \mu m$ | $63\ \mu m$ | $200\ \mu m$ | $630\ \mu m$ | $2\ mm$ verwendet. Die Siebung wurde mit mechanischem Rütteln unterstützt, wobei die Frequenz dieser regulierbar war. Die unterste Pfanne des Siebturms wies eine leichte Abschrägung auf und erlaubte somit der anfallenden Flüssigkeit, über den angeschlossenen Schlauch in einen Auffangbehälter geführt zu werden. Zusätzlich wurden jeweils eine Spritzflasche und ein Teigschaber zur Durchführung herangezogen, wobei der Teigschaber zum Bewegen der Probe auf den Sieben diente. Er hat gegenüber einem Pinsel oder einer Bürste den Vorteil, kein Material aufzunehmen, während die weiche Spitze bei richtiger Anwendung kein Risiko der Zerreibung darstellt.

Die Siebrückstände wurden anschließend im Trocknungsschrank bei $105^\circ\ C$ eingestellt und getrocknet. Das Auswiegen der Kornanteile fand nach der Abkühlung im Exkavator statt.



Abb. 5.93 | Siebrückstände vor und nach der Trocknung

Nach dem Absetzen der Feinkornanteile des Siebdurchgangs wurde die übrige klare Flüssigkeit abgesaugt, um überschüssige gelöste Stoffe zu entfernen. Im Anschluss wurden die Proben erneut mit deionisiertem Wasser verdünnt und mit einem Magnetrührer vermischt. Danach wurden sie im Ultraschallbad zur Lösung möglicher Konglomerate eingestellt. Daraufhin wurden 50 ml der Probe abgemessen und zusätzlich mit 5 g Natriumpolyphosphat (1:200 ml Verdünnung) als Dispersionsmittel versehen, bevor sie im Sedigraph analysiert wurden.

B. Sedigraph

Der Sedigraph (Micromeritics Instrument Corporation, SediGraph III) führt eine Sedimentationsanalyse durch. Diese findet allerdings in wesentlich kleineren Dimensionen statt, weshalb die Messungen wesentlich zeiteffizienter ablaufen. So kann innerhalb von 30 Minuten pro Probe die Korngrößenverteilung im Feinkornbereich bestimmt werden.

Die Probe wird automatisch in die Messzelle des Sedigraphen geführt, wo sie mit Röntgenstrahlung innerhalb eines definierten Bereichs gemessen wird. Innerhalb der Messzelle sinken die Partikel unterschiedlich schnell ab, was sich im Durchgang der Röntgenstrahlung in Verhältnis zur Zeit bemerkbar macht. Die Auswertung erfolgt nach dem Stokes'schen Gesetz.⁹⁶



Abb. 5.96 | Sedigraph

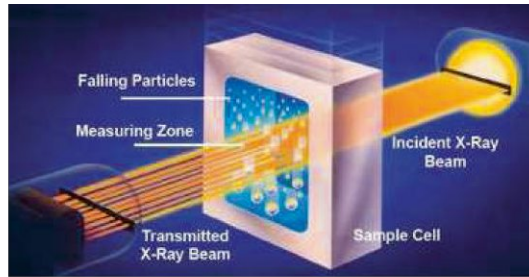


Abb. 5.94 | Funktionsweise, Sedigraph

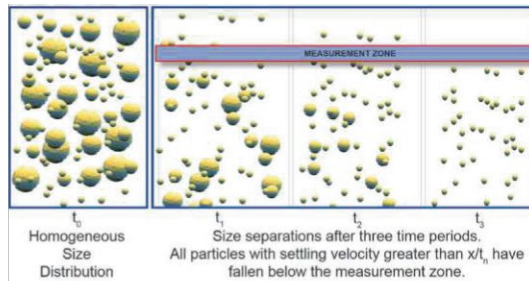


Abb. 5.95 | Messung, Sedigraph

C. Vergleich der Ergebnisse

Zum Vergleich wurden bei beiden Proben die Ergebnisse der Trockensiebung herangezogen und in einem Diagramm dargestellt.

Im Vergleich der Siebungen ist bei Probe P5 eine starke Abweichung von etwa 15 Prozent an der 63- μm -Grenze zwischen Grobkorn- und Feinkornbereich zu verzeichnen. Die Unterschiede in der Korngrößenverteilung im Grobkornbereich liegen weitergehend unter 10 Prozent, während sich der Linienvverlauf ungefähr parallel hält. Im Vergleich des Grobkornbereichs der Probe P17 verlaufen die Körnungslinien fast deckungsgleich.

Der Verlauf der beiden Proben im Feinkornbereich fällt sehr unterschiedlich aus. Während Probe P17 einen sehr hohen Anteil von knapp 50 Prozent $< 2 \mu\text{m}$ aufweist, liegt dieser bei Probe P5 bei etwa 20 Prozent. Zwar sind daraus keine Schlussfolgerungen auf die Bindekraft zu ziehen, jedoch lässt der hohe Unterschied doch die Vermutung zu, dass es sich bei Probe P17 um einen sehr fetten Lehm handelt. Dies wäre mit der Bindekraftprüfung nachzuweisen.

⁹⁶ vgl. micromeritics, The SediGraph Method of Particle Sizing

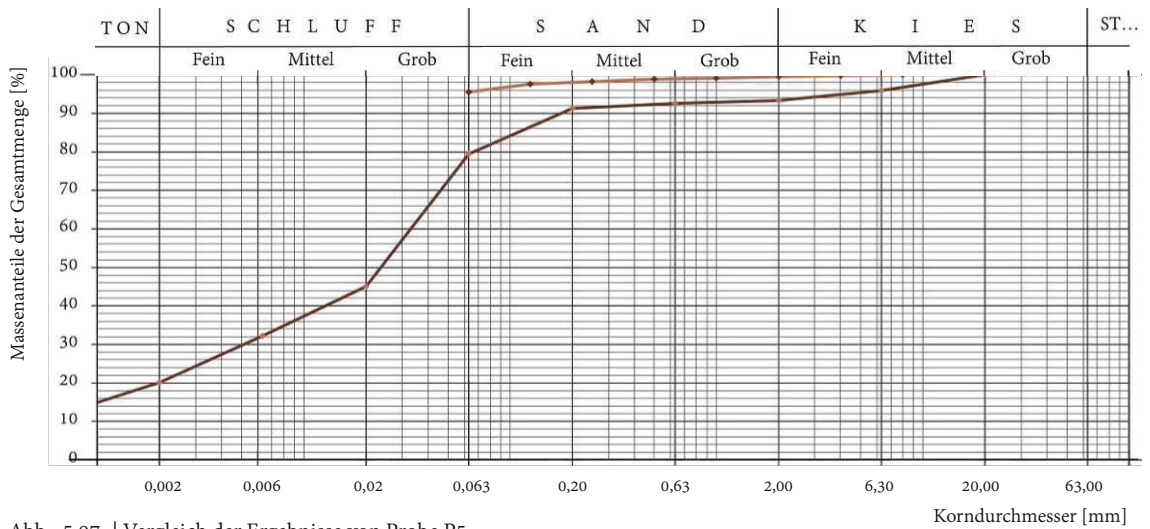


Abb. 5.97 | Vergleich der Ergebnisse von Probe P5

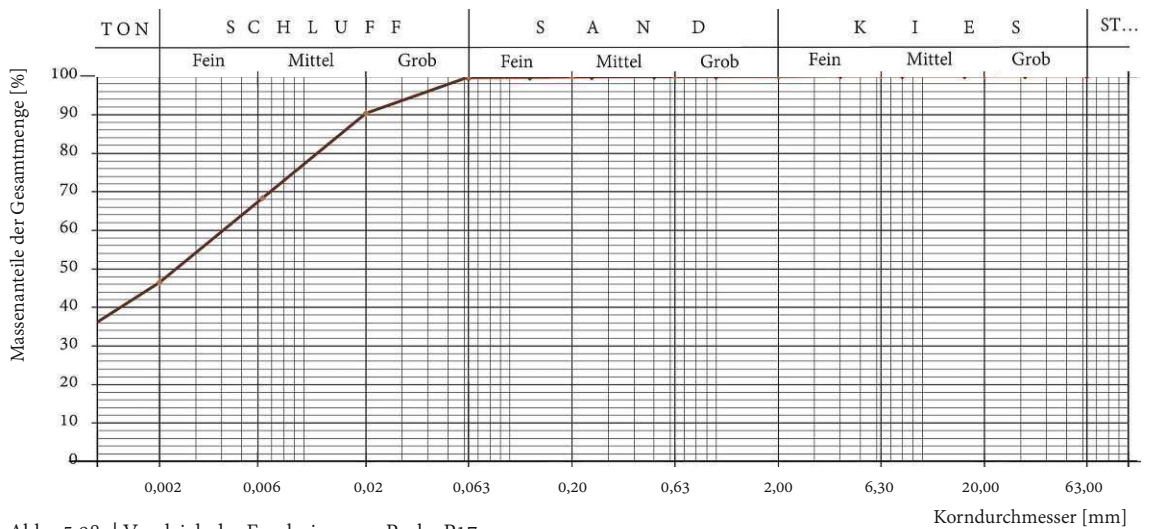


Abb. 5.98 | Vergleich der Ergebnisse von Probe P17

D. Auswertung

Die Unterschiede der beiden Siebungen lassen sich nicht auf eine eindeutige Ursache zurückführen. Die Probemengen und deren Aufbereitung fielen in den beiden Verfahren sehr unterschiedlich aus, wodurch die entstandenen Differenzen nicht nachvollziehbar sind.

Im Allgemeinen gestaltete sich der Prozess der Nasssiebung aufgrund reduzierter Arbeitsschritte effizienter. Auf das Lösen von organischen Bestandteilen kann in der Regel verzichtet werden, da dies Teil der Routineaufbereitung für die Gesamtmineralanalyse war. Auch im Labor von den ZRS Ingenieure GmbH

wird nach eigenen Angaben die Nasssiebung durchgeführt, da sich diese besser für Lehmproben eigne.

Die Auswertung der Ergebnisse im Feinkornbereich weist nach Berücksichtigung der Argumentation gegen eine Sedimentationsprobe eingeschränkte Erkenntnisse im Lehmbebau auf. Es sind Tendenzen durch die Bestimmung des Tonanteils erkenntlich. Diese sind dennoch nicht so aussagekräftig wie die Ermittlung der Bindekraft, welche zusätzlich zum Tongehalt auch die enthaltenen Tonarten einbezieht. Daher ist der Aufwand einer Sedimentationsanalyse durch die Aräometer-Methode nicht gerechtfertigt.

5.6.6.2 Dynamische Bildanalyse

Einige Proben wiesen sehr geringe Grobanteile auf, deren Massen kleiner als 5 g ausfielen. Dabei stellte sich nach der Trocknung die Herausforderung die Korngrößenverteilung erfolgreich zu ermitteln. Hinterfragt wurde die Methode der Trockensiebung hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit eines hohen Siebverlustes und der damit ungünstigen Prüfungsdurchführung. Daher wurde vor der Trockensiebung bei einigen Proben eine dynamische Bildanalyse durchgeführt.

A. Durchführung

Die Proben P1 – P19 sowie P15 – P17 wurden aufgrund ihrer geringen Mengen und sowie der visuell beurteilbarer Körnung zur dynamischen Bildanalyse herangezogen. Hierfür wurden die Proben im Zwischenzustand des eigentlichen Prüfverfahrens zur Bestimmung der Korngrößenverteilung nach dem Abtrennen der Feinkornanteile und der anschließenden Trocknung verwendet.



Abb. 5.101 | Bildaufnahme

B. Dynamische Bildanalyse

Der Camsizer (Microtrac Retsch GmbH, Camsizer 3D) hat einen Messbereich von 20 μm bis 30 mm und eignet sich daher für die Grobkornanalyse der kleineren Proben. Diese werden in den Trichter des Gerätes eingefüllt und anschließend maschinell über eine Förderrinne mit flexiblen Vibrationsstufen in angepassten Mengen zur Messöffnung geführt. Dort geht die Körnung in einen freien Fall über. Die an die Korngrößen angepasste Dosierung durch die Vibration der Rinne vermeidet Überlagerungen der einzelnen Körner im weiteren Verfahren. Während des kontinuierlichen Falls der Probe durch die Messöffnung nehmen zwei Kameras (9-Megapixel-Zoom-Kamera, 5-Megapixel-Basic-Kamera) mit einer Bildrate von bis zu 250 Bildern pro Sekunde das Material auf. Durch die unterschiedliche Auflösung der beiden Kameras ist die Aufnahme unterschiedlicher Partikelgrößen möglich. Nach Hersteller:innenangabe wird durch die dynamische Bildverfolgung von jedem Partikel bis zu 30 Bilder während des Falls aufgenommen. Aufgrund der Druckluftansaugung können auch kleine leichte Partikel ausgewertet werden.

Das entsprechende Softwareprogramm wertet die Fotos nach den einzelnen Korngrößen aus. Zudem ist die Kombination mit Siebanalysen (>30 mm) möglich sowie die Auswertung der Kornformen.⁹⁷

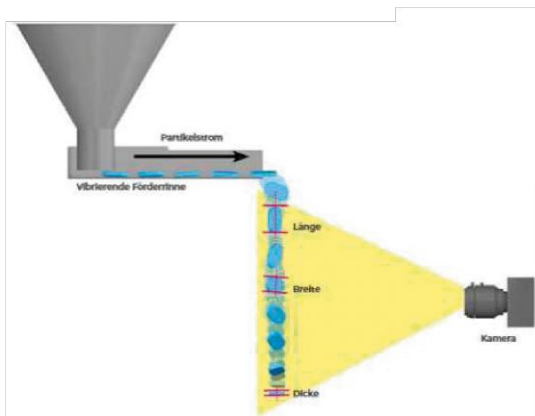


Abb. 5.99 | Camsizer Funktionsweise



Abb. 5.100 | Camsizer

⁹⁷ vgl. Produktprospekt: Camsizer 3D – Partikelgrößen- und Partikelformanalysator



Abb. 5.102 | Camsizer, Förderrinne

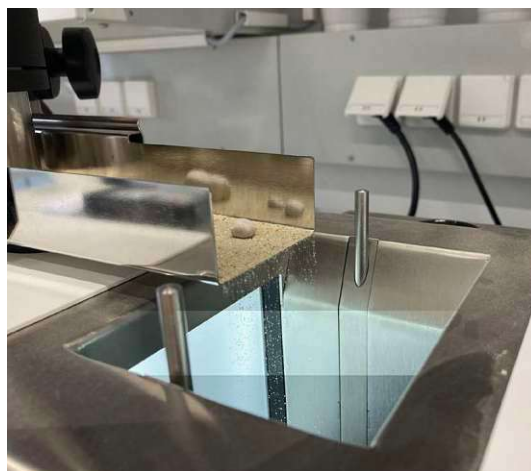


Abb. 5.103 | Camsizer, Dynamische Bildanalyse

C. Messung

Die Messung wurde im 2D-Modus ausgeführt, da sich diese nach Hersteller:innenangabe für Naturprodukte mit unregelmäßigen Partikeln eignet. Im Softwareprogramm sind dementsprechend Parameter einzustellen, wie beispielsweise die Flächendichte, welche bei feinem Material kleinstmöglich festgelegt werden sollte, um besagte Überlagerungen der Körnungen zu vermeiden. Unterstützend dazu kann die Vibration der Rinne für die Startzeit sowie die Minimal- und Maximalwerte dem Material angepasst werden, womit der Einfall zu großer Probemengen in die Messöffnung ebenfalls vermieden werden kann. Die Probe wurde je nach Menge in den Trichter oder direkt auf die Förderrinne gegeben. Die Höheneinstellung des Trichters reguliert bei größeren Mengen zusätzlich die Materialmenge auf der Rinne. Die weitere Messung erfolgte rein maschinell und bedurfte in der Regel keiner Eingriffe. Aufgrund des feinen Probematerials erwiesen sich jedoch folgende Interventionen als hilfreich bei der Messung:

- Während des Transports auf der Rinne wurden gegebenenfalls ‚Glimmerinseln‘, welche sich im Trocknungsprozess gebildet haben, mit einem Pinsel aufgelöst.
- Bei einem hohen Kiesanteil wurde darauf geachtet, dass die Größtkörner zeitlich minimal versetzt fallen, damit die festgelegte Bilddicke nicht überschritten wurde, was deren Ausschluss aus der Messung zur Folge gehabt hätte.
- Zusätzlich wurde gegen Ende der Messung jeweils die dünne Schicht von Glimmer- und Feinanteilen, welche sich am Boden der Rinne festsetzte, mit einem Pinsel vorsichtig in Richtung Messöffnung befördert.

D. Vergleich

Im Vergleich der Ergebnisse der Trockensiebung zur Auswertung der dynamischen Bildanalyse sind selten bis kaum Abweichungen zu verzeichnen. Die maximalen Differenzen liegen immer unter 5 Prozent.

Es ist jedoch erkennbar, dass bei kleineren Probemengen eine höhere Übereinstimmung der Messwerte vorherrscht. Probe P5 wies mehr als 300 g auf, womit offenbar stärkere Abweichungen einhergingen, da die Körnungslinien im Verlauf kaum Annäherungen zeigen. Dies bildete sich auch in der Zeit der Messung ab, welche im Vergleich enorm hoch ausfiel.

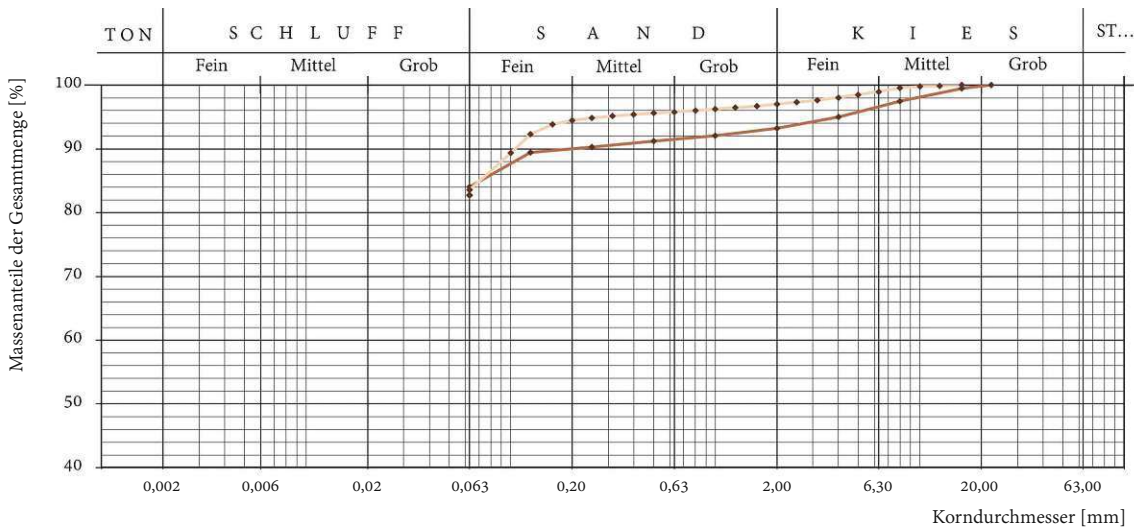


Abb. 5.104 | Körnungslinie, Vergleich Camsizer und Siebung, P6

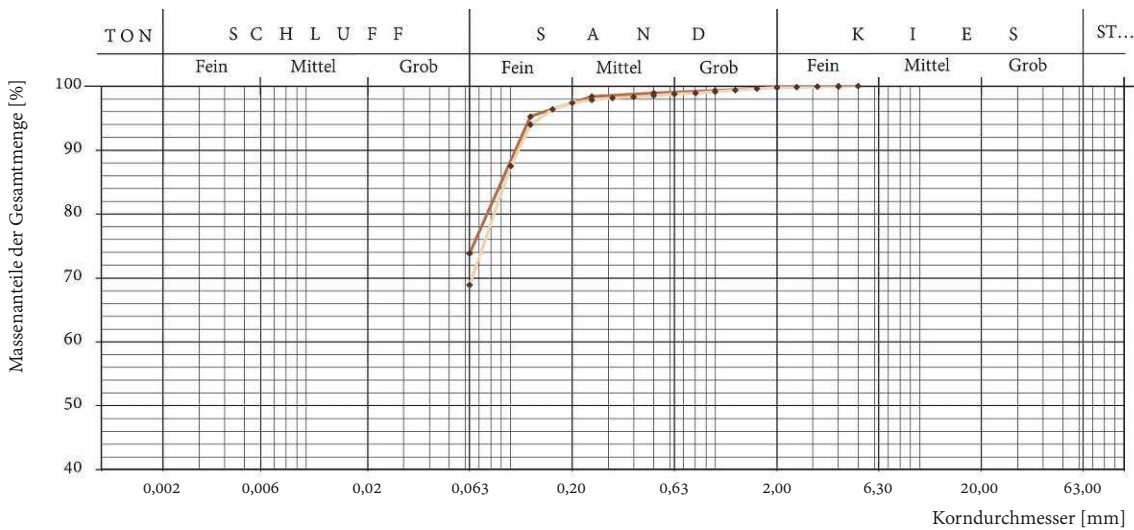


Abb. 5.105 | Körnungslinie, Vergleich Camsizer und Siebung, P7

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P15	P16	P17
Abweichung max.	-	-	~5 %	-	~3 %	~5 %	~5 %	~3%	~5 %	-	~2 %	-
Abweichung ins.	kaum	kaum	wenig	kaum	wenig	stark	wenig	wenig	etwas	kaum	wenig	kaum
Probemenge [g]	4,5	4,6	27,5	3,9	137,4	345,0	49,1	107,3	135,4	13,4	8,0	1,4
Messung [min]	6	6	23	5	177	308	66	91	87	17	14	2

Tab. 5.25 | Abweichungen zwischen Siebung und Camsizer

E. Auswertung

Durch die hohe Übereinstimmung der Messwerte ist die dynamische Bildanalyse eine Möglichkeit die Siebanalyse im Bereich kleiner Probemengen und einem Größtkorn von 3 mm einzusetzen.

Insbesondere bei den kleinen Probemengen erwies sich die Messung als zeitsparend, da deren Auswertung innerhalb weniger Minuten erfolgte. Materialverlust, wie es bei der Siebanalyse vorkommt, konnte zudem verhindert werden. Größere Probemengen im Feinbereich bedürfen jedoch mehrerer Stunden Messungszeit und liefern ungenauere Ergebnisse.

Daher wäre es erstrebenswert zu überprüfen, ob bei größeren Probemengen Teilproben zur Auswertung ausreichen, um ein aussagekräftiges und vergleichbares Ergebnis zu erzielen.

Vorstellbar wäre zudem, dass bei der Abtrennung der Feinkornanteile durch die Nasssiebung

die Probe bereits in zwei Teilproben nach Größe aufgeteilt werden könnte. Da bei diesem Arbeitsschritt grundsätzlich mindestens zwei Siebe mit den Maschenweiten von 63 μm und 0,5 - 1 mm verwendet werden, würde die Probe bereits grob unterteilt werden. Dadurch könnten möglicherweise präzisere und vor allem schnellere Messungen durch angepasste Auswertungseinstellungen durchgeführt werden. Durch die Softwarefunktion der Zusammenführung von Teilproben wäre eine gesamtheitliche Auswertung möglich.

Im Allgemeinen ist darauf hinzuweisen, dass die Methode der dynamischen Bildanalyse nicht genormt ist. Sie entspricht jedoch dem Stand der Technik und sollte daher als Alternative näher erforscht und einbezogen werden. Sie bietet Potenzial für Aufwand- und Zeiteinsparungen im Prüfverfahren.



Abb. 5.106 | Siebrückstand (Grobkornanteil)

5.7 Gesamtmineral- und Tonmineralanalyse



Zielstellung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde zum besseren Verständnis der Materialität Lehm anhand von vier ausgewählten Proben eine Gesamtmineral- und Tonmineralanalyse durchgeführt und ausgewertet. Die daraus gewonnen Erkenntnisse waren vor allem für die Ergebnisauswertung sowie die Aufklärung zu Arbeitsschritten und Vorgehensweisen der vorhergehenden Prüfungen wertvoll.

Die Tonmineral- und Gesamtmineralanalyse bestimmen Minerale auf Mikrometerebene und ermöglichen eine genaue Unterscheidung von bindigen und nichtbindigen Bestandteilen. Insbesondere die Identifikation und Quantifizierung von Zwei- und Dreischichttonmineralen ist für den Lehmbau wertvoll. Damit können bestimmte Eigenschaften des Materials prognostiziert oder nachvollzogen werden.

5.7.1 Theoretischer Hintergrund

Die Gesamtmineralanalyse stammt aus der Mineralogie, während die Tonmineralanalyse ihren Ursprung in der Tonmineralogie hat, was eine Zweigdisziplin der Mineralogie und Geologie darstellt. Beide Methoden analysieren Bodenbestandteile im Mikrometerbereich, wobei die Tonmineralanalyse einen maximalen Grenzwert der Bestandteile von 2 µm hat. Hinsichtlich der Begrifflichkeiten ist es wichtig zu unterscheiden:

- **Ton** ist die Zusammensetzung von nichtbindigen und bindigen Mineralen und verhält sich bei Wasserzugabe plastisch. Umgangssprachlich wird er als Lehm bezeichnet.

- **Tonfraktion** beschreibt die Bodenbestandteile der Korngrößenklasse <2 µm und umfasst sowohl nichtbindige als auch bindige Minerale.
- **Tonminerale** sind eine chemische bzw. mineralogische Gruppe der Schichtsilikate, welche sich durch ihr Bindekraft auszeichnen. Sie weisen Korngrößen von etwa 0,1 bis in der Regel 2 µm auf, wobei Ausnahmen bis zu 4 µm reichen können.

(Mehr Informationen zu Tonminerale siehe Kap. 3)

5.7.2 Prüfmethodik

Arbeitsschritt	Ort	Kooperation
Gesamtmineral- und Tonmineralanalyse	Labor	Institut für Angewandte Geologie, BOKU (Ao.Univ. Prof.i.R. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Franz Ottner)
Zeitlicher Aufwand		Geräte und Materialien
Durchführung	Ca. 3 Wochen	Röntgendiffraktometer Ultraschallbecken Trocknungsöfen Laborausstattung eines mineralogischen Labors

Weder die Gesamtmineralanalyse noch die Tonmineralanalyse sind genormte Verfahren und werden daher im Rahmen der Durchführung beschrieben.

Durch die Gesamtmineralanalyse kann eine Mineralbestimmung sowie eine semiquantitative Auswertung dieser stattfinden. Für die Analyse wird die gesamte Probe herangezogen, weshalb vorwiegend größere Minerale aus dem Schluffanteil in die Auswertung einfließen und damit eher die nicht bindigen Minerale eines Lehms.

Bei der Tonmineralanalyse werden Minerale <2 µm untersucht, wobei es sich hauptsächlich um Tonminerale handelt. Die Identifikation der Tonminerale wird durch

unterschiedliche Behandlungsschritte der Probe gewährleistet und inkludiert eine semiquantitative Auswertung dieser.

Die Verfahren unterscheiden sich signifikant in der Aufbereitung der Proben. Die Gesamtmineralanalyse weist einen wesentlich geringeren Aufwand auf als die Tonmineralanalyse, welche recht komplexe und zeitintensive Behandlungen erfordert. Beide Analysen werden durch Röntgendiffraktometrie ausgewertet, was ein zerstörungsfreies Verfahren zur strukturellen Auswertung des vorliegenden Bodenmaterials darstellt.

Röntgendiffraktometrie

EXKURS

Funktionsweise des Röntgendiffraktometers
Röntgenstrahlung ist elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 10 nm bis 5 pm.⁹⁸ Durch die kurzen Wellen dringen sie, anders als Licht, in Nanostrukturen ein.

Die Erzeugung von der Strahlung im Röntgendiffraktometer findet in der Röntgenröhre statt. Diese beinhaltet einen gewundenen Wolframdraht, welcher aus dem zugeführten Strom eine Elektronenwolke bildet, wodurch eine Beschleunigungsspannung zwischen Kathode und Anode entsteht. Durch die Spannung entsteht ein Elektronenstrahl, welcher bei Auftreffen auf der Anode einen Elektronenaustausch bewirkt. Dadurch wird Energie in Form von Röntgenstrahlung und Wärme freigesetzt, wobei erstere weniger als 1 Prozent ausmacht. Das Anodenmaterial ist für die Wellenlänge der Röntgenstrahlung verantwortlich.⁹⁹ Beim verwendeten Röntgendiffraktometer (Panalytical X'Pert Pro MPD Diffraktometer) besteht diese aus Kupfer (Cu) und generiert eine Wellenlänge von 1,54 Å.

Im Röntgendiffraktometer wird die erzeugte Strahlung im Winkel von 2° bis 70° auf das Probematerial gelenkt. Dort wird sie reflektiert und auf den Detektor gestrahlt, welcher sich auf gegenüberliegender Seite im gleichen Winkel zur Probe befindet. Anhand der dort auftretenden Strahlung wird das Probematerial nach dem Bragg'schen Gleichung ausgewertet.

Das Röntgendiffraktometer bestrahlt die Probe. Diese Strahlung wird von den Mineralen reflektiert. Anders als Licht dringt Röntgenstrahlung aufgrund ihrer Wellenlänge bis in die Netzebene von Mineralkristallen ein und wird daher auf unterschiedlichen Ebenen reflektiert. Die Netzebene bezeichnet hypothetische Ebenen innerhalb eines Kristallgitters, die durch die Anordnung von Atomen und Ionen bestimmt ist. Der Abstand dieser Ebenen fällt je nach gemessener Netzebene unterschiedlich aus (siehe Abb. 5.108). Die Miller-Indizes geben dabei die Orientierung der Ebenen relativ zu den Kristallachsen an, wobei jedes Mineral seine spezifische Kenngrößen hat und dadurch zu identifizieren ist.

Die Bestrahlung erfolgt in variierenden Winkeln zur Probe und wird somit von verschiedenen Netzebenen reflektiert. Die aus der Interferenz der Netzebenen resultierende Intensität und der auftretende Beugungswinkel werden auf dem Detektor des Röntgendiffraktometers erfasst. Die Auswertung der reflektierten Röntgenstrahlung basiert auf der Bragg'schen Gleichung, welche die Röntgenbeugung beschreibt:¹⁰⁰

- Wellenlänge der Röntgenstrahlung
- Netzebenenabstand
- Winkel des auftreffenden Strahls

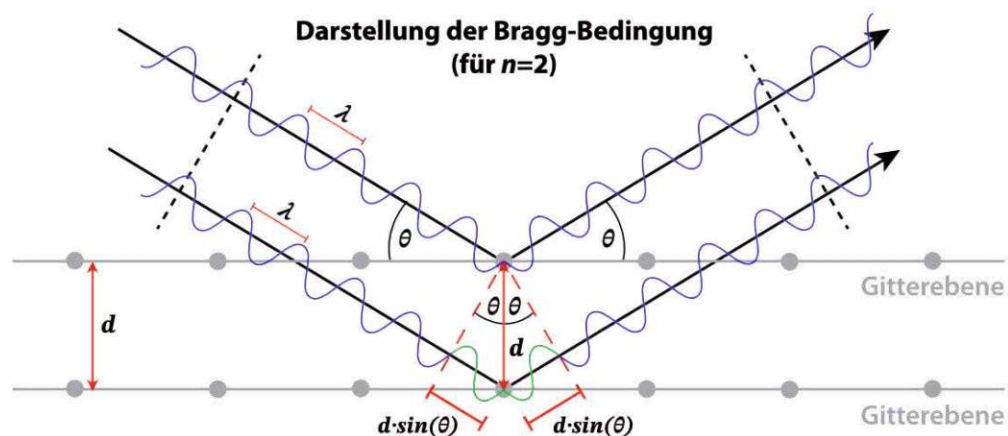


Abb. 5.107 | Bragg'sche Gleichung

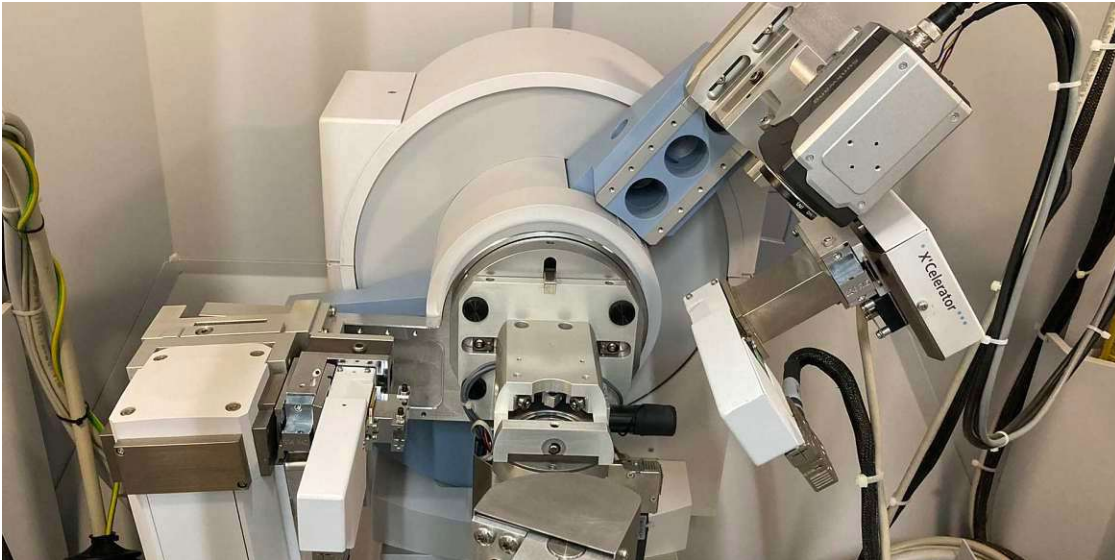


Abb. 5.109 | Röntgendiffraktometer

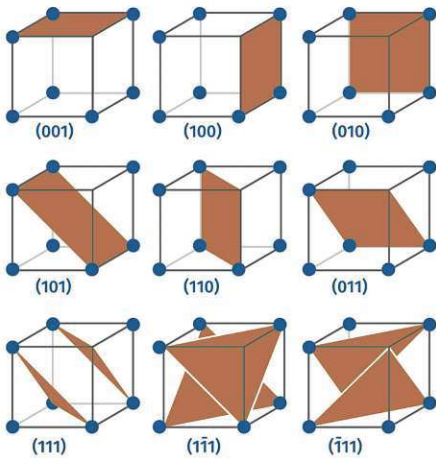


Abb. 5.108 | Netzebenen / Gitterebenen

Auswahl der Proben

Für die Durchführung wurden vier Proben herangezogen, wovon drei aus der bekannten Probereihe stammen. Zusätzlich wurde eine Sonderprobe (SP2) aus Nepal herangezogen, welche aufgrund ihres Standortes andere Minerale im Vergleich zu den Wiener Proben erwarten lässt.

Probe	Projekt	Standort	Tiefe	Labornummer
P5	Neubau FH Campus	Stiftgasse Höhe Haus-Nr. 1-3, 1070 Wien	-1,3	21.624
P17	Wohnbau (Planung)	Kurbadstraße 8 – 12, 1100 Wien	-4,5	21.625
P3	U2 Baustelle	Stiftgasse Höhe Haus-Nr. 1-3, 1070 Wien	-12,5	21.684
SP2	Communtiy-Lodge	Dhoksan, Nepal	ca. -1	21.688

Tab. 5.26 | Auswahl der Proben

5.7.3 Durchführung

A. Gesamtmineralanalyse

Für die Gesamtmineralanalyse wurden die Proben zunächst mit Mörser und Pistill homogenisiert, um eine repräsentative Teilprobe von jeweils 50 g zu erhalten. Diese wurden anschließend im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Normgerecht wäre eine Temperatur von 105 °C, wobei durch die Entweichung von kristallinem Wasser bereits mineralische Strukturänderungen einhergehen würden. Daher wurde die Trocknung bei 65 °C durchgeführt. Von der getrockneten Probe wurden etwa 20 g in der

Scheibenschwingmühle für 3 Minuten gemahlen, bis eine mehlintige Griffigkeit der Proben entstand. Die pulverisierten Proben wurden durch das Backloading-Verfahren in spezielle Probeträger eingebracht, sodass bei dem Präparat eine homogene glatte Oberfläche entstand (siehe Abb. 5.120).

Das Probematerial wurde zur Messung in das Röntgendiffraktometer gegeben. Die Dauer der Messung ist von deren Intensität abhängig und variiert von 10 bis 60 Minuten pro Probe.



Abb. 5.110 | Scheibenschwingmühle



Abb. 5.111 | Pulverisierte Probe



Abb. 5.112 | Probeträger mit pulverisierter Probe

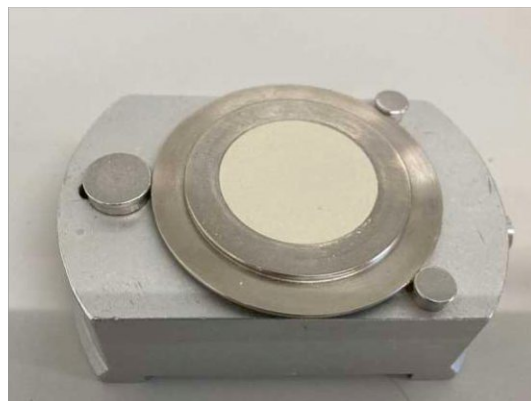


Abb. 5.113 | Pulverpräparate



Abb. 5.114 | Homogenisierung

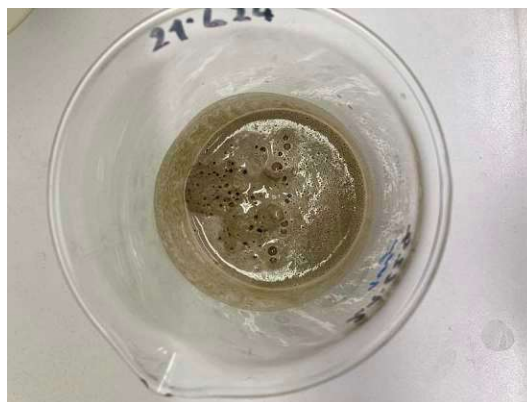


Abb. 5.115 | Chemische Reaktion mit H_2O_2

B. Tonmineralanalyse

Für die Durchführung der Tonmineralanalyse werden in der Regel ungefähr drei Wochen benötigt, da mit bestimmten Prozessen auch Wartezeiten einhergehen. Die effektive Arbeitszeit fällt wesentlich geringer aus. Grundsätzlich kann in folgende Arbeitsschritte unterschieden werden:

1. Reinigung der Probe von organischen Bestandteilen

Für die Tonmineralanalyse wurden ebenfalls 50 g der Probe eingewogen und anschließend mit 10-prozentigem Wasserstoffperoxid (H_2O_2) behandelt, um organische Bestandteile aus dem Material zu entfernen. Diese hätten in der späteren Messung zu Störungen geführt. Zur Vermeidung einer starken Reaktion, wurde die Zugabe jeweils zeitversetzt in geringen Mengen bewerkstelligt. Wasserstoffperoxid reagierte unter Blasenbildung mit organischen Materialien innerhalb der Probe, wodurch diese aufgespalten wurden. Durch die Reaktion wurden zudem die Tonminerale dispergiert. Die Reaktion kann je nach organischem Anteil mehrere Tage andauern. Nach Abschluss wurden die Proben im Wasserbad ausgekocht, um den überschüssigen Sauerstoff aus der Probe auszutreiben.

2. Gewinnung der Korngrößen $<20 \mu m$

Nach dem Auskochen wurde den Proben erneut deionisiertes Wasser zugegeben. Anschließend wurden sie im Ultraschallbecken unter gelegentlichem Rühren für 10 Minuten dispergiert, um mögliche Aggregationen der Tonminerale zu vermeiden. Die Suspension

wurde gesiebt, wobei in diesem Arbeitsschritt optional die Bestimmung der Korngrößenverteilung im Nasssiebverfahren möglich war (siehe Kap. 5.6.7 - Nasssiebung). Hierfür wurden Analysesiebe mit Maschenweiten von $20 \mu m$ | $63 \mu m$ | $200 \mu m$ | $630 \mu m$ | $2 mm$ verwendet. Der Siebdurchgang $<20 \mu m$ wurde in einem Gefäß aufgefangen und für weitere Verfahrensschritte verwendet. Zur Reduzierung der Flüssigkeit wurde die Suspension zunächst im Wasserbad bei $95 \text{ }^\circ C$ eingedampft. Nach der Entnahme konnte diese wiederum für mehrere Stunden ruhen, wobei sich der Feststoff absetzte, und überschüssige klare Flüssigkeit abgesaugt werden konnte. Dieser Arbeitsschritt gewährleistete eine wiederholte Säuberung von möglichen gelösten Stoffen.

3. Gewinnung der Tonminerale

Die Proben wurden erneut mit deionisiertem Wasser aufgefüllt und im Ultraschallbad dispergiert. Anschließend wurde die Suspension für 5 Minuten mit einem Magnetrührer gerührt. Optional wurde während des Rührens ein Teil der Suspension entnommen, um die Korngrößenverteilung im Feinkornbereich mittels Sedigraphie zu bestimmen (siehe Kap. 5.6.7 - Nasssiebung). Die Probe wurde daraufhin für die Zentrifugation vorbereitet, indem spezielle Flaschen mit definiertem Fassungsvermögen zunächst mit 2 ml des Dispersionsmittels Natriumpolyphosphat sowie der Suspension gefüllt wurden. Früher wurden die Tonminerale durch Sedimentation der Suspension in drei Zyklen gewonnen, wobei die Probenahme jeweils nach 6,5 Stunden erfolgte. Durch

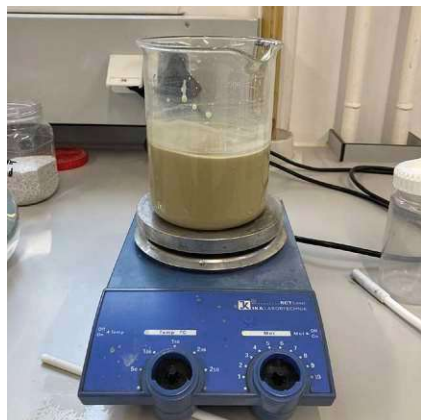


Abb. 5.116 | Rührvorgang



Abb. 5.117 | Absetzen der Schluffanteile

die Verwendung der Zentrifuge wurde dieser Prozess beschleunigt, indem drei Zyklen zu je 5 Minuten bei 1000 rpm durchgeführt wurden. Dadurch wurde sichergestellt, dass sich nur noch Minerale mit einer Größe von weniger als $2\ \mu\text{m}$ in der Flüssigkeit befanden, während sich Schluffanteile am Flaschenboden absetzten. Nach jedem Zyklus wurden jeweils 200 ml der tonhaltigen Suspension abgesaugt, während die Probe erneut mit deionisiertem Wasser aufgefüllt und vermischt wurde. Auf diese Weise konnten in drei Durchgängen etwa 90 Prozent der in der Probe enthaltenen Tonminerale gewonnen werden. Von dieser Probe wurden wiederum 50 ml zur Bestimmung des Trockengewichts bei $65\ ^\circ\text{C}$ getrocknet.

4. Belegung der Proben

Von der Tonsuspension wurden zwei Teilproben mit jeweils 40 ml erstellt. Eine Probe wurde mit 10

ml Kaliumchlorid (KCl) angereichert, während der anderen Probe 10 ml Magnesiumchlorid (MgCl_2) zugeführt wurden. Dieser Vorgang wird als „Belegung“ bezeichnet. Die Dreischichttonminerale tauschen im anschließenden 12-stündigen Schüttelvorgang jeweils Kalium und Magnesium gegen die Ionen ihrer Zwischenschicht aus.

5. Herstellung der Texturpräparate

Die belegten Proben wurden nach der Schüttelung für 30 Minuten bei 3200 rpm zentrifugiert. Nachdem sich die Probe am Gefäßboden abgesetzt hatte, wurde die Salzlösung mit überschüssigem Kalium und Magnesium dekantiert. Anschließend wurden die Proben erneut mit deionisiertem Wasser aufgefüllt und mit Ultraschall dispergiert.

Die Bestimmung des Trockengewichts erfolgte durch das Einwiegen der getrockneten Proben (C.), wodurch



Abb. 5.119 | Herstellung der Texturpräparate



Abb. 5.118 | Texturpräparate

die Menge der Tonminerale in der Suspension errechnet werden konnte. Entsprechend dieser wurde die benötigte Menge der Suspension festgelegt, um die Probe für das Röntgendiffraktometer herzustellen. Die Suspensionen wurden in kleinen Mengen in Glasröhren gegeben, in denen sich die Probeträger befanden. Durch Unterdruck wurde die Flüssigkeit langsam angezogen, während die blättchenartigen Tonminerale sich auf dem Probeträger ablagerten. Um sicherzustellen, dass sie sich in horizontaler Lage befanden, war ein langsames Absinken auf den Probeträger erforderlich und es wurden Aufwirbelungen der Suspension vermieden.

6. Behandlung der Proben

Insgesamt wurden für eine Gesamtprobe 6 Messungen mit dem Röntgendiffraktometer durchgeführt, wobei die beiden Texturpräparate zwischen den Messungen jeweils behandelt wurden. Anhand dieser wurden verschiedene Tonminerale identifiziert, die sich in der späteren gesamtheitlichen Auswertung abbildeten.

Messung	Präparat	Behandlung	Tonminerale
1	Kalium-belegtes Texturpräparat	Trocknung über Nacht mit gesättigter Ammon-Nitrat-Lösung bei 65 % relativer Luftfeuchte (verhindert Schwindrisse)	Smektite, Vermikulite
2	Magnesium-belegtes Texturpräparat	Trocknung über Nacht mit gesättigter Ammon-Nitrat-Lösung bei 65 % relativer Luftfeuchte (verhindert Schwindrisse)	Smektite, Vermikulite
3	Kalium-belegtes Texturpräparat	Behandlung über Nacht in Ethylenglycol-Atmosphäre bei 65 °C	Smektite, Vermikulite
4	Magnesium-belegtes Texturpräparat	Behandlung über Nacht in Ethylenglycol-Atmosphäre bei 65 °C	Smektite, Vermikulite
5	Kalium-belegtes Texturpräparat	Behandlung mit Dimethylsulfoxid (DMSO) für mehrere Tage bei 65 °C	Kaolinite (Smektite)
6	Magnesium-belegtes Texturpräparat	Für 2 Stunden bei 550 °C getempert	Kaolinite, Chlorite

Tab. 5.27 | Behandlungen der Präparate für die Messung

Mit den Messungen 1 – 4 werden quellfähige Tonminerale, wie Smektite und Vermikulite, identifiziert. Grund dafür ist die Aufnahme von Kalium und Magnesium in deren Zwischenschichten. Durch Ethylenglycol findet eine messbare Aufweitung der Zwischenschichten statt. Die Messung 5 beweist gut kristallisierte Kaolinite, während Messung 6 die Unterscheidung von primären und sekundären Chloriten zum Ergebnis hat.

C. Ergänzende Tonmineralanalyse

Zusätzlich wurden die <2 µm Teilproben nochmals als Pulverpräparate gemessen (060 Reflexe), um ergänzende Informationen zu den Tonmineralen zu erhalten.

Die Suspension mit den <2 µm Anteilen wurde hierfür eingefroren. Mittels Sublimation im Niederdruckbereich erlangten die Proben einen gefriergetrockneten Zustand und wurden wiederum mit Mörser und Pistill pulverisiert.

5.7.4 Ergebnisse und Auswertung

A. Gesamtmineralanalyse

Die Identifizierung der Minerale kann anhand der Röntgendiffraktogramme nachvollzogen werden. Die Minerale wurden zunächst mit dem Softwareprogramm des Röntgendiffraktometers qualitativ bestimmt und anschließend mit der Rietveld-Methode auf die semiquantitative Zusammensetzung analysiert.

Die Proben bestehen hauptsächlich aus Quarz und Schichtsilikaten, worunter Glimmer und Tonminerale fallen. Die Wiener Proben weisen zum einen Carbonate auf, welche sich aus Dolomit und Kalzit zusammensetzen, und zum anderen Feldspäte. In den jeweiligen Proben sind unterschiedliche Kalifeldspäte und Plagioklase zu finden. Die Probe aus Nepal weist

nur einen sehr geringen Anteil der Feldspäte auf. Sie enthält Gibbsite (Aluminiumhydroxid), welche durch tropische Verwitterung entstehen. Zudem sind in dieser Probe Sepiolite vorhanden, welche nichtquellfähige Tonminerale darstellen und vor allem in eher mediterranen Klimazonen vorkommen.

In den Röntgendiffraktogrammen ist erkennbar, dass die Wiener Proben die gleiche Zusammensetzung mit einigen Abweichungen aufweisen, während sich die Probe aus Nepal von diesen unterscheidet. Dieser Aspekt geht auf das Ursprungsgestein sowie Verwitterungsbedingungen zurück, welche bei den Wiener Proben weitestgehend gleich sind.

Probe	Quarz [%]	Feldspäte [%]	Schichtsilikate [%]	Karbonate [%]	Gibbsite [%]
P5	38	15	33	14	-
P17	26	8	50	16	-
P3	52	14	22	12	-
SP-N	43	1	53	0	3

Tab. 5.28 | Semiquantitative Ergebnisse der Gesamtmineralanalyse



Abb. 5.120 | Röntgendiffraktometer

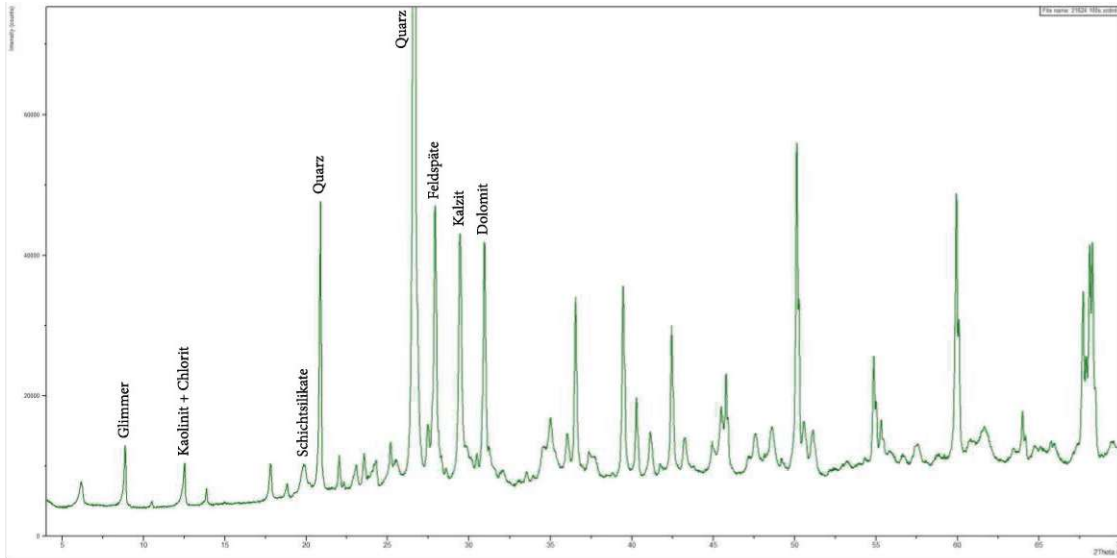


Abb. 5.121 | Röntgendiffraktogramm der Gesamtmineralanalyse P5

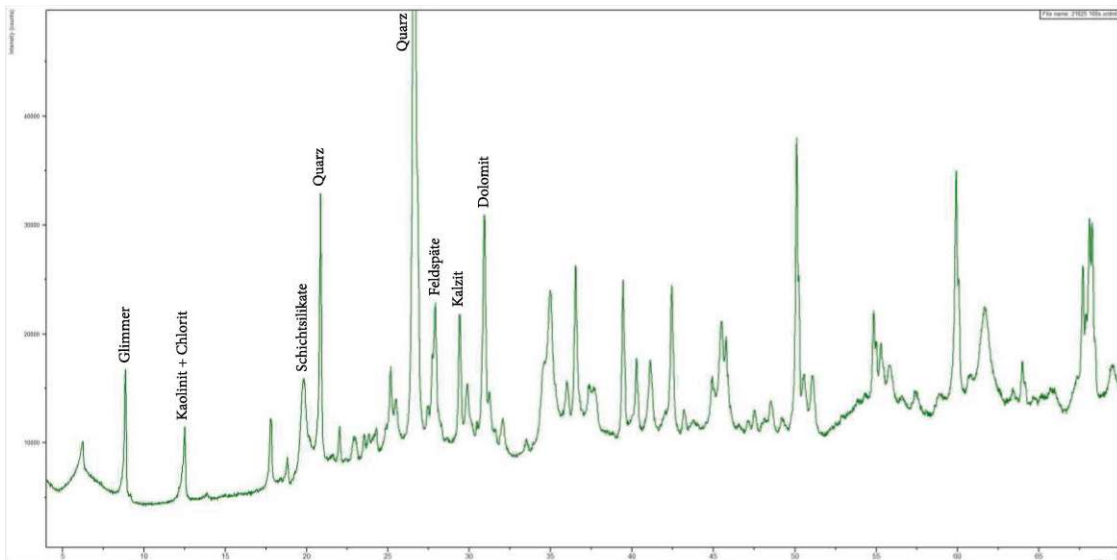


Abb. 5.122 | Röntgendiffraktogramm der Gesamtmineralanalyse P17

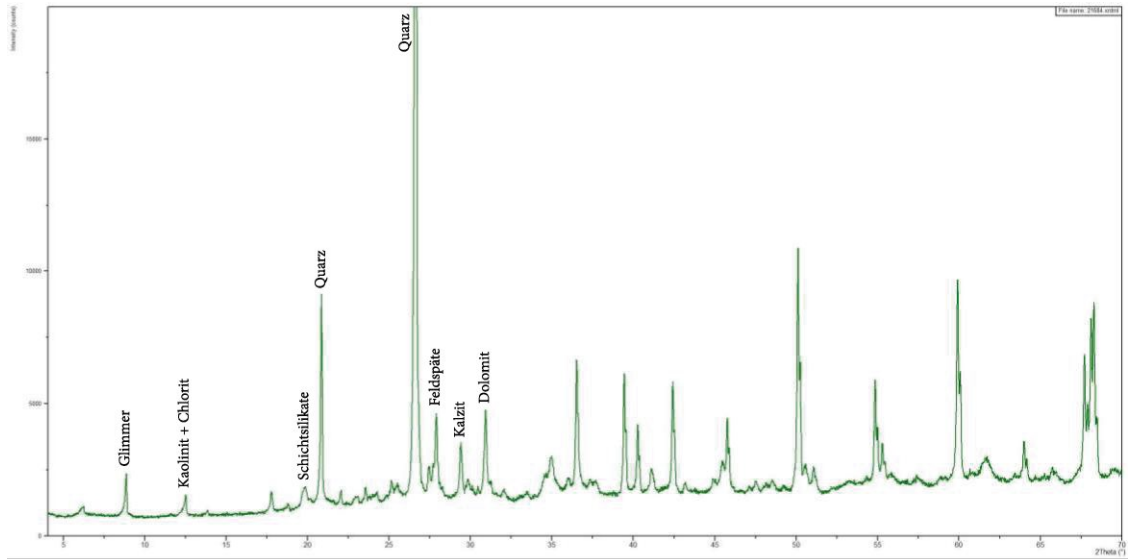


Abb. 5.123 | Röntgendiffraktogramm der Gesamtmineralanalyse P3

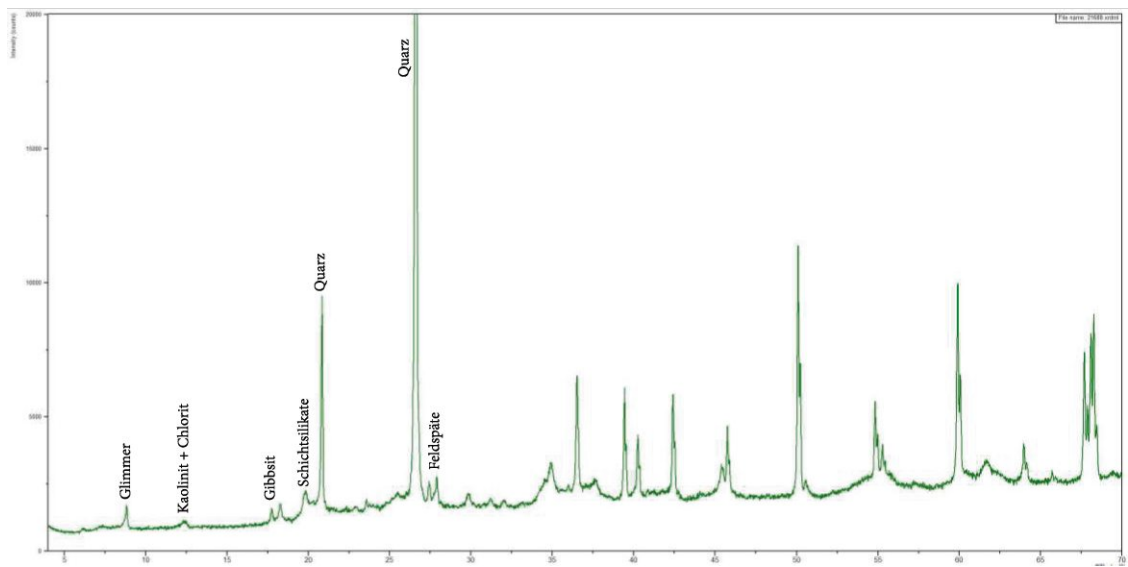


Abb. 5.124 | Röntgendiffraktogramm der Gesamtmineralanalyse SP-N

B. Tonmineralanalyse

Die Identifikation der Tonminerale erfolgte nach Moore and Reynolds und wurde anschließend durch das Softwareprogramm des Röntgendiffraktometers semiquantitativ ausgewertet. Eine Ausnahme bildet die Sonderprobe aus Nepal, welche aufgrund des Sepiolitvorkommens ohne weitere Untersuchungen keiner semiquantitativen Auswertung unterzogen werden kann. Nach Einschätzungen macht Kaolinit ungefähr die Hälfte des Aufkommens aus, während Illite, Chlorite und Sepiolite die zweite Hälfte beanspruchen.

Probe	Smektit [%]	Vermikulit [%]	Illit [%]	Kaolinit [%]	Chlorit [%]
P5	40	11	26	12	11
P17	42	25	20	13	Spuren
P3	34	14	29	11	12
SP-N	-	-	vorhanden	vorhanden	vorhanden

Tab. 5.29 | Semiquantitative Ergebnisse der Tonmineralanalyse

Der Anteil der nicht quellfähigen Zweischichttonminerale Kaolinite fällt im Verhältnis gering aus. Die Vierschichttonminerale Chlorite sind in Probe P17 nur in Spuren vorhanden. Die Dreischichtsilikate Illite machen ungefähr zwischen 20 und 30 Prozent der Tonminerale in den Proben aus.

Für den Lehmabau sind vor allem die quellfähigen Dreischichttonminerale relevant, welche bei den Wiener Proben den Hauptteil der vorkommenden Tonmineralen darstellen. Die Unterscheidung zwischen Smektit und Vermikulit ist dabei nicht signifikant, da die Differenzen auf die bauphysikalischen

Eigenschaften des Lehms gering sind. Bei den Proben P5 und P3 machen die quellfähigen Dreischichttonminerale ungefähr die Hälfte der jeweils enthaltenen Tonminerale aus, bei Probe P17 sind es knapp 70 Prozent.

Bei den Proben P5 und P17 wurde zudem die Bestimmung der Korngrößenverteilung durchgeführt, wobei die Anteile der Tonfraktion ($<2 \mu\text{m}$) ermittelt wurden. In Kombination mit der Tonmineralanalyse kann der Gesamtanteil der Dreischichttonminerale bestimmt werden.

Probe	Tonfraktion gesamt $<2 \mu\text{m}$ [%]	Dreischichttonminerale in Tonfraktion [%]	Dreischichttonminerale gesamt [%]
P5	47	67	32
P17	20	51	10

Tab. 5.30 | Semiquantitative Ergebnisse der Tonmineralanalyse in Bezug auf die Gesamtprobe

Erklärung zur Auswertung:

Die Identifikation der Tonminerale wird anhand der Reflexe der verschiedenen Tonminerale durch die sechs unterschiedlichen Messungen pro Probe ausgewertet. In den nachfolgenden Röntgendiffraktogrammen äußern sich diese durch Peaks an der x-Achse, welche die Intensität der Reflexe durch Counts pro Sekunde [counts/sec] misst. Die y-Achse gibt den Winkel [2 Theta] der eintreffenden Röntgenstrahlung an, die durch das Bragg'sche Gesetz die Höhe der Schichtsequenzen der verschiedenen Tonminerale angibt. Diese wird in der Längeneinheit Ångström [Å] angegeben.

1. Quarz
In allen Proben ist in der Tonfraktion ($<2\ \mu\text{m}$) Quarz enthalten, welcher sich durch den Hauptreflex bei $3,3\ \text{Å}$ äußert. Quarz besitzt keine Bindekraft und wird daher nicht mit den Tonmineralen ausgewertet.
2. Illite
Die nicht quellfähigen Dreischichttonminerale zeigen ihren ersten Reflex bei $10\ \text{Å}$, welcher sich bei allen Proben klar abzeichnet. Auch die Folgereflexe bei $5\ \text{Å}$ und $3,3\ \text{Å}$ sind nachweisbar.
3. Kaolinite
Die Zweischichttonminerale können in gut kristallisierter oder schlecht kristallisierter Form vorliegen. Der Zustand der Kristallisation bezieht sich damit auf die Ebenmäßigkeit der Struktur der einzelnen Tetraeder-Oktaeder-Schichten. Der Hauptreflex von Kaoliniten bildet sich mit $7\ \text{Å}$ in allen Messungen mit Ausnahme der getemperten Probe ab. Zudem weisen Kaolinite zum Teil einen Peak bei $11,2\ \text{Å}$ der DMSO-Messung auf, was ebenfalls bei allen vorliegenden Proben nachweisbar ist. Schlecht kristallisierte Kaolinite äußern sich in breiter Erscheinung des Reflexes bei $7\ \text{Å}$, während gut kristallisierte Kaolinite einen spitzen Peak bei $11,2\ \text{Å}$ aufweisen. Bei allen Proben fallen die Peaks bei $7\ \text{Å}$ eher breit aus, insbesondere bei Probe P17.
4. Chlorite
Die Reflexe der Vierschichttonminerale Chlorite überschneiden sich mit denen der Kaolinite und lassen sich nur durch die Ausbildung der Peaks bei $7\ \text{Å}$ und $14\ \text{Å}$ der getemperten Probe erkennen. Dabei wird zwischen primären und

sekundären Chloriten bezüglich ihrer Entstehung unterschieden; Bei Vorliegen eines stark ausgeprägten Reflexes bei $14\ \text{Å}$ der getemperten Probe sind primäre Chlorite erkenntlich, während sekundäre Chlorite diesen nicht aufweisen. Durch die Überschneidung der Folgereflexe mit anderen Tonmineralen, sind sekundäre Chlorite nur schwer von Kaoliniten zu unterscheiden.

Bei Probe P17 sind keine Chlorite enthalten, während sie bei der Sonderprobe aus Nepal SP2 nur in geringem Anteil vorhanden sind.

5. Smektit
Die Dreischichttonminerale sind in allen Wiener Proben enthalten und durch ihre Quellfähigkeit nachweisbar. Die mit Magnesium belegte Probe zeigt dabei einen Peak bei $14\ \text{Å}$. Je nach Verwitterungsgrad der Smektit sind zudem durch die Kalium-Probe jeweils ein Peak bei $10\ \text{Å}$ (schwach verwittert) oder $14\ \text{Å}$ (stark verwittert) ausgebildet. Die Besonderheit der Smektit ist die Aufweitung bei der Behandlung mit Ethylenglycol, welche bei den Messungen KE und ME durch Verschiebung des Peaks auf $17\ \text{Å}$ nachvollziehbar ist. Durch die zusätzliche Aufweitung der DMSO-Proben bildet sich ein Peak bei deren Messung bei $19\ \text{Å}$ ab.
6. Vermikulite
Die dreischichtigen Vermikulite binden bevorzugt Kaliumionen in ihre Zwischenschicht. Dies äußert sich im Röntgendiffraktogramm durch die Verlagerung des Peaks von $14\ \text{Å}$ zu $10\ \text{Å}$ bei den Kalium-belegten Proben. Damit ist die Kontraktion der Schichtsequenzen durch die Verengung der Zwischenschicht durch die recht kleinen Kaliumionen nachweisbar.

C. Ergänzende Tonmineralanalyse

Die ergänzende Tonmineralanalyse durch die Bestrahlung der Pulverpräparate $<2\ \mu\text{m}$ war nur für die Sonderprobe aus Nepal relevant, da die Ergebnisse der Tonmineralanalysen der Wiener Proben eindeutig waren. Bei dem nepalesischen Lehm konnte dadurch das anfänglich vermutete Vorhandensein von Mixed-Layern ausgeschlossen und das Vorkommen von Sepioliten nachgewiesen werden.

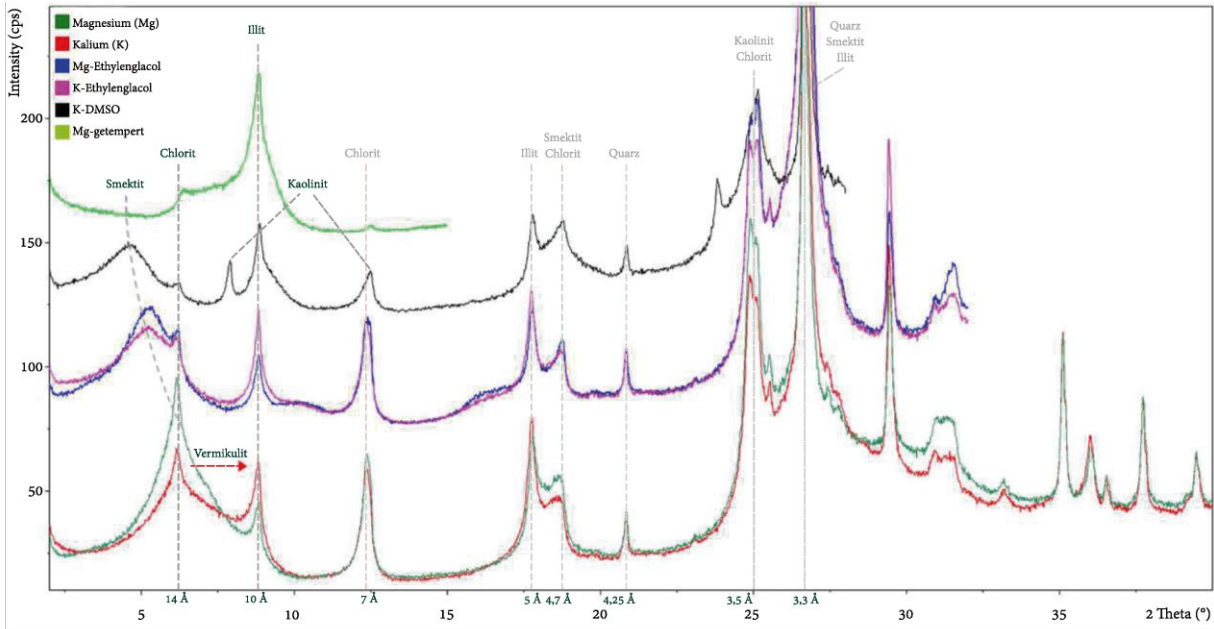


Abb. 5.125 | Röntgendiffraktogramm der Tonmineralanalyse P5

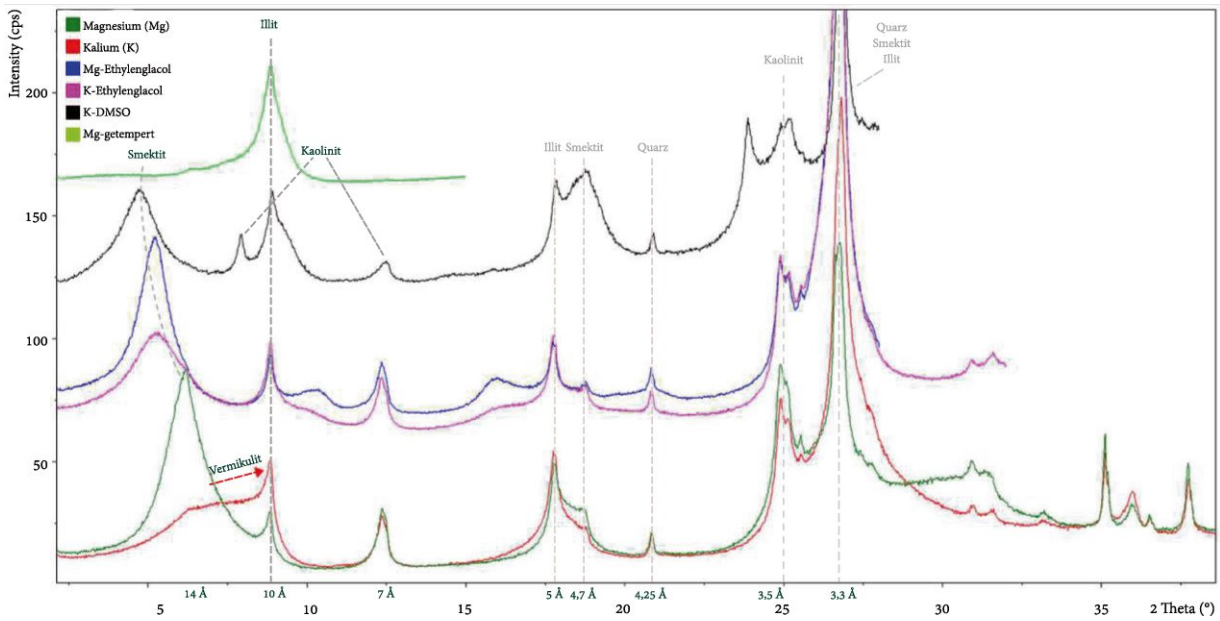


Abb. 5.126 | Röntgendiffraktogramm der Tonmineralanalyse P17

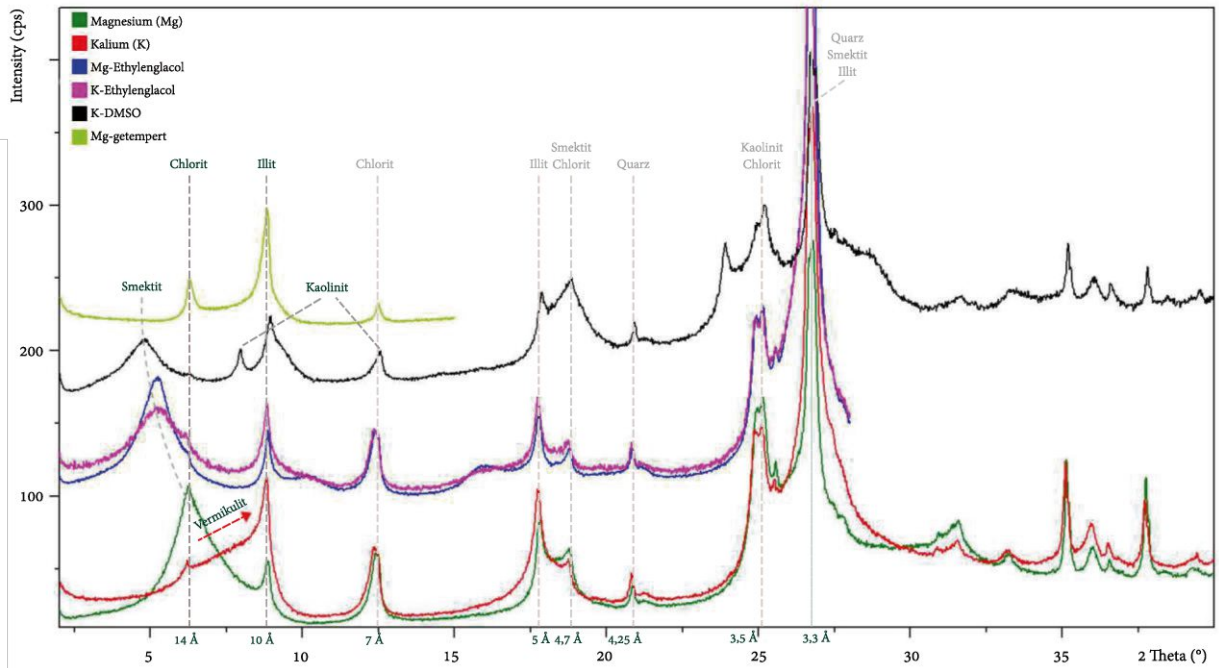


Abb. 5.127 | Röntgendiffraktogramm der Tonmineralanalyse P3

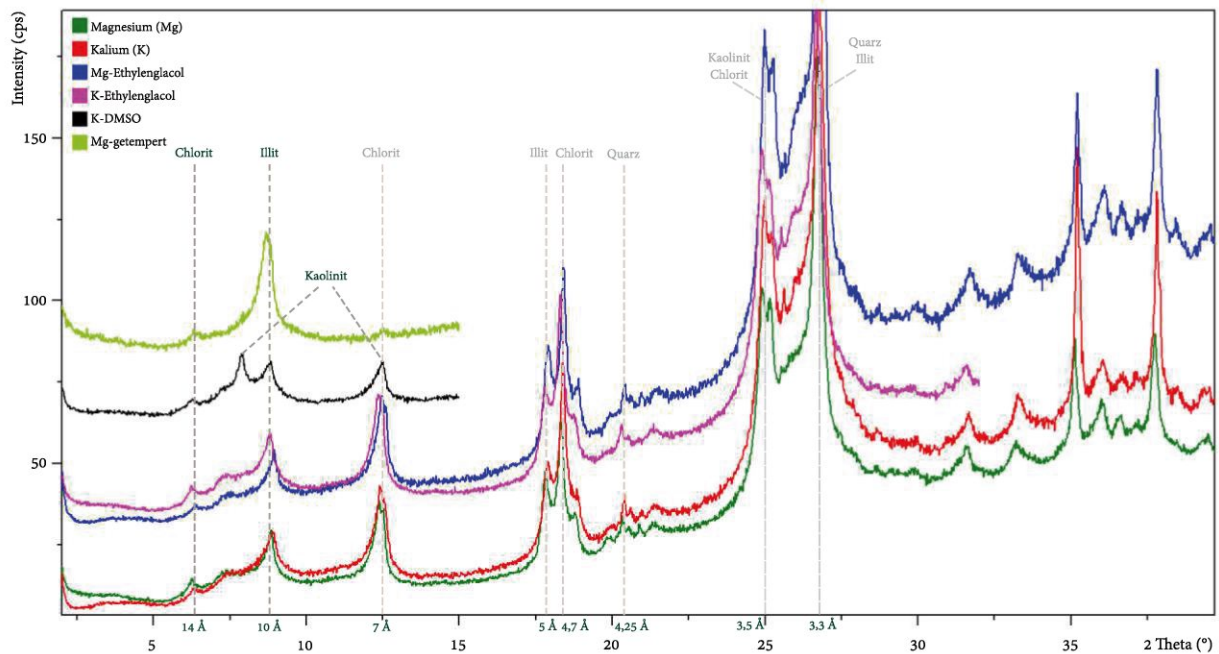


Abb. 5.128 | Röntgendiffraktogramm der Tonmineralanalyse SP-N

5.7.5 Bedeutung im Lehmbau

„Im Lehmbau gibt es oftmals keine Erklärung für bestimmte Eigenschaften der Tone; Vieles basiert auf Erfahrungswerten, die weitergegeben werden. Aber durch die Ton- und Gesamtmineralanalyse bekommt man das Wissen dazu.“¹⁰¹

Franz Ottner

Die Tonmineralogie wird aktuell noch nicht regulär im Lehmbau angewendet, sondern findet sich eher in einzelnen Forschungsprojekten wieder. Aktuell erweist sich das Herstellen von Zusammenhängen der Ergebnisse von der Gesamt- und Tonmineralanalyse zu den praktischen Arbeiten mit Lehm als schwierig. Mögliche Einsatzgebiete wären das Erstellen von Prognosen für Lehmabbaustoff und deren Rezepturen sowie die Analyse von auftretenden Bauschäden.

Durch die Identifizierung und semiquantitative Auswertung der verschiedenen Tonminerale werden Tendenzen zur Bindekraft eines Lehms erkenntlich. Ein vermehrtes Vorkommen von Kaoliniten und Chloriten könnte auf geringere Bindekraft hinweisen, wodurch das Material nicht zu stark abgemagert werden sollte. Die Dreischichttonminerale Illite jedoch insbesondere die Vermikulite und Smektit sind für eine hohe Bindekraft im Lehmabau signifikant. Das Wissen zu den enthaltenen Tonmineralen könnte sich daher positiv auf die Rezepturenentwicklung ausüben, da akkurater auf das Material reagiert werden kann und es weniger praktisch erweist werden muss. Es bedarf Richtwerte, um eine vertiefende Signifikanz für den praktischen Lehmabau zu erlangen.

Franz Ottner, Professor der angewandten Geologie, verweist hierbei auf das Zusammenspiel der mineralogischen Analysen: *„Mit einer Tonmineralanalyse, Gesamtmineralanalyse und Korngrößenverteilung bekommt man eine gute Kombination für die Beurteilung vom Material aus der Ferne.“¹⁰²*

Die Voraussetzung möglicher Tendenzen zur Bindekraft ist die Verhältnismäßigkeit zur Gesamtprobe, wodurch wiederum der Gesamttongehalt bestimmt werden müsste. Ein Beispiel ist anhand von Probe P5 und P17 möglich, da die Tonfraktion $<2 \mu\text{m}$ durch Sedigraphie der beiden Proben bestimmt wurde.

Das Schwindmaß von Lehmabbaustoffen wird maßgeblich von der Quellfähigkeit der enthaltenen Tonminerale beeinflusst. Die Dreischichttonminerale Smektit und Vermikulite verfügen über eine ausgeprägte Quellfähigkeit, während diese bei Kaoliniten, Illiten und Chloriten wesentlich geringer ausfällt.

Bei Auftreten von Schwindrissen könnte die Tonmineralanalyse Hinweise zur Ursache der Schwindung geben. Es könnte auf das Vorkommen von Dreischichttonmineralen zurückgeführt werden. Falls diese jedoch nicht oder kaum vorhanden sind, könnten andere Aspekte die Schwindung bewirken, wie beispielsweise eine falsche oder unregelmäßige Trocknung, Feuchtigkeit in angrenzenden Bauteilen oder ein zu hoher Wassergehalt in den Mischungen. Bauliche Maßnahmen könnten besser auf den eigentlichen Mangel ausgerichtet werden.

Grundsätzlich würde durch den Einbezug der Tonmineralanalyse ein vertieftes Materialverständnis generiert werden. Schon in der frühen Lehmprüfung wurde der Bestimmung des Tonanteils eine Bedeutung bezüglich der Bindekraft zugemessen, die allerdings aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Tonminerale widerlegt wurde. Aktuell ist das Verfahren zur Tonmineralanalyse recht aufwendig, Optimierungsansätze sowie Anpassungen an lehmabbauspezifische Fragestellungen sind denkbar. Ottner führt unter anderem die Unterscheidung von Smektiten und Vermikuliten an: *„Für den Lehmabau ist es wahrscheinlich nicht relevant, ob man ein Vermikulit hat, das Kalium aufnimmt, oder ob es Smektit ist, da die Eigenschaften der beiden Tonminerale im Lehmabau ähnlich sind. Allein durch den Wegfall dieser Unterscheidung könnte der ganze Prozess der Analyse halbiert werden.“¹⁰³*

Der Einbezug der Mineralogie sowie der Tonmineralogie in den Lehmabau könnte vor allem für die Massentauglichkeit des Rohstoffes fördernd sein. Ottner verweist auf praktizierende Mineralog:innen in der Betonherstellung bei der regulären Prüfung von Zement.

Es gilt daher vertiefte Forschungen und die Vernetzung dieser Fachbereiche anzustreben und lehmabbauspezifische Fragestellungen und Anforderungen auszuformulieren.

¹⁰¹ Interview, Franz Ottner
¹⁰² ebd.
¹⁰³ ebd.

5.8 Fortführende Prüfungen der Baustoffentwicklung

In der weiteren Abhandlung werden Materialprüfungen von Lehm aufgeführt, welche sich in der einschlägigen Fachliteratur oftmals bei der Eignungsprüfung von Baulehm wiederfinden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden diese aufgrund der definierten Zielstellung nicht durchgeführt. In theoretischer Aufarbeitung werden nachfolgend die Prüfungen vorgestellt sowie deren Ergebnisse hinsichtlich der Relevanz dieser Arbeit erläutert.

5.8.1 Bewertung der Plastizität

In Abhängigkeit vom Wassergehalt kann Lehm unterschiedliche Zustände erlangen, welche von fest, halbfest, plastisch zu flüssig reichen. Der plastische Zustand bildet den Bereich von fest zu flüssig ab und zeichnet sich durch Verformbarkeit des Materials aus. Durch die Kohäsion der Tonminerale ist dieser Zustand bei Lehm besonders ausgeprägt, wobei dies von Tonanteil und -art abhängig ist.¹⁰⁴ Lehme erreichen daher bei unterschiedlichen Wassergehalten den gleichen Zustand der Plastizität.

Der schwedische Forscher Albert Atterberg stellte im Jahr 1911 Verfahren zur Ermittlung der Zustandsgrenzen vor, um damit den plastischen Bereich eines Bodens zu definieren. Diese sind heute als Atterberg-Grenzen bekannt und bilden in der Geotechnik noch immer ein gängiges Verfahren zur Klassifizierung von feinkörnigen Böden ab. Die Konsistenzgrenzen geben Auskunft über die Verdichtbarkeit des Bodenmaterials und sind daher auch in der Baugrunduntersuchung von Relevanz.

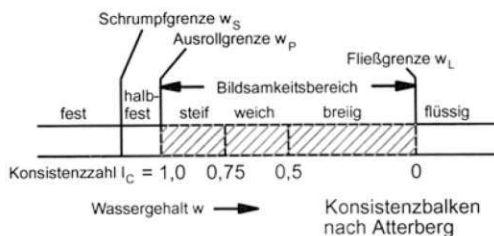


Abb. 5.132 | Zustandsgrenzen nach Atterberg



Abb. 5.130 | Plastischer Zustand von Lehmputz (100 mg) bei 25 ml Wasser



Abb. 5.129 | Plastischer Zustand von Löss (100 mg) mit 30 ml Wasser



Abb. 5.131 | Plastischer Zustand von Bentonit (100 mg) mit 400 ml Wasser

Durch die Bestimmung der Plastizität ergibt sich im internationalen Kontext eine Form der Klassifizierung von Lehm nach Plastizitätszahl und Fließgrenze. Bei Vorliegen der Plastizität wird anhand dieser klassifiziert in leicht, mittel und stark plastische Tone. Je größer die Plastizitätszahl ausfällt, desto höher ist der Tonanteil und der Bereich der plastischen Verformung. Schröder verweist auf die Möglichkeit der Erhöhung der Plastizitätszahl durch intensive Aufbereitung und Zuschlagstoffe. Gegenteilig dazu können hydraulische Bindemittel die Plastizitätszahl stark verringern.¹⁰⁵

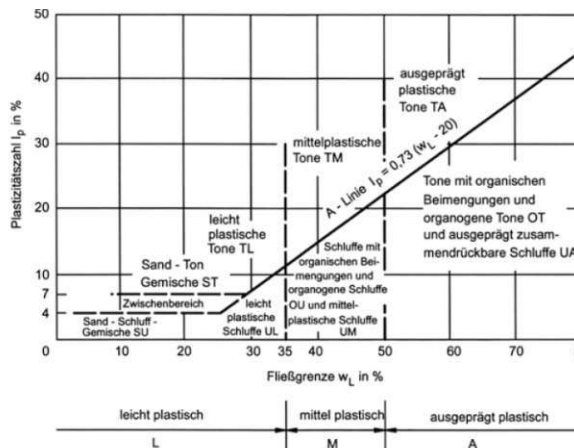


Abb. 5.133 | Klassifizierung nach Plastizität

Lehmart	Fließgrenze (w_L) [%]	Ausrollgrenze (w_p) [%]	Plastizitätszahl ($I_p = w_L - w_p$) [%]
stark sandiger Lehm	10 – 23	5 – 20	< 5
stark schluffiger Lehm	15 – 35	10 – 25	5 – 15
stark toniger Lehm	28 – 150	20 – 50	15 – 95
Bentonit	40	8	32

Tab. 5.31 | Plastizitätszahlen verschiedener Lehmarten

Das Verfahren zur Bestimmung der Plastizität ist recht aufwändig und Kritik wird vor allem dahingehend geäußert, dass in Vorbereitung der Durchführung alle Bestandteile über 0,4 mm Körnung aus dem Verfahren ausgeschlossen werden und daher die Rheologie des Materials verändert wird. Damit ist das Ergebnis nicht signifikant für die Gesamtprobe. Röhlen und Ziegert begründen so die eingeschränkte Gültigkeit der Ergebnisse auf beispielsweise Lösslehme.¹⁰⁶ Minke wiederum verweist darauf, dass dieser Anteil berechnet werden könne, solange er weniger als 25

Prozent der Probe ausmache.¹⁰⁷ In allen anderen Fällen kann gemäß *ÖNORM EN ISO 17892-12* nur der äquivalente Wassergehalt der jeweiligen Zustandsgrenzen angegeben werden, was keine Rückschlüsse auf das Gesamtmaterial zulässt und damit nicht für eine allgemeingültige Untersuchung im Rahmen der Eignungsprüfung für Baulehme herangezogen werden kann.

¹⁰⁵vgl. Schröder, 2019 | S. 106
¹⁰⁶vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 24
¹⁰⁷Minke, 2017 | S. 23

5.8.2 Schwindmaß

„Durch die Schwindmaße lassen sich die Lehme nicht etwa nach ihrer Bindekraft einteilen, weil jeder Lehm ein von den anderen Lehmen seiner eignen Klasse abweichendes Schwindmaß hat, bedingt durch die Art seiner chemischen Zusammensetzung und seines Mineralgerüsts. Da nun auch das größere Schwindmaß der fetten Lehme beim Bauen mit Lehm durch Zuschläge herabgesetzt werden muß, so hat die Feststellung der Schwindmaße von Rohlehm für uns keine besondere praktische Bedeutung.“⁹⁰⁸

Niemeyer

Das Schwindmaß ist eine Eigenschaft von Lehmen, das durch die Sorptionsfähigkeit der Tonminerale bedingt ist und durch die Volumenverringerung nach dem Trocknungsprozess definiert wird. Sie wird vor allem durch den Tonanteil und nach Minke im geringen Maß durch die Tonart bestimmt,¹⁰⁹ wobei die Quell- und Schwindeigenschaft vor allem bei den Dreischichttonmineralen stark ausgeprägt ist.

In Kombination mit der Druckfestigkeit kann das Schwindmaß gemäß Röhlen und Ziegert eine Alternative zur Bindekraftprüfung für die Abschätzung von Rezepturen darstellen.¹¹⁰ Das Schwindmaß kann dabei nach dem Ausbreitmaß oder im erdfeuchten Zustand beurteilt werden und benötigt weniger Zeitaufwand für die Durchführung.¹¹¹ Dennoch findet anhand dieser Parameter bisher noch keine Klassifizierung nach einem bekannten System statt. Niemeyer hingegen ordnete diese zur ungefähren Orientierung in an die Bindekraft angelehnten Klassen ein, welche auch in der damaligen *DIN 1952 Bl.2* definiert wurden.¹¹² Neue Werke nehmen sich dieser Einteilung nicht an. In den deutschen Lehmbaunormen sind nur für die Lehm-mauer- und Lehmputzmörtel Grenzwerte für das Schwindmaß festgelegt.¹¹³ Die *Lehmbau Regeln* definieren Werte für den Stampflehm und Lehmmörtel.¹¹⁴

Lehmart	Schwindmaß [%]
Magere Lehme	2 – 5
Fast fette Lehme	4 – 7
Fette Lehme	6 – 10
Sehr fette Lehme	8 – 20

Tab. 5.32 | Einteilung der Lehme nach Schwindmaß gemäß *DIN 18952 Bl. 2*

Die Durchführung des Verfahrens zum Schwindmaß ist recht einfach zu bewerkstelligen. Hierfür wird Lehm in eine Mörtelprismen-Form eingefüllt und getrocknet. Anschließend wird die Verkürzung der Prüfkörper gemessen und der Prozentsatz der Größenänderung durch den Schwindprozesses angegeben.

Das Schwindmaß ist von der Konsistenz und dem damit verbundenen Wassergehalt abhängig. Jedoch werden derzeit zwei verschiedene Konsistenzen zur Prüfkörperherstellung vorgeschlagen, die aufgrund unterschiedlicher Wassergehalte differenzierte Ergebnisse präsentieren. Gemäß Röhlen und Ziegert können diese bis zu 20 bis 50 Prozent voneinander abweichen.¹¹⁵

Minke weist zudem darauf hin, dass andere nicht-tonige Bestandteile Einfluss auf das Schwindmaß nehmen können,¹¹⁶ wodurch sich wiederum die Vergleichbarkeit der ermittelten Werte in der Eignungsprüfung von Baulehm als problematisch erweisen könnten.

⁹⁰⁸Niemeyer, 1982 | S. 40

⁹⁰⁹vgl. Minke, 2017 | S. 22

¹¹⁰vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 24

¹¹¹mehr dazu s. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 35

¹¹²vgl. Niemeyer, 1982 | S. 40

¹¹³DIN 18946:2018, DIN 18947:2024

¹¹⁴vgl. Volhard, Röhlen, 2009 | S. 22 - 23

¹¹⁵vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 24

¹¹⁶vgl. Minke, 2017 | S. 22

5.8.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit beschreibt den Widerstand des Materials bei einaxialer Belastung des Prüfkörpers. Dieser wird bis zum Bruchmoment gemessen und danach beurteilt. Sie kann anhand der Prüfkörpern für die Bestimmung des Schwindmaßes durchgeführt werden. Für die unterschiedlichen Baustoffe sind jeweilige spezifische Verfahren für die Bestimmung der Druckfestigkeit festgelegt, abhängig von den entsprechenden Korngrößen. Während beim Stampflehmbau Probewürfel (20 x 20 x 20 cm) angefertigt werden, kann die Druckfestigkeit bei Lehmziegeln unmittelbar am Baustoff und bei Lehmörtel an den Mörtelprismen getestet werden.

Auch hier verweisen Röhlen und Ziegert wiederum auf die Möglichkeit von zwei verschiedenen Konsistenzen bei der Versuchsmasse, wobei ebenfalls Abweichungen von 5 bis 25 Prozent zu verzeichnen sind, was auf die Abhängigkeit der mehr oder weniger stark ausgeprägten Porenbildung zurückgeht.¹¹⁷

Die Druckfestigkeit wird durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Die Bindekraft der Tonminerale und die Korngrößenverteilung nehmen wohl den größ-

ten Einfluss, jedoch können andere Parameter, wie die Verdichtung, die Kornformen, andere strukturausbildende Mineralien sowie die Aufbereitungsart, zusätzlich einwirken. Wie stark die unterschiedlichen Parameter in die Druckfestigkeit miteinspielen, kann durch deren einfache Bestimmung nicht analysiert werden und bedarf weiterer Prüfungen:

- Bestimmung der Korngrößenverteilung, um eine möglichst günstige Sieblinie bezüglich des Prinzips der dichtesten Kornpackung zu überprüfen
- Bestimmung der vorhandenen Kornformen und deren Einflussnahme
- Bestimmung der optimalen Konsistenz für die Verdichtung durch den Proctorversuch
- Bestimmung des Kalk- und Eisengehalts aufgrund möglicher zusätzlich festigende Mineralstrukturen

Aufgrund der vielen Einflussfaktoren auf die Druckfestigkeit stellt diese in der Eignungsprüfung von Baulehm möglicherweise nicht die richtigen Kriterien zur einfachen Bewertung, sondern liefert vor allem Tendenzen zur Herstellung möglicher LehmBaustoffe.



Abb. 5.134 | Prüfung zur Druckfestigkeit

¹¹⁷vgl. Röhlen, Ziegert, 2020 | S. 24



5.9.1 Gesamtheitliche Auswertung der Ergebnisse

Ziel ist die Zusammenführung und Auswertung der Ergebnisse, um einen beispielhaften Umgang mit dem potenziell verwertbaren Aushubmaterial im Lehm-bau aufzuzeigen. Wie in Kap. 4 beschrieben, wird abschließend nochmals auf die drei Szenarien verwiesen und diese abschließend mit den Ergebnissen der Prüfungen in Kontext gesetzt.

Bei direkter Verwertung von Aushublehm vor Ort kann bei konkreter Vorstellung des geplanten Lehm-baustoffes nach Überprüfung der Ausschlusskriterien unmittelbar in die Rezepturenentwicklung und Bau-stoffprüfung übergegangen werden.

Für eine Austauschplattform für Aushub sowie für die geordnete Ablagerung von Baulehm ist die Fest-

legung einer Klassifizierung des Aushubs notwendig, nach welcher diese stattfinden können. Das grundsätzliche Konzept der vorliegenden Arbeit sieht die Bindekraft als Hauptkriterium vor. Grund dafür ist der bestehende Ansatz einer Klassifizierung sowie die Möglichkeit eines Vergleichs von Lehm anhand eines quantitativen Parameters.

Die Bindekraft wird mit den Grobkornanteilen >2 mm ins Verhältnis gesetzt, da diese nicht in der Bindekraftprüfung erfasst werden. Weitere Parameter wie Schwindmaß, Druckfestigkeit und Plastizität werden im folgenden Vorschlag nicht berücksichtigt. Die Begründungen dieser Entscheidung sind in den jeweiligen Kapiteln zu finden.

Bezeichnung nach Bindekraft	Klassifizierung I (Bindekraft)	Klassifizierung II (nach Korngröße)			
		<10 %	>10 %	>25 %	(>50 %)
ggf. verwertbar	A	A - 0	A - 1	A - 2	A - 0
sehr mager	B	B - 0	B - 1	B - 2	B - 3
mager	C	C - 0	C - 1	C - 2	C - 3
fast fett	D	D - 0	D - 1	D - 2	D - 3
fett	E	E - 0	E - 1	E - 2	E - 3
sehr fett	F	F - 0	F - 1	F - 2	F - 3
Ton	G	G - 0	G - 1	G - 2	G - 3

Tab. 5.33 | Beispielhaftes Klassifizierungssystem

Tab. 5.33 zeigt einen Vorschlag der Klassifizierung zur geordneten Ablagerung sowie dem Austausch-szenario. Bei der Anlegung der Klassen nach der Bindekraft wurden die ‚im Allgemeinen nicht geeignet[en]‘ Lehme gemäß der *Lehmbau Regeln* aufgenommen. Grund dafür ist der gängige Einsatz dieser Materialien in der aktuellen Praxis. Der Grenzwert sollte daher nochmals neu evaluiert werden.

Der Vorschlag der Verwendung von Abkürzungen nach Buchstaben und Zahlen wurde aus der gängigen Praxis übernommen, wie es beispielsweise bei den Recycling-Baustoffen der Fall ist (siehe Kap. 2.5.2), da

diese praktikabler und besser differenzierbar sind als die ausgeschriebenen Bezeichnungen.

Basierend auf den vorliegenden Proben wurde versucht eine sinnvolle Unterteilung der Kornanteile >2 mm zu finden. Die 2-mm-Grenze wurde, wie bereits im entsprechenden Kapitel begründet, aufgrund des Ausschlusses größerer Körnung aus der Bindekraftprüfung gewählt. Ein weiterer Vorteil dieser Festlegung ist die oftmals verwendete Grenze für Lehmputz.

Aufgrund der regional einseitigen Probegewinnung gilt es die getroffene Einteilung nach prozentualer

Anteilverhältnisse in einen allgemeingültigen Kontext zu setzen und die Grenzen zu evaluieren. Zudem sollte analysiert werden, inwiefern die Wahl des Aufbereitungsverfahrens von dieser Angabe profitiert. Ein übergeordnetes Ziel der klassifizierten Ablagerung ist den gelagerten Baulehm unter Berücksichtigung einer möglichst effizienten sowie ressourcen- und energieschonenden Anwendung unterschiedlichen Aufbereitungsverfahrens zuzuführen.

Daher sind die Angaben zur Klassifizierung nach der Korngröße lediglich als Beispiel anzusehen, welches nachfolgend zur Auswertung der Prüfungen herangezogen wird.

Gemäß Tab. 5.34 ist demnach nur Probe P13 aufgrund des organischen Anteils nicht verwertbar. Deutlich wird die Relevanz der Analyse der Ausschlusskriterien, da diese im weiteren Verlauf nicht identifiziert werden können.

Bei der Probe P4 gilt es, nach dem jeweiligen Szenario zu reagieren; Ein erhöhter Salzgehalt hat bei klassifizierter Ablagerung die Möglichkeit durch Vermengung relativiert zu werden. Bei einer direkten Verwertung zum Baustoff müssten hierfür die zusätzlichen Ergebnisse hinzugezogen werden, um abzuschätzen, ob Zuschlagstoffe dies ausgleichen könnten. Da es sich um ein Material der Klasse E-0 handelt, ist die Wahrscheinlichkeit von erhöhter Zuschlagmenge gegeben. Bei statisch tragenden Bauteilen würde die benötigte Grobkörnung fehlen; Bei Lehmputz oder Ähnlichem müsste das Material aufgrund seiner Bindekraft und der schwach ausgeprägten Grobkörnung abgemagert werden.

Zu erkennen ist auch, dass einige Klassen weniger gut für den Lehmputz geeignet sind. Das sind vor allem die Lehme, welche an den „Enden“ der Klassifizierung stehen. Während aus Klasse G – 0 höchstwahrscheinlich nur Tonmehl hergestellt werden kann, ist es fraglich,

ob Klasse A – 3 genug Bindekraft für beispielsweise den Stampflehmputz aufweisen würde. Eine sortierte Lagerung würde die Mischung verschiedener Lehme zur Herstellung gewünschter Klassen erlauben, womit ein weiterer Vorteil dieses Szenarios deutlich wird. Zudem wäre die Herstellung mehrerer Ausgangsstoffe für verschiedene Lehmputzarten aus einem Material möglich.

Nachfolgend bleibt anzumerken, dass die Auswertung und der Versuch zur klassifizierten Ablagerung nur eine mögliche Vorgehensweise darstellt, die nur mehr potenzielle Ansätze aufweisen soll. Es ist in Betracht zu ziehen neue Parameter festzulegen oder bestehende Prüfverfahren an die Zielstellung anzupassen. So ist beispielsweise denkbar eine Prüfung der Bindekraft zu entwickeln, welche unabhängig vom Grobkorn für das ganzheitliche Material durchgeführt werden kann, beispielsweise durch Vergrößerung der Bruchfläche. Eine weitere Möglichkeit wäre die Festlegung spezifischer Parameter für geologische Untersuchungen im Rahmen der Ton- und Mineralanalyse.

Probe	Feldversuche		Salzgehalt	Bindekraft			Korngröße				Ergebnis
	Einschätzung	Organische Bestandteile		[g/cm ²]	Bezeichnung	Kl	>63 µm [%]	Lehmbau Regeln	>2 mm [%]	Kl	
P1	sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	keine Prüfung	497,27	Ton	G	3,00	schluffsandig	0,31	0	G - 0
P2	sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	keine Prüfung	378,93	Ton	G	3,07	schluffsandig	0,17	0	G - 0
P3	fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	unauffällig	337,40	sehr fett	F	18,34	schluffsandig	0,00	0	F - 0
P4	sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	erhöhter Sulfatgehalt	249,87	fett	E	2,57	schluffsandig	0,68	0	E - 0 (Sulfat!)
P5	fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	unauffällig	266,20	fett	E	19,71	schluffsandig	1,23	0	E - 0
P6	fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	unauffällig	92,07	mager	C	17,41	schluffsandig	6,82	0	C - 0
P7	sehr magerer Lehm, wenig Bindekraft	evtl. zersetzte organische Einschlüsse	unauffällig	nicht möglich		A	33,05	schluffsandig	0,13	0	A - 0 (evtl. Organik!)
P8	fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	unauffällig	54,40	sehr mager	B	15,36	schluffsandig	1,63	0	B - 0
P9	fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	unauffällig	53,93	sehr mager	B	19,40	schluffsandig	2,39	0	B - 0
P10	fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	keine Prüfung	400,13	Ton	G	57,52	schluffsandig	25,02	2	G - 2
P11	fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	keine Prüfung	465,27	Ton	G	42,46	schluffsandig	17,87	1	G - 1
P13	fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	Humusanteil	keine Prüfung	183,73	fast fett	D	31,74	schluffsandig	18,29	1	nicht geeignet (Humusanteil)
P14	fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	unauffällig	215,87	fett	E	16,51	schluffsandig	0,54	0	E - 0
P15	sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	unauffällig	204,53	fett	E	4,50	schluffsandig	0,27	0	E - 0
P16	sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	keine Prüfung	509,07	Ton	G	2,69	schluffsandig	0,24	0	G - 0
P17	sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	keine Prüfung	630,47	Ton	G	0,96	schluffsandig	0,09	0	G - 0
P18	fast fetter Lehm, hohe Bindekraft	kein Humusanteil	keine Prüfung	157,47	fast fett	D	Keine Prüfung				D - ?

Tab. 5.34 | Zusammenführung der Ergebnisse unter Auswertung nach beispielhafter Klassifizierung

5.9.2 Handlungsempfehlung

Anhand der durchgeführten Prüfungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen werden nachfolgend Ansätze einer Handlungsempfehlung aufgezeigt, welche es weiter zu erforschen und entwickeln gilt.

Im Bereich der Probenahme gilt es vertiefte Forschungen anzustellen, wie diese hinsichtlich der Verwertung im Lehmabau durchgeführt werden sollte. Dabei sollten die Aspekte der Aushubtiefe und des Aushubvolumens berücksichtigt und in eine sinnvolle Probenplanung eingebunden werden.

Die Durchführung der Prüfungen fokussierte sich auf zwei Aspekte: Die Identifizierung von Ausschlusskriterien und eine mögliche Klassifizierung von Aushub. Jede darauffolgende Prüfung würde baustoffspezifischen Rezepturenentwicklungen und Prüfungen dienen. Aufgrund der unterschiedlichen Zielstellungen dieser Verfahren sollte in Betracht gezogen werden die übergeordnete Begrifflichkeit „Eignungsprüfung von Baulehm“ neu zu definieren und gegebenenfalls sogar zu unterscheiden:

Im ersten Teil der Prüfung werden Ausschlusskriterien der Eignung des Rohmaterials untersucht, um das Vorliegen von Baulehm festzustellen. Auch die Klassifizierung von Baulehm nach definierten Eigenschaften würde sich vorrangig auf das Rohmaterial beziehen, da damit keine Aussagen über die baustoffspezifische Eignung von dem Baulehm getroffen werden. Daher wäre für diese Verfahren die Begrifflichkeit „Eignungsprüfung von Bodenmaterial / Aushubmaterial (oder Rohmaterial)“ zutreffender.

Der zweite Teil der Prüfung untersucht die Eignung von vorliegenden Baulehm für spezifische Baustoffe. Daher identifiziert sich dieser Teil eher mit der eigentlichen Bezeichnung der „Eignungsprüfung von Baulehm“.

Eignungsprüfung von Aushubmaterial

1. Auswertung vorliegender Informationen:

Die Auswertung geologischer Daten weist Lehmvorkommen nach, wonach sich in erster Linie gerichtet werden kann. Durch die Auswertung von historischen Daten zur Flächennutzung sind mögliche Schadstoffvorkommen im Boden einzuschätzen. Liegt ein Verdacht einer Belastung vor, gilt es zunächst umfangreiche Untersuchungen durchzuführen, die gemäß der *Deponieverordnung 2008* stattfinden könnte. Bei

Schadstoffvorkommen ist das Material nicht dem Lehmabau zuzuführen.

2. Überprüfen der Ausschlusskriterien:

Grundsätzlich sind die Ausschlusskriterien durch die Bestimmung der Organik, des Salzgehalts und Calciumhydroxid zu prüfen. Hierfür gilt es in groß angelegter Forschung festzulegen, ob diese zur grundlegenden Routine oder nur unter bestimmten Voraussetzungen zu untersuchen sind. Es wäre denkbar, die Bestimmung der Organik routinemäßig durchzuführen, während die Analyse von Salzgehalt sowie Calciumhydroxid bei Verdacht auf Belastung anfallen könnte. Zusätzlich könnten im Rahmen dieser auch Radonuntersuchungen angestellt und Schadstoffgehalte analysiert werden.

3. Klassifizierung nach lehmabauspezifischen Eigenschaften:

Bei Zuführung des Materials zu einer geordneten Ablagerung sind die Parameter Bindekraft und Korngrößenverteilung im Grobkornbereich für die Klassifizierung zu analysieren. Die Klassifizierung soll die Zusammenführung von gleichartigem Material bei der Ablagerung gewährleisten. Die Aufbereitung nach verschiedenen Materialeigenschaften ist ausschlaggebend für die klassifizierte Ablagerung und orientiert sich an den aktuellen technischen Möglichkeiten. Diese bewerkstelligen die Produktion unterschiedlicher Ausgangsstoffe für Baubaustoffe. Zudem könnten damit verschiedene Lehme ergänzend kombiniert werden. Liegt bereits ein konkreter Verwendungszweck vor, kann die Klassifizierung übergangen und direkt in die Rezepturenentwicklung und Baustoffprüfung übergangen werden.

Eignungsprüfung von Baulehm

Nach Identifizierung eines Baulehms gilt es diesen durch weiterführende Prüfungen wie Druckfestigkeit, Schwindmaß und Rohdichte auf dessen Eignung für bestimmte Lehmabaustoffe zu prüfen und Rezepturvorschläge für diverse Baustoffe anzugeben. Erste Tendenzen werden bereits durch die Ergebnisse der Klassifizierung durch die Bindekraftprüfung und die Bestimmung der Korngrößenverteilung im Grobkornbereich erkenntlich.

5.9.3 Erfahrungen und Erkenntnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit belief sich die Entscheidungsgrundlage für die Durchführung der Laborprüfungen anfänglich auf die fehlende Expertise der Verfasserin für die Bewertung der Feldversuche. Durch die Methodik der Forschung mit paralleler Aneignung von praktischer Erfahrung und theoretischem Wissen erwies sich als erfolgreich; ein „Gefühl“ für das Material zu entwickeln ist möglich – auch wenn es nicht mit den langjährigen Erfahrungen von Expert:innen zu vergleichen ist.

Während der Prüfungsvorbereitung drängte sich eine Thematik in den Fokus: Die unklare und zum Teil lückenhafte Informationslage zu Prüfungen, welche teilweise seit 80 Jahren nicht weiterentwickelt wurden und keine genormten Methodiken aufweisen. Es stellt sich zwangsläufig die Frage, wie ein Baustoff im heutigen Bauwesen bestehen soll, wenn die Informationslage und Prüfmethodiken im beschriebenen Zustand verweilen. Genormte Verfahren wurden in Deutschland im Jahr 1971 ersatzlos abgeschafft und trotzdem wird bis heute Bezug darauf genommen.

Gerne möchte man sich auf Gefühl und Sinnesindrücke verlassen, was im heutigen Bauwesen, das durch Grenzwerte und Nachweise geprägt ist, undenkbar ist. Durch die Präsenz des Baurechts ist Aushublehm aktuell tatsächlich nicht marktfähig. Wie sollte beispielsweise ein Schadensfall argumentiert werden, wenn sich der Lehm eindeutig zu einer Kugel hat formen lassen und im Kugelfalltest nur in einige wenige Stücke zerbrach? Aktuell übernehmen viele Lehmbaupraktiker:innen bei kleinen Bauvorhaben die Verantwortung für ihre Angaben, wodurch weder die Planung noch die Ausführung des Bauen mit Aushublehm attraktiv ausfällt.

Einige der durchgeführten Laborprüfungen sind recht zeit- sowie kraftaufwändig. Die Kosten der Verfahren fielen dagegen gering aus; Notwendige Gerätschaf-

ten sowie Materialien wären in einer zukünftigen Lehmprüfstelle recht überschaubar, insbesondere wenn für die chemischen Analysen bestehende Fachinstitute der Bodenprüfung im Rahmen der *DVO 2008* einbezogen werden könnten.

Die weit verbreitete Annahme, dass jede Person in der Lage sein sollte, Lehm zu bewerten, ist im heutigen Kontext recht naiv und erweist sich gemäß gesammelter Erfahrung als problematisch. Bei keinem anderen Baustoff wäre ein Laie in der Lage einen Baustoff zu bewerten. In Beton-, Holz-, und Ziegelbauweise sind geschulte Fachkräfte für diese Tätigkeiten zuständig und es ist nur verständlich, dass dies auch bei Lehm der Fall sein sollte.

Im Rahmen der Arbeit ergab sich viel Austausch sowie diverse Zusammenarbeiten mit verschiedenen Fach- und Forschungsbereichen der TU Wien und der BOKU. Lehm ist eine fachübergreifende Thematik, die nicht einseitig beleuchtet werden sollte. Die Einbindung bestehender Kenntnisse und Verfahren aus anderen Fachbereichen könnte sich positiv auf die Entwicklung von Lehm bzw. dessen Verwertung auswirken. Besonders von der Geologie, Mineralogie, Geotechnik sowie dem Feld der Betonprüfung könnte der Lehmbau nach eigenen Erfahrungen sehr profitieren. Die Kooperationen für die vorliegende Arbeit waren nicht nur eine große Hilfestellung bei der Durchführung, sondern zeigten interessante Ansätze für den Lehmbau auf, die es zu erforschen gilt.

Auch wenn die Durchführung der Eignungsprüfung von Baulehm zu Beginn nicht die Ausmaße des Aufwands erkennen ließ, war sie notwendig, um die Potenziale von Aushub bewerten zu können. Die Forschungspraxis resultierte in fachübergreifenden Eindrücken der Materialprüfung und einem tiefgehenden Verständnis für Lehm als Aushub.

5.9.4 Ausblick

In aktuellen Debatten wird die Verwertung von lehmhaltigem Aushub oft thematisiert. Auch die Erstellung einer Norm zur Bewertung von Aushubmaterial und dessen potenzielle Verwertung im Lehmabau wird derzeit in Österreich forciert.

Hierzu ist ein geregeltes Verfahren zur Prüfung von Aushubmaterial alternativlos. Einige der Feldversuche sind normiert und bewähren sich in der Praxis aufgrund der recht einfachen Durchführung. Da es sich bei den Ergebnissen nicht um quantifizierte Werte handelt, ist eine Auswertung mit verlässlichen Angaben problematisch - insbesondere hinsichtlich der Aushubverwertung im großmaßstäblichen Bauen. Ein großes Defizit in genormten Verfahren weisen die Laborprüfungen auf. Dabei spielen unterschiedliche Aspekte in die bestehende Problematik mit ein. Beispielsweise fand der Salzgehalt lange Zeit keine Beachtung im Lehmabauherstellung, da die Hochkultur des Lehmabaus Mitte des 20. Jahrhunderts noch nicht über die benötigten Techniken zu dessen Analyse verfügte. Auch die Prüfung von organischen Bestandteilen im Lehm wurde und wird stark vernachlässigt. Folgerichtig gibt es die Möglichkeit diese anhand eines Geruchs zu beurteilen und darüber recht zuverlässige Aussagen zu treffen, jedoch ist die Nachweisführung kritisch. Sicherlich ist durch eine sachgemäße Aushebung diesbezüglich viel zu erreichen, doch unterscheiden sich die Baustellenverhältnisse in der heutigen Baukultur im Vergleich zur damaligen. Auf einer aktuellen Großbaustelle kann vielleicht nicht immer sortenrein ausgehoben oder durch Zwischenlagerungen organische Bestandteile nicht vermieden werden. Es ist daher notwendig Parameter für diese Ausschlusskriterien festzulegen, auch wenn es nur einer rechtlichen Absicherung dient. Besonders die Einbindung chemischen Analysen im Rahmen der *DVO 2008* weisen bezüglich potenzieller Ausschlusskriterien bereits routinierte Normverfahren auf, welche sich gezielt auf Bodenaushubmaterial beziehen. Diese könnten auf deren Aussagekraft im Lehmabau untersucht und gegebenenfalls spezifische Grenz- und Richtwerte entwickelt werden.

Die Bindekraftprüfung nach Niemeyer ist ein veraltetes Verfahren, jedoch in seiner Art einzigartig im Lehmabau. Niemeyer strebte eine Klassifizierung an, mit welcher Aussagen für die Eignung für einen Lehmabau einhergehen sollten. Zweites war allerdings nicht ohne Erfahrungswerte möglich. Dennoch ist durch sein Verfahren eine Klassifizierung anhand quantifizierter Werte entstanden. Die Kritik, dass die Bindekraftprüfung nicht alle bauphysikalischen Aspekte eines späteren Lehmabaustoffes berücksichtigt, ist gerechtfertigt; Gleichzeitig hat Niemeyer ein Verfahren entwickelt, welches unterschiedliches Material nach einem Parameter vergleichbar macht. Prüfungen wie beispielsweise die Druckfestigkeit werden von vielen verschiedenen Aspekten beeinflusst. Der Ursprung dieser bauphysikalischen Größe ist nicht ohne weitere Prüfungen analysierbar. Ohne Frage benötigt das Verfahren Anpassung an den technischen Stand, da Durchführung sowie Abhängigkeiten von äußeren Einflüssen beeinträchtigend wirken, dennoch ist das Potenzial zur Weiterentwicklung vorhanden. Der Kritik des Ausschlusses der tatsächlichen Korngrößenverteilung sollte sich angenommen werden und in die Klassifizierung einbezogen werden. Ob die Klassifizierung für eine geordnete Ablagerung nach Bindekraft und Bestimmung der Korngrößenverteilung im Grobkornbereich möglich ist, gilt es weiter zu erforschen. Weitere Problemstellungen und mögliche ergänzende Parameter sollten herausgearbeitet werden.

Generell ist es notwendig aktuelle Techniken und moderne Verfahren auf ihre Eignung im Lehmabau zu prüfen und gegebenenfalls einzubinden. Diese könnten sich positiv auf den Zeit- und Arbeitskraftaufwand der Eignungsprüfung von Baulehm auswirken, womit ein Schritt in Richtung Lehm als massentauglicher Baustoff gemacht wäre.

Vor allem benötigt es mehr Forschung und Entwicklung im Gebiet der Eignungsprüfung von Baulehm, da dies die Grundlage für eine effiziente Nutzung des Rohmaterials darstellt und bei guter Entwicklung einen besonderen Mehrwert im Vergleich zu anderen Baustoffen liefert.



Abb. 5.135 | Impression (Proben P15 - P17, Kurbadstraße)

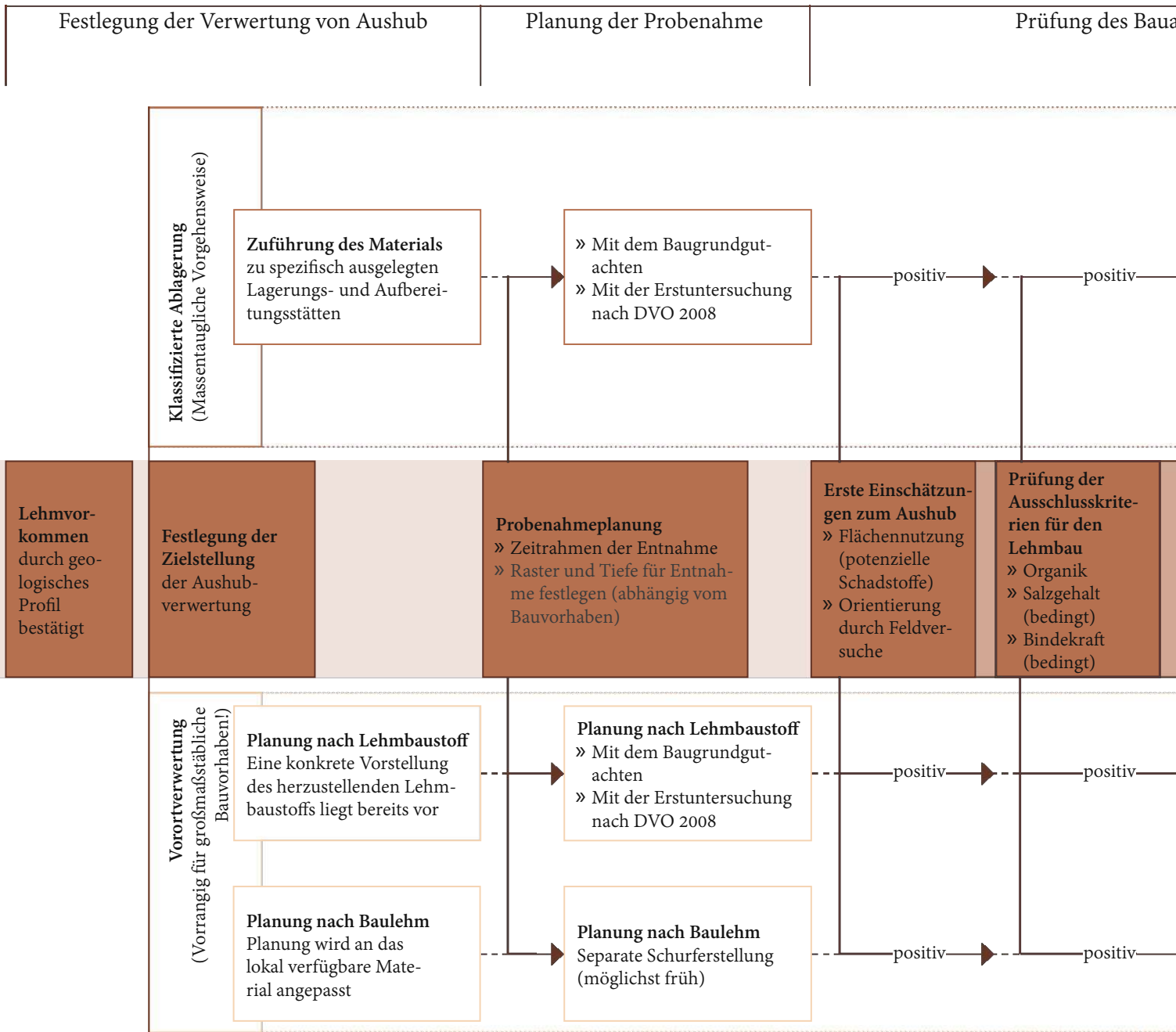






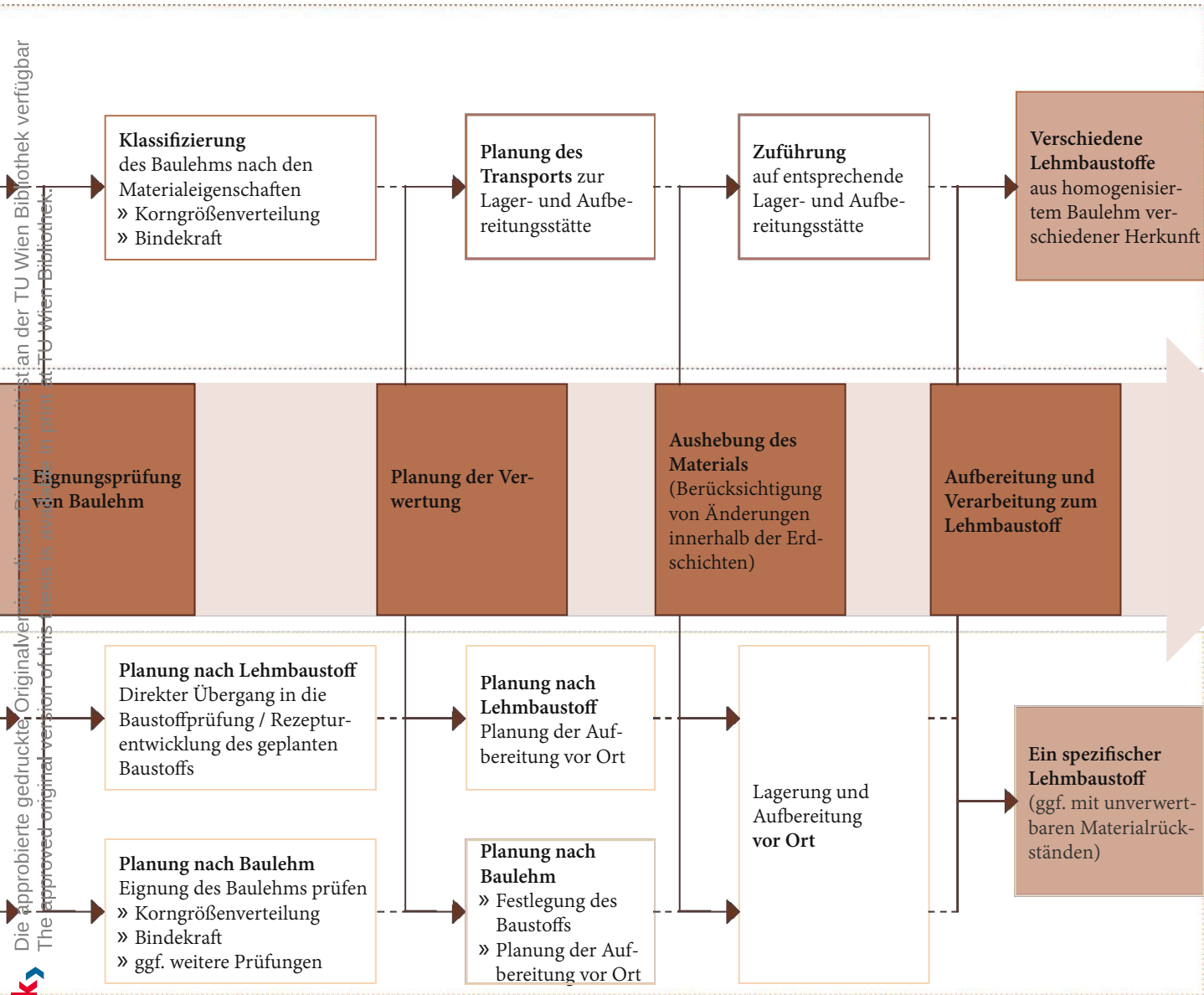


6. Conclusio



Leitfaden für die mögliche Verwertung von Aushubmaterial im Lehmbau

Aushubs (in situ)	Aushub in der Planung	Verwertung des Baulehms
-------------------	-----------------------	-------------------------



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Publikation ist in der Bibliothek der TU Wien verfügbar.
 The approved original version of this publication is available in the TU Wien library.

In aktuellen Debatten über den zukünftigen Lehm-bau wird die Verwertung von lehmhaltigem Baustellenaushub vermehrt thematisiert. Der derzeitige Materialbedarf für industriell gefertigte Baustoffe wird von Lehmgruben gedeckt. Im Rahmen kleinerer Bauvorhaben wird Aushub vor Ort verwertet, oftmals unter Risikoübernahme der Planer:innen und Ausführenden.

Der zunehmende Einsatz von Lehmstoffen ist ein Fortschritt, den es alternativlos zu fördern gilt. Der Wandel der Lehmbranche vom romantisierten Handwerk zum Industriezweig ist eine positive Entwicklung, welche die Integration der Lehmstoffe in das derzeitige Baugeschehen begünstigt und damit deren großflächigen Einsatz ermöglicht. Die aktuelle Entstehung einer Lehmindustrie bietet Möglichkeiten zur vollen Potenzialausschöpfung im Bereich der Nachhaltigkeit, die über die Herstellung von ökologischen Materialien hinaus gehen.

Derzeit bezieht die Branche Baulehm hauptsächlich aus Lehmgruben, während Bauaushub auf Deponien abgelagert wird. Eine Zusammenführung dieser beiden Aspekte hätte das Potenzial, den Energieaufwand durch die resultierende doppelte Aushebung zu vermindern. Der erhöhte Flächenbedarf für die Lehmgewinnung und die Deponierung von Aushub könnte stark reduziert werden, während eine Verringerung der Massenbewegung die CO₂-Emissionen senken würde. Zudem könnte der Baurohstoffknappheit durch Förderung der Ressourcenschonung entgegen gewirkt werden. Die Abfallvermeidung würde durch die Reduktion von deponiertem Aushub und durch die Herstellung von komplett recyclebaren Baustoffen begünstigt werden.

Die Verwertung von Aushub ist im historischen Kontext keine Seltenheit. Bedeutende Bauten in Wien entstanden aus ihrem eigenen Untergrund. Die Ausprägung verschiedener Lehmtechniken im regionalen Kontext wurde oftmals durch den lokalen Lehm bestimmt. Aktuelle Aufbereitungstechniken bieten nun neue Ansätze der gesamtheitlichen Verwertung von Lehm und schaffen mehr Flexibilität in der Nutzung. Die Abhängigkeiten und Beschränkung der Möglichkeiten durch das lokale Material sind dadurch nicht mehr gegeben. Während einige Bauprojekte von der Vorortnutzung des Materials profitieren, nehmen sich erste Unternehmen der Anlegung großmaßstäblicher Strukturen für die Aushubverwertung an. Diese bringt einige Herausforderungen mit sich.

„Das Ziel muss sein, dass man den Aushub nicht als Abfall, sondern als Wertstoff sieht.“⁴

Martin Rauch, Gründer von Lehm Ton Erde

Im Jahr 2021 fielen in Österreich etwa 46 Mio. Tonnen Aushub durch Bauprojekte an. Bei knapp 90 Prozent davon handelte es sich um „nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial“. Dennoch wird Bauaushub entsprechend den gesetzlichen Regelungen der Abfallwirtschaft zugeführt, was derzeit etwa 60 Prozent des gesamten österreichischen Abfallaufkommens ausmacht. Mehr als die Hälfte des gesamten Aushubmaterials wird auf den annähernd 1.000 österreichischen Bodenaushubdeponien beseitigt. Das verbleibende Material wird der Untergrundverfüllung, Rekultivierungsschichten und Behandlungsanlagen zugeführt, während sich die drittgrößte Position der Aushubverwertung und -beseitigung mit über 5 Mio. Tonnen im Jahr 2021 undokumentiert den Statistiken entzog.

Die Deponierung von Aushubmaterial fällt keineswegs anspruchslos aus. In 33 verschiedenen ÖNORMen sind Prüfverfahren definiert, die im Zuge einer Ablagerung des Materials durch Fachanstalten durchgeführt werden müssen. Durch diese Verfahren erhält der Abfall ‚nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial‘ sogar unterschiedliche Qualitätsklassen, die den korrekten Umgang bei der Deponierung, der Verfüllung oder der Anlage von Rekultivierungsschichten definieren. Diese Klassifizierung gibt wiederum hilfreiche Hinweise auf die Verwertbarkeit im Bauwesen. Entsprechend dieser Qualitätsklassen beziehen derzeit Recycling-Baustoffe ihre Gesteinskörnung für Schüttungen, Beton und Asphalt aus Bodenaushub. Dem Aushubmaterial seine Abfalleigenschaft zu entziehen, steht jedoch vor enormen Herausforderungen. Aushub bleibt bis zum Moment der tatsächlichen baulichen Verwendung ein Abfallprodukt. Durch die bloße Herstellung eines Baustoffes ist das Abfallende für Aushub nicht gegeben. Daraus resultierend ist die Durchführung von Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozessen auf einige wenige berechnete Abfallbehandelnde limitiert. Daher ist die Verwertung von Aushub in Recycling-Baustoffen wie Beton oder Asphalt bereits schwer zu bewerkstelligen. Ein Abfallende für Aushubmaterialien im Lehmbau ist diesbezüglich derzeit nicht vorstellbar.

Dabei ist das Bewusstsein für die Potenziale der Aushubverwertung schon seit einigen Jahrzehnten in nationalen Berichten, Planungen und Strategien vorhanden. In Dokumenten, wie der *Österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie*, dem *Masterplan Rohstoffe 2023* oder dem *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023* wird die Verwertung von Aushubmaterialien hypothetisch behandelt und empfohlen. Die theoretischen Auseinandersetzungen werden dennoch nicht zu konkreten Lösungsansätzen formuliert. Mögliche Strategien zur Vermeidung einer Abfalleigenschaft für verwertbares Aushubmaterial oder für eine vereinfachte Einleitung des Abfallendes werden nicht weiterentwickelt. Es scheint eine Herausforderung zu sein, für den mit Abstand massenreichsten Abfallstrom Österreichs gesonderte Regelungen zu schaffen. Gerade dieser Abfall bietet jedoch viel Potenzial für aktuelle Problemstellungen der Baubranche.

Folgerichtig ist nicht das gesamte Aushubvorkommen Österreichs für lehmbautechnische Zwecke geeignet. Welche materialbedingten Potenziale Aushub für den Lehmbau tatsächlich umfasst, ist von unterschiedlichen Parametern abhängig. Die Basis bilden geologische Kenntnisse zu Lehmvorkommen, wodurch erste Prognosen für das Anfallen von lehmhaltigem Aushub in definierten Regionen erstellt werden können. Die Molassezone erstreckt sich über Oberösterreich und Niederösterreich. Zum inneralpinen Becken zählen das Weinviertel, das Wiener Becken, das Burgenland und die Steiermark. Auch Vorarlberg verfügt über Lehmvorkommen. Grundsätzlich ist Lehm eine variierende Zusammensetzung aus Verwitterungsprodukten von Gesteinen. Im Lehmbau begeistert das Material durch seine natürliche Einfachheit, die weder Chemie noch Brennvorgänge für den baulichen Einsatz erfordert. Die Bindekraft ist (be)greifbar. Auf Nanoebene bildet sich dagegen ein recht komplexes Material ab. Tonminerale sind so vielfältig, dass sie eine eigene Wissenschaft ausbilden – die Tonmineralogie. Diese findet vermehrt Aufmerksamkeit in der Lehm-baubranche und bringt neue Erkenntnisse zu der Materialität.

Die Frage, wann Aushubmaterial für den Lehm-bau verwertbar ist und für welche Techniken es sich eignet, wurde bereits in der Historie des Lehm-baus thematisiert. Durch die geschichtliche bedingte

Vernachlässigung der Lehm-baubranche und ihrer Forschung ist die Antwort bis heute nicht eindeutig oder allgemeingültig. Die Ausgangslage für die Aushubverwertung im modernen Lehm-bau unterscheidet sich allerdings vom historischen Kontext und erfordert neue Perspektiven für die Materialprüfung. Dafür müssen zunächst realistische Einsatzmöglichkeiten für Aushubmaterial definiert werden. In der Praxis bilden sich diesbezüglich Szenarien ab, die sich aus aktuellen Ansätzen und Visionen künftiger Möglichkeiten zusammensetzen.

Die direkte Vorortverwertung von Aushub wird in aktuellen Pilotprojekten angewendet und erhält viel Zuspruch. Da die Baustoffherstellung durch die heutigen technischen Möglichkeiten weniger stark an den vorliegenden Lehm gebunden ist, bildet sie aber nicht immer die effektivste Verwertungsmöglichkeit ab. Zwar werden Transportwege eingespart, dennoch können je nach angestrebten Lehm-baustoff große Mengen an zu transportierenden Zuschlagstoffen oder aufwändige Aufbereitungsprozesse erforderlich sein, um den lokalen Lehm aufzubereiten. Zusätzlich setzt die Vorortverwertung das Vorhandensein von Flächen für die Zwischenlagerung und Aufbereitung voraus, was im urbanen Kontext problematisch ist. Die Aufbereitungsprozesse sind durch die direkte Verwertung vor Ort oftmals limitiert – natürliche, energiearme Prozesse benötigen in der Regel einen längeren Zeitraum, welcher im laufenden Baubetrieb oftmals nicht gegeben ist. Ausnahmen bilden Projekte ab einer gewissen Dimension, wie beispielsweise das geplante Stadtviertel in Rothneusiedl in Wien. Die Vorortverwertung von Bauaushub würde sich dabei wiederum effizient gestalten. Aktuellen Bauprojekten, welche den Bauaushub direkt nutzen, ist dennoch nicht ihre Anerkennung abzusprechen - im Gegenteil: diese Projekte sind mutige Ansätze von Visionär:innen, die sich aktueller Möglichkeiten bedienen und damit über die gewohnten Grenzen des Bauwesens hinausgehen.

„[...] es geht darum, ein Szenario aufzuzeichnen, das weg geht vom kleinen Bauplatz und zu einem Kreislaufsystem wird [...].“²

Christoph Liebrich

2 Interview, Christoph Liebrich

Geht man über diese Anfänge hinaus, bilden sich neue Möglichkeiten des großmaßstäblichen Bauens mit Aushub ab. Denkbar wäre eine klassifizierte Ablagerung von lehmhaltigem Aushub mit entsprechenden Aufbereitungsanlagen. Damit könnte Lehm zeit- und ortsunabhängig genutzt werden und eine materialgerechte Aufbereitung und Verwertung erfahren – möglicherweise unter Verwendung aktueller Strukturen der Bodenaushubdeponien. Weitere Vorteile könnten sich aus einer Massenaufbereitung ergeben, die sich auch in anderen Baustoffindustrien abbilden. Potenzieller Baulehm im Aushubaufkommen sollte daher geprüft werden. Der derzeitige Stand der Technik im Lehmbau weist eine Reihe von Prüfverfahren auf, die sich grundlegend unterscheiden. Zunächst gilt es zwischen den recht entwickelten Methoden der Lehmbaustoffprüfung und der grundsätzlichen Eignungsprüfung von Baulehm zu unterscheiden. Letztere befasst sich mit dem natürlichen Rohmaterial und würde daher für die Prüfung von Aushub in Frage kommen. Die Eignungsprüfung von Baulehm ist wiederum in Feldversuche, die vor Ort durchgeführt werden können, und Laborprüfungen unterteilt. Die Feldversuche werden derzeit von einigen wenigen Lehmbauexpert:innen durchgeführt, die in der Lage sind, diese korrekt einzuordnen und dementsprechende Aussagen zum vorliegenden Material zu treffen. Ein „Gefühl“ für die Materialität Lehm zu entwickeln, ist mit Praxisbezug erlernbar und sehr hilfreich. In einer auf Zahlen und Fakten basierenden Bauindustrie werden solche Methoden schnell als unprofessionell und nicht massentauglich angesehen. Kein anderer Rohstoff wird im aktuellen Baukontext mit einfachen Handverfahren ohne quantitative Ergebnisse geprüft. Die Ansicht, dass einfache Tests ausreichend seien, suggeriert eine nicht gerechtfertigte Banalisierung des Lehms als Baustoff. Auch hinsichtlich der Rechtsgebundenheit des großmaßstäblichen Bauens eignen sich Feldversuche nicht und verlagern die Verantwortung für die Aushubverwertung oftmals zu Lasten der Lehmbauexpert:innen. Die in der Fachliteratur angeführten Laborprüfungen bedürfen intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Optimierungen in den Bereichen Informationslage, Vergleichs- oder Grenzwerte und genormte Prüfmethode würden die Anwendung der Verfahren im Lehmbau erleichtern. Zudem gilt es, bei einigen Verfahren eine Praxistauglichkeit hinsichtlich des Stands der Technik zu entwickeln.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde für die Durchführung der Eignungsprüfung von Baulehm zunächst eine Vorgehensweise festgelegt, welche idealerweise vor der eigentlichen Aushebung stattfinden sollte.

Die Feststellung von Lehmvorkommen bildet das erste Kriterium. Die Analyse der geologischen Gegebenheiten stellt damit die Grundlage für das weitere Vorgehen dar. Informationen zu vorhergehenden Flächennutzungen geben Hinweise auf mögliche Verunreinigungen im Boden und bieten damit eine Entscheidungsgrundlage für entsprechende Maßnahmen. Die Anordnung einer Schadstoffanalyse stellt beispielsweise im Rahmen der Bodenaushubdeponierung ein gängiges Verfahren dar und könnte mit notwendigen Parametern aus dem Lehmbau ergänzt werden. Für eine erste Einschätzung des Rohlehms können zudem ergänzend Feldversuche vor Ort durchgeführt werden.

Anschließend sollten Ausschlusskriterien untersucht werden. Organische Bestandteile werden derzeit mit Riechversuch ermittelt und wären dringend auf zeitgerechte Methoden umzustellen. Anhaltspunkte dafür finden sich in der Untersuchung für die Deposition wieder. Erhöhte bauschädliche Salzgehalte werden im Rahmen dieser Untersuchung ebenfalls durchgeführt und erfordern entsprechend angepasste Grenzwerte mit möglichen Verwertungsbedingungen für den Lehmbau. Gesonderte Untersuchungen sind ebenfalls denkbar, wie beispielhaft im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt wird. Zusätzlich könnte die aktuell brisante Thematik der Radonbelastung in diesem Zuge analysiert werden. Bei der Feststellung von Ausschlusskriterien ist es dennoch von Relevanz, Aushubmaterial als Komponente eines Lehmbaustoffs zu betrachten. Die Kriterien sind entsprechend der Verwertung auszurichten, um die Ausgrenzung von nutzbarem Material zu verhindern.

„Es ist [...] in den meisten Fällen eine Frage des Aufwandes für die Aufbereitung und nicht der generelle Einsatz.“⁵

Christof Ziegert

Nach Feststellung eines geeigneten Baulehms differenziert sich die Vorgehensweise für die klassifizierte Ablagerung vom Verfahren der Vorortverwertung. Letztere zielt oftmals auf eine unmittelbare Baustoffherstellung ab und bedient sich daher direkt den Lehmbaustoffprüfungen. Für die sortierte Ablagerung von Baulehm aus Aushub müssten hingegen Klassen definiert werden. Während bisherige Versuche darauf abzielten, allgemeingültige Rezepturen für klassifizierten Baulehm zu bestimmen, wäre es sinnvoll nun den Fokus auf die Aufbereitung und die Verwertungsprozesse zu legen. Ziel ist es, den Baulehm möglichst effizient zu nutzen. Hypothetisch betrachtet ist das Einsatzfeld durch entsprechenden Aufbereitungsaufwand und Zuführung relevanter Zuschlagstoffen kaum eingeschränkt. Eine nachhaltige Verwertung von Baulehm bedeutet jedoch oftmals, dass aus einem Ausgangsstoff verschiedene Lehmbauprodukte hergestellt werden können.

In der vorliegenden Arbeit wurde für die Klassifizierung ein beispielhaftes Vorgehen angeführt. Es bedient sich der Ermittlung der Bindekraft, welche bei Ausbleiben ein Ausschlusskriterium bilden kann, sowie der ergänzenden Bestimmung von Fein- und Grobkornanteilen. Die Grobkörnung wird detail-

lierter aufgeschlüsselt, da die Materialanteile für die Aufbereitungsprozesse relevant sind.* Es bedarf allerdings umfangreicher Forschung und angemessenem Realitätsbezug für die tatsächliche Anlegung einer Klassifizierung für Baulehm. Potenzielle Ansätze sind in den Methoden der Eignungsprüfung von Baulehm bereits vorhanden und benötigen zur Praxistauglichkeit eine Anpassung an den Stand der Technik.

Die Verwertung von Aushub im Lehmbau könnte sich mit dessen Etablierung im aktuellen Baugeschehen entwickeln und heranwachsen. Lehm als Baustoff bietet bereits einzigartige Möglichkeiten für ein nachhaltiges Bauwesen - die Rohstoffgewinnung für Lehmbau mag über ebenso wertvolle Potenziale verfügen. Die Nutzung dieser Potenziale könnte sich vielfältig in unterschiedlichen Bereichen derzeitiger Problemstellungen gewinnbringend auswirken. Die Potenziale der Aushubverwertung im modernen Lehmbau sind derzeit jedoch nur in Ansätzen erkennbar. Anstatt Lehm in bestehende Strukturen zu zwingen, gilt es diese Potenziale weiter zu verfolgen und materialpassend auszulegen. Damit könnte ein wertvoller Beitrag zur alternativlosen Bauwende geleistet werden.

* mehr dazu s. Auswertung von Kap. 05

Lehm ist ebenfalls zu 100 Prozent wiederverwendbar - das Cradle-to-Cradle-Prinzip ist bei Lehm komplett umsetzbar. Ich könnte den Stampflehm, den wir hier verwenden, theoretisch wieder aufbereiten und könnte damit wieder bauen. Es gibt sonst keinen Baustoff, aus dem ich wieder genau das Gleiche daraus bauen kann - nur durch Aufbereitung.

Jörg Meyer,
Inhaber von Conluto® - Vielfalt aus Lehm

Ich sehe das größte Potential in einem angemessenen Umgang mit unseren zur Verfügung stehenden Ressourcen und an diesen Punkt müssen wir kommen. Die Verwendung von Lehm im Bauwesen als gleichgestellter Baustoff spielt dabei eine wichtige Rolle. Es ist nur noch die Frage, wie man es sinnvoll organisiert.

Christof Ziegert,
ZRS Architekten und Ingenieure

[...] Es gibt keinen Grund, warum dieses Material nicht als Recycling-Baustoff verwenden sollte. [...] Wir haben eigentlich eher politische Probleme, dass zum Beispiel die Rohstoffindustrie keine verstärkten Interessen hat. Genehmigte Gruben für Mineralrohstoffe haben Auflagen, Genehmigungen und Beschränkungen. Wenn nun nebdran eine Baugrube entsteht und das ausgehobene Material ohne irgendwelche Genehmigung verkauft wird, gibt es Probleme mit der Rohstoffindustrie, würde ich sagen. Aber grundsätzlich ist es das gleiche Material und es gibt überhaupt keinen Grund, warum man das nicht technisch aufbereiten sollte. Es ist eher die Frage der Organisation: Führt man das Material in stationäre Anlagen? Die müssten natürlich die Genehmigungen für die Schlüsselnummern und die entsprechenden Technologien haben. Grundsätzlich ist aus meiner Sicht alles möglich und es sollte stark gefördert werden.

Martin Car,
Österreichischer Baustoff-Recycling Verband

Das Problem ist, dass der Bausektor immer noch linear ist - den Kreislauf gibt es so noch nicht. Aber es gibt immer mehr Ansätze, mit denen man die Gerade zu einem Kreis biegen will, was jedoch noch Zeit braucht. Ich glaube, es bedarf bestimmten Druckmechanismen für die Kreislaufwirtschaft (ohne die Scheinverwertung zu fördern). Teil davon sollte auch die Verwertung von Aushub sein, was jedoch in Einklang mit der bestehenden Wirtschaft gebracht werden muss – zum Beispiel, dass der/die Primärproduzent:in auch Abfallbehandler:in ist. Dafür müsste der Umstand beseitigt werden, dass Material, welches aus diesen Prozessen entsteht, kein Abfall ist. [...]

**Roland Starke,
Klimaministerium,
Abteilung Abfallvermeidung und Verwertung**

Es ist ein Riesenpotenzial da, das damals schon genutzt - und dann vergessen wurde. Es wurden viele Umwege gemacht aufgrund von Kapitalismus und Profitgier; Die Optimierung von Prozessen Richtung Kapital und Gewinn; Die Erschaffung einer Aktiengesellschaft, deren Aktionäre befriedigt werden müssen. Wir müssen diesbezüglich wieder ein bisschen zurückgehen.

**Franz Ottner,
Universität für Bodenkultur Wien,
Institut für angewandte Geologie**

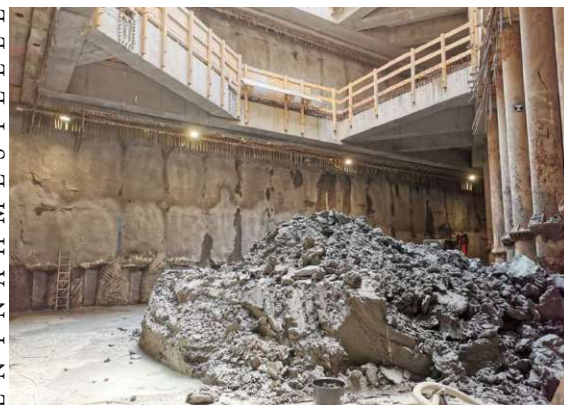
Für uns ist die Wiederverwertung von Bodenaushub lukrativer als das Deponieren. Für das Ablagern bezahlen wir und sind für die folgenden 10 Jahre für regelmäßige Prüfungen sowie die Etablierung einer sinnvollen Nachnutzung verantwortlich. Wenn wir den Aushub verkaufen, ist das für uns eigentlich besser.

**Christopher Jakubiec,
Abfallwirtschaftsbeauftragter der
Firma Hans-Heimo Gänger GmbH**



7. Anhang

M A T E R I A L B I L D
E N T N A H M E S T E L L E



Probe P1 | U2-Baustelle Bacherplatz

Der U-Bahn-Ausbau der Linie U2 soll aufgrund wachsender Bevölkerungszahl in Wien bis zum Jahr 2028 fertiggestellt werden.
Das Material am Bacherplatz wurde während einer Baustellenbegehung in 20 Metern Tiefe zur Oberfläche gewonnen.

Projekt	U-Bahn-Ausbau
Adresse	Bacherplatz, 1050 Wien
Entnahmetiefe	20,0 m
Datum Entnahme	17.05.2023
Projektstand	Baubetrieb
Verwendungszweck	Deponierung

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Wohnmischgebiet
1991	Wohnmischgebiet
2001	Wohnmischgebiet
2005	Wohnmischgebiet
2007	Wohnmischgebiet
2012	Wohnmischgebiet
2020	Wohnmischgebiet

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, sehr leichte Abflachung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich nicht zerdrücken

Einschätzung Bindekraft **Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft**

Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Waschversuch	Seifig, schweres Ablösen

Einschätzung Schluff / Ton **Tonig**

Mineralgerüst Feinkörnig

Riechversuch Farbbestimmung	Geruchslos, leicht metallisch Hellgrau, sehr homogen
--------------------------------	---

Einschätzung Organik **Kein Humusanteil**

Bei dem vorliegenden Material wird ein sehr hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine sehr hohe Bindekraft.
Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Bei der vorliegenden Probe ist aufgrund der Flächen-nutzung kein Verdacht auf eine erhöhte Salzbelastung gegeben.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, langanhaltendes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen sehr hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

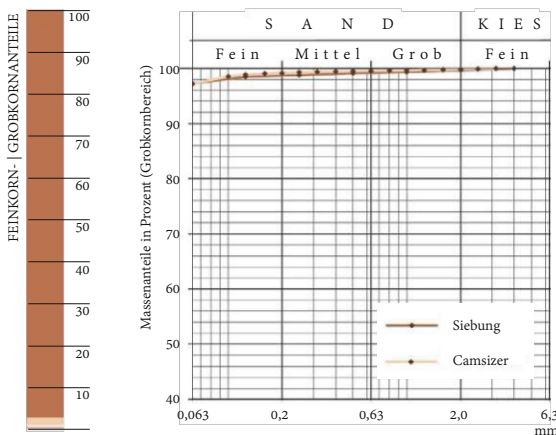
Bezeichnung	Ton
Bindekraft	497,27 g/cm ²
Standardabweichung	9,45 g/cm ²
Masse beim Bruch	2.486,33 g
Abweichung der Prüfkörper	4,35 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde ein Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um Ton.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiegung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um sehr feinkörniges Material mit 97 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	97,0 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	1,7 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	0,6 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,5 %
Gr	>2,0 mm	0,3 %

ERGEBNIS

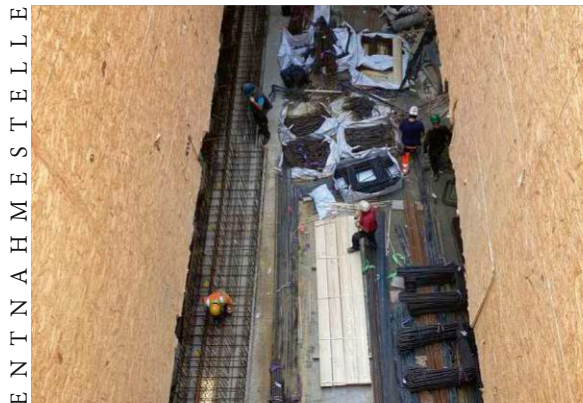
Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehm-bau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine sehr hohe Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Er sollte vorrangig einer Nassaufbereitung (Mauken, Sumpfen, Quirlen) oder dem Mahlen (getrocknet) unterzogen werden. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse G-0, was Ton mit einer Bindekraft von >360 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

<p>Probe P2 U2-Baustelle Siebenbrunnengasse</p> <p>Der U-Bahn-Ausbau der Linie U2 soll aufgrund wachsender Bevölkerungszahl in Wien bis zum Jahr 2028 fertiggestellt werden. Das Material wurde aus dem an die Oberfläche beförderten Aushub von 18 Metern Tiefe zur Oberfläche gewonnen.</p>	Projekt	U-Bahn-Ausbau
	Adresse	Ecke Siebenbrunnengasse / Stöbergasse, 1050 Wien
	Entnahmetiefe	18,0 m
	Datum Entnahme	30.05.2023
	Verwendungszweck	Deponierung

<p>GEOLOGISCHES PROFIL</p> <p>Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton</p> <p>FLÄCHENNUTZUNG</p> <p>1981 Wohnmischgebiet 1991 Wohnmischgebiet 2001 Wohnmischgebiet 2005 Wohnmischgebiet 2007 Wohnmischgebiet 2012 Wohnmischgebiet 2020 Wohnmischgebiet</p>
--

FELDVERSUCHE	
Kugelformtest	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, sehr leichte Abflachung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich nicht zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Waschversuch	Seifig, schweres Ablösen
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig
Mineralgerüst	Feinkörnig
Riechversuch Farbbestimmung	Geruchslos, leicht metallisch Hellgrau, sehr homogen
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil
<p>Bei dem vorliegenden Material wird ein sehr hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine sehr hohe Bindekraft. Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.</p>	



SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Bei der vorliegenden Probe ist aufgrund der Flächen-nutzung kein Verdacht auf eine erhöhte Salzbelastung gegeben.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, kurzandauerndes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

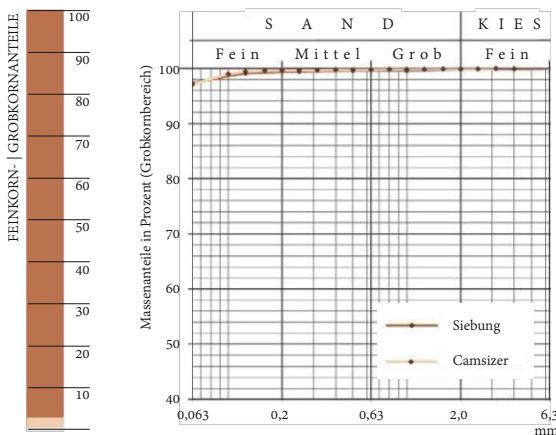
Bezeichnung	Ton
Bindekraft	378,93 g/cm ²
Standardabweichung	17,64 g/cm ²
Masse beim Bruch	1.894,67 g
Abweichung der Prüfkörper	9,69 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde zwei Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um Ton.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiegung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiegung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um sehr feinkörniges Material mit 97 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	96,9 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	2,4 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	0,3 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,2 %
Gr	>2,0 mm	0,2 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehm-bau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine sehr hohe Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Er sollte vorrangig einer Nassaufbereitung (Mauken, Sumpfen, Quirlen) oder dem Mahlen (getrocknet) unterzogen werden. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse G-0, was Ton mit einer Bindekraft von >360 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

M A T E R I A L B I L D
E N T N A H M E S T E L L E



Probe P3 | U2-Baustelle Stiftgasse

Der U-Bahn-Ausbau der Linie U2 soll aufgrund wachsender Bevölkerungszahl in Wien bis zum Jahr 2028 fertiggestellt werden.
Das Material wurde während einer Baustellenbegehung in 12,5 Metern Tiefe zur Oberfläche gewonnen.

Projekt	U-Bahn-Ausbau
Adresse	Stiftgasse Höhe Haus-Nr. 1-3, 1070 Wien
Entnahmetiefe	12,5 m
Datum Entnahme	21.06.2023
Projektstand	Baubetrieb
Verwendungszweck	Deponierung

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Dichtes Wohnmischgebiet
1991	Dichtes Wohnmischgebiet
2001	Dichtes Wohnmischgebiet
2005	Dichtes Wohnmischgebiet
2007	Dichtes Wohnmischgebiet
2012	Dichtes Wohnmischgebiet
2020	Dichtes Wohnmischgebiet

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Gut formbar, kaum Linienbildung
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, leichte Abflachung, wenig Rissbildung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich schwer zerdrücken

Einschätzung Bindekraft **Fetter Lehm, hohe Bindekraft**

Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Waschversuch	Seifig, langsames Ablösen

Einschätzung Schluff / Ton **Tonig**

Mineralgerüst Feinkörnig, sandig

Riechversuch Geruchslos, leicht metallisch
Farbbestimmung Okkafarben (gelblich) mit hellgrauen Tonstücken

Einschätzung Organik **Kein Humusanteil**

Bei dem vorliegenden Material wird ein sehr hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine hohe Bindekraft.
Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	7,62 mg/l	0,007 M-%
Nitrat	0,39 mg/l	0,000 M-%
Chlorid	7,23 mg/l	0,007 M-%
Sulfat	n.n.	n.n.
Elektrische Leitfähigkeit	370,5 µS/cm	

Die Ermittlung der Salzgehalte von Nitrat, Chlorid und Sulfat wurde anhand der 5:50-Lösungen durchgeführt. Diese wurden mit Küvettentest im photometrischen Verfahren analysiert. Zusätzlich wurde die Leitfähigkeit durch die 20:100-Lösung ermittelt.

Bei dem untersuchten Material ist kein erhöhter Salzgehalt vorhanden. Es eignet sich daher für den Lehmbau.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, langanhaltendes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen sehr hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

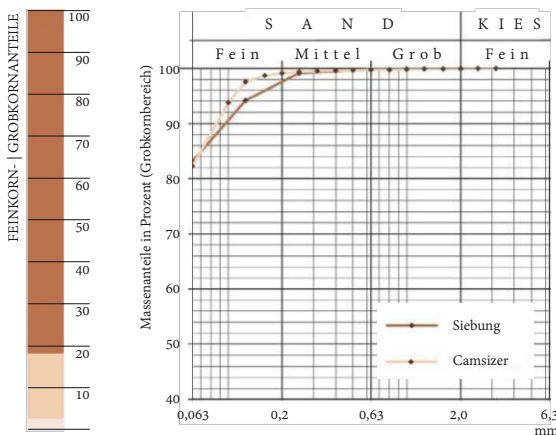
Bezeichnung	sehr fett
Bindekraft	337,40 g/cm ²
Standardabweichung	16,27 g/cm ²
Masse beim Bruch	1.687,00 g
Abweichung der Prüfkörper	9,97 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter knapp 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde zwei Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um sehr fetten Lehm.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um feinkörniges Material mit 82 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	81,7 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	15,5 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	2,6 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,2 %
Gr	>2,0 mm	0,0 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehmbau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine sehr hohe Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs. Er kann potenziell

einer Nassaufbereitung oder natürlichen Aufbereitung unterzogen werden. Geeignete Lehmstoffe wären Lehmziegel oder Cob.

Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse F-0, was sehr fettem Lehm mit einer Bindekraft von 280 - 360 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

<p>Probe P4 U2-Baustelle Maria-Hilfer-Straße</p> <p>Der U-Bahn-Ausbau der Linie U2 soll aufgrund wachsender Bevölkerungszahl in Wien bis zum Jahr 2028 fertiggestellt werden. Das Material wurde während einer Baustellenbegehung in 20 Metern Tiefe zur Oberfläche gewonnen.</p>	Projekt	U-Bahn-Ausbau
	Adresse	Maria-Hilfer-Straße Ecke Stiftgasse, 1060 Wien
	Entnahmetiefe	20,0 m
	Datum Entnahme	21.06.2023
	Verwendungszweck	Deponierung

<p>GEOLOGISCHES PROFIL</p> <p>Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton</p> <p>FLÄCHENNUTZUNG</p> <p>1981 Dichtes Wohnmischgebiet 1991 Dichtes Wohnmischgebiet 2001 Dichtes Wohnmischgebiet 2005 Dichtes Wohnmischgebiet 2007 Dichtes Wohnmischgebiet 2012 Dichtes Wohnmischgebiet 2020 Dichtes Wohnmischgebiet</p>
--



FELDVERSUCHE	
Kugelformtest	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, sehr leichte Abflachung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich nicht zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Waschversuch	Seifig, schweres Ablösen
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig
Mineralgerüst	Feinkörnig
Riechversuch	Weitestgehend geruchslos, leicht feuchter Geruch
Farbbestimmung	Hellgrau mit wenigen hellbraunen Schlieren
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil (aufgrund der Farbe)
<p>Bei dem vorliegenden Material wird ein sehr hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine sehr hohe Bindekraft. Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehm- und Schluffbau.</p>	

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	4,05 mg/l	0,112 M-%
Nitrat	0,39 mg/l	0,000 M-%
Chlorid	3,66 mg/l	0,112 M-%
Sulfat	n.n.	n.n.
Elektrische Leitfähigkeit	660,5 µS/cm	

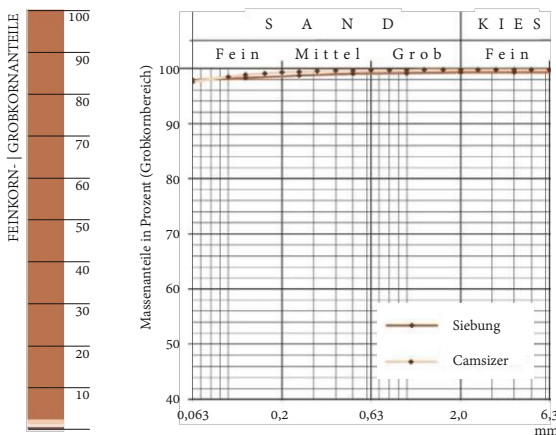
Die Ermittlung der Salzgehalte wurde anhand der 5:50-Lösungen durchgeführt und mit Küvettest mit photometrischen Verfahren analysiert. Zusätzlich wurde die Leitfähigkeit durch die 20:100-Lösung ermittelt.

Bei dem Material wurde ein leicht erhöhter Sulfatgehalt festgestellt. Dieser könnte durch Verunreinigungen auf der Baustelle bedingt sein und bedarf der Prüfung einer frischen Probe. Es eignet sich **bedingt** für den Lehm- bau.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, langanhaltendes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen sehr hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um sehr feinkörniges Material mit 97 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	97,4 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	1,1 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	0,6 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,2 %
Gr	>2,0 mm	0,7 %

ERGEBNIS

Bei dem Material handelt es sich um bedingt geeigneten Baulehm für den Lehm- bau. Es wurde das Ausschlusskriterium durch leicht erhöhten Salzgehalt festgestellt. Aufgrund seiner Eigenschaften wird er jedoch im Lehm- bau sehr wahrscheinlich mit Zuschlagstoffen vermengt, welche diesen ausgleichen können.

Er sollte vorrangig einer Nassaufbereitung (Mauken, Sumpfen, Quirlen) oder dem Mahlen (getrocknet) unterzogen werden.

Für die sortierte Ablagerung zählt er zur Klasse E-0, was fettem Lehm mit einer Bindekraft 200-280 g/cm² und einem Kornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

BINDEKRAFT

Bezeichnung	fett
Bindekraft	249,87 g/cm ²
Standardabweichung	3,03 g/cm ²
Masse beim Bruch	1.249,33 g
Abweichung der Prüfkörper	2,69 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde ein Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um fetten Lehm.

M A T E R I A L B I L D E N T N A H M E S T E L L E



Probe P5 | FH Campus Wien

Der zweite Erweiterungsbau der FH Campus Wien soll im Sommer 2024 fertiggestellt werden. Die bebaute Fläche beträgt 7.600 m² mit 3 Untergeschossen. Ein Großteil des Bodenaushubs soll zur Geländemodellierung herangezogen zu werden. Das Material wurde in der Baugrube in 1,3 Metern Tiefe zur Oberfläche gewonnen.

Projekt	Erweiterungsbau (Neubau)
Adresse	Favoritenstraße 226, 1100 Wien
Entnahmetiefe	1,3 m
Datum Entnahme	17.05.2023
Projektstand	Baubetrieb
Verwendungszweck	Deponierung, Geländemodellierung

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Ackerfläche
1991	Ackerfläche
2001	Ackerfläche
2005	Ackerfläche
2007	Parkanlage
2012	Parkanlage
2020	Parkanlage

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Gut formbar, Linienbildung
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, Abflachung mit wenig Rissebildung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich nicht zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche, leichtes Knirschen
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Waschversuch	Seifig, langsames Ablösen
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig
Mineralgerüst	Feinkörnig mit größerer Körnung
Riechversuch Farbbestimmung	Geruchslos, leicht metallisch Hellbraun (gelblich) mit rötlichen Schlieren und hellgrauen Stellen
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil

Bei dem vorliegenden Material wird ein hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine hohe Bindekraft.
Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	0,17 mg/l	0,001 M-%
Nitrat	0,17 mg/l	0,001 M-%
Chlorid	n.n.	n.n.
Sulfat	n.n.	n.n.
Elektrische Leitfähigkeit	131,7 µS/cm	

Die Ermittlung der Salzgehalte von Nitrat, Chlorid und Sulfat wurde anhand der 5:200-Lösungen durchgeführt. Diese wurden Chromatografie analysiert. Zusätzlich wurde die Leitfähigkeit durch die 20:100-Lösung ermittelt.

Bei dem untersuchten Material ist kein erhöhter Salzgehalt vorhanden. Es eignet sich daher für den Lehm-bau.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, langanhaltendes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen sehr hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

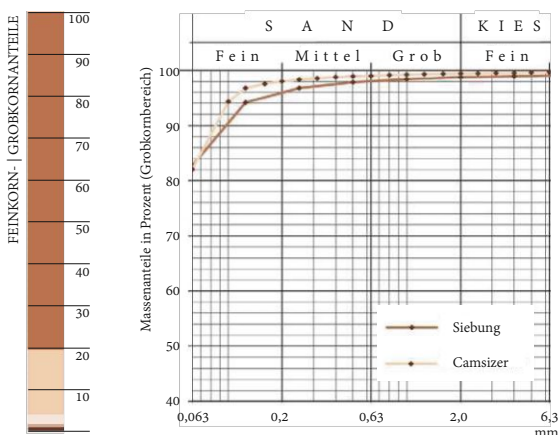
Bezeichnung	fett
Bindekraft	266,20 g/cm ²
Standardabweichung	9,37 g/cm ²
Masse beim Bruch	1.331,00 g
Abweichung der Prüfkörper	7,44 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte gemäß *Niemeyer (Bauwelt 1944)*.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde drei Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um fetten Lehm.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiegung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiegung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um feinkörniges Material mit 80 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	80,3 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	15,4 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	2,3 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,8 %
Gr	>2,0 mm	1,2 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehm-bau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine hohe Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Eine direkte Herstellung von Lehm-baustoffen (Lehm-ziegel, Cob) durch Mischung mit Zuschlagstoffen ist wahrscheinlich.

Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse E-0, was fettem Lehm mit einer Bindekraft von 200-280 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

M A T E R I A L B I L D E N T N A H M E S T E L L E



Probe P6 | FH Campus Wien

Der zweite Erweiterungsbau der FH Campus Wien soll im Sommer 2024 fertiggestellt werden. Die bebaute Fläche beträgt 7.600 m² mit 3 Untergeschossen. Ein Großteil des Bodenaushubs soll zur Geländemodellierung herangezogen zu werden. Das Material wurde in der Baugrube in 0,5 Metern Tiefe zur Oberfläche gewonnen.

Projekt	Erweiterungsbau (Neubau)
Adresse	Favoritenstraße 226, 1100 Wien
Entnahmetiefe	0,5 m
Datum Entnahme	17.05.2023
Projektstand	Baubetrieb
Verwendungszweck	Deponierung, Geländemodellierung

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Ackerfläche
1991	Ackerfläche
2001	Ackerfläche
2005	Ackerfläche
2007	Parkanlage
2012	Parkanlage
2020	Parkanlage

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Gut formbar, Linienbildung
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, Abflachung mit wenig Rissebildung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich nicht zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche, leichtes Knirschen
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Waschversuch	Seifig, langsames Ablösen
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig
Mineralgerüst	Feinkörnig mit größerer Körnung
Riechversuch Farbbestimmung	Geruchslos, leicht metallisch Hellbraun (gelblich) mit rötlichen Schlieren und hellgrauen Stellen
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil

Bei dem vorliegenden Material wird ein hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine hohe Bindekraft. Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Siehe Probe P5.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, kurzandauerndes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

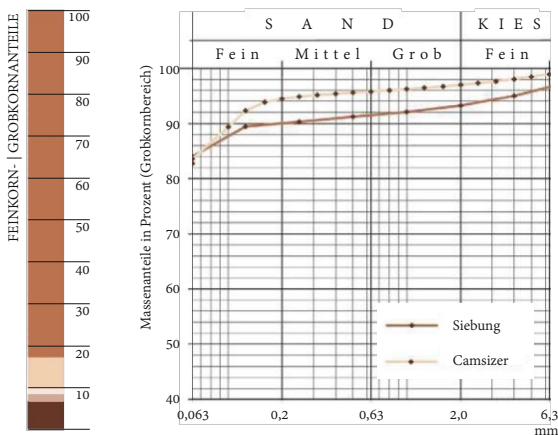
Bezeichnung	mager
Bindekraft	92,07 g/cm ²
Standardabweichung	4,01 g/cm ²
Masse beim Bruch	460,33 g
Abweichung der Prüfkörper	9,05 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte gemäß *Niemeyer (Bauwelt 1944)*.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtverlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde zwei Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um mageren Lehm.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um feinkörniges Material mit größerer Körnung und 82 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	82,6 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	7,3 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	1,5 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	1,8 %
Gr	>2,0 mm	6,8 %

ERGEBNIS

Bei dem Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehm- und Ziegelbau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine niedrige Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs mit größeren Körnungen.

Eine Aufbereitung durch Siebung oder Mischen wäre möglich. Die Eignung für Lehmmörtel (LMM, LPM, LSM) ist sehr wahrscheinlich.

Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse C-0, was magerem Lehm mit einer Bindekraft von 80-110 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

M A T E R I A L B I L D E N T N A H M E S T E L L E



Probe P7 | Nordbahnviertel

Das letzte Entwicklungsgebiet des ehemaligen Nordbahnhofs soll im Jahr 2026 fertig gestellt werden. Der Nordbahnhof wurde 1838 eröffnet und ist aufgrund von Überschwemmungen künstlich aufgeschüttet. Die Probe wurde in Baufeld 3 in der Baugrube aus einer Zwischenschicht bei 3 Metern Tiefe entnommen, welche augenscheinlich Lehm entsprach.

Projekt	Wohnungsbau (Neubau)
Adresse	Leystraße 154, 1020 Wien
Entnahmetiefe	3,0 m
Datum Entnahme	14.06.2023
Projektstand	Baubetrieb
Verwendungszweck	Deponierung

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens (Talsole), hauptsächlich Sand und Schluff

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Handel und Gewerbe
1991	Handel und Gewerbe
2001	Handel und Gewerbe
2005	Handel und Gewerbe
2007	Industrie
2012	Industrie
2020	Wohn(misch)gebiet / Straßenraum begrünt

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Formar, festes Drücken notwendig, keine Linienbildung!
Kugelfalltest	Zerbricht in viele Teile
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich leicht zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Sehr magerer Lehm, wenig Bindekraft
Schneideversuch	Stumpfe, sehr raue Schnittfläche, leichtes Knirschen
Reibeversuch	Wenig klebrig, eher mehlig, etwas feine Haptik
Waschversuch	Schnelles Ablösen
Einschätzung Schluff / Ton	Schluffig
Mineralgerüst	Feinkörnig, sandig
Riechversuch	leicht schwefelig
Farbbestimmung	Hellbraun (gräu-/ bläulichlich) vereinzelt schwarze Schlieren, sonst recht homogen
Einschätzung Organik	evtl. Humusanteil oder zersetzte organische Einschlüsse

Bei dem vorliegenden Material wird ein schluffiges Material erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine hohe Bindekraft.

Die Probe enthält eventuell organische Bestandteile oder Einschlüsse. Vorsicht bei Verwendung im Lehmnbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	1,31 mg/l	0,001 M-%
Nitrat	0,28 mg/l	0,000 M-%
Chlorid	1,03 mg/l	0,001 M-%
Sulfat	n.n.	n.n.
Elektrische Leitfähigkeit	238,0 µS/cm	

Die Ermittlung der Salzgehalte wurde anhand der 5:50-Lösungen durchgeführt und mit Küvettentest im photometrischen Verfahren analysiert. Zusätzlich wurde die Leitfähigkeit durch die 20:100-Lösung ermittelt.

Bei dem Material ist kein erhöhter Salzgehalt vorhanden. Es eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, kurzandauerndes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

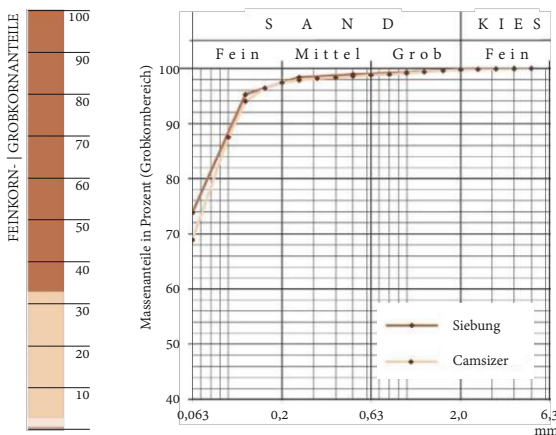
BINDEKRAFT

Bezeichnung	nicht geeignet
Bindekraft	-
Standardabweichung	-
Masse beim Bruch	-
Abweichung der Prüfkörper	-

Das Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* konnte aufgrund mangelnder Bindekraft nicht durchgeführt werden.

Bei dem Material handelt es sich Erdmaterial ohne Bindekraft.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um sehr feinkörniges Material mit 67 Prozent Feinkornanteil und 30 Prozent Feinsand.

Si, Cl	<0,063 mm	67,0 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	30,2 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	1,9 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,8 %
Gr	>2,0 mm	0,1 %

ERGEBNIS

Bei dem Material handelt es sich nicht um Baulehm, sondern um sehr schluffiges, feinsandiges Erdmaterial ohne Bindekraft. Zwar sind Tonminerale nicht nachweisbar auszuschließen, jedoch scheinen diese nicht die notwendige Bindekraft aufgrund der Feinkörnigkeit des Materials zu schaffen.

Das Material ist daher nicht als Baulehm im Lehmbau zu verwenden. Es könnte sich jedoch zum abmagern eignen.

M A T E R I A L B I L D
E N T N A H M E S T E L L E



Probe P8 | Rothneusiedl | Zukunftshof

In Rothneusiedl soll ein neues Stadtteils mit ca. 9.000 Wohnungen erbaut werden. Im Jahr 2030 ist die bauliche Umsetzung angedacht. Im Bereich der Baustoffauswahl wäre der Einsatz von Aushub ein wertvoller Beitrag. Die Probe wurde in einer bestehenden Grabung am Rand des Bebauungsgebiets in einer Tiefe von 2,00 Metern gewonnen.

Projekt	Stadtviertel
Adresse	Rosiwalgasse 41-43, 1100 Wien
Entnahmetiefe	2,0 m
Datum Entnahme	15.06.2023
Projektstand	Konzept- / Entwurfsphase
Verwendungszweck	Derzeit nicht bekannt

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Wohnen m. Garten / Handel, Gewerbe / Acker
1991	Wohnen m. Garten / Handel, Gewerbe / Acker
2001	Wohnen m. Garten / Handel, Gewerbe / Acker
2005	Wohnen m. Garten / Handel, Gewerbe / Acker
2007	Mischnutzung / Acker
2012	Mischnutzung / Acker
2020	Mischnutzung / Acker

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Formar, festes Drücken notwendig, Linienbildung
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, Abflachung mit wenig Rissebildung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Stumpfe, raue Schnittfläche, leichtes Knirschen
Reibeversuch	Klebrige Masse, feine Haptik
Waschversuch	Seifig, langsames Ablösen von Feinkorn - Sand schnell
Einschätzung Schluff / Ton	Schluffig
Mineralgerüst	Feinkörnig
Riechversuch	Weitestgehend geruchslos, leicht feuchter Geruch
Farbestimmung	Hellbraun (gelblich), sehr homogen
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil
Bei dem vorliegenden Material wird eine hoher Schluffanteil erwartet. Die Versuche deuten auf eine mittelhohe Bindekraft. Die Probe enthält keine organischen Bestandteile (durch Farbe auszuschließen) und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.	

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	7,62 mg/l	0,008 M-%
Nitrat	0,95 mg/l	0,001 M-%
Chlorid	6,67 mg/l	0,007 M-%
Sulfat	n.n.	n.n.
Elektrische Leitfähigkeit	173,9 µS/cm	

Die Ermittlung der Salzgehalte wurde anhand der 5:50-Lösungen durchgeführt und mit Küvettestest im photometrischen Verfahren analysiert. Zusätzlich wurde die Leitfähigkeit durch die 20:100-Lösung ermittelt.

Bei dem untersuchten Material ist kein erhöhter Salzgehalt vorhanden. Es eignet sich daher für den Lehmbau.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, langanhaltendes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen sehr hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

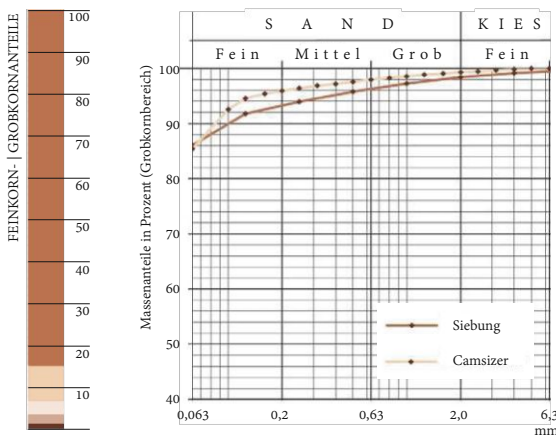
Bezeichnung	sehr mager
Bindekraft	54,40 g/cm ²
Standardabweichung	0,99 g/cm ²
Masse beim Bruch	272,00 g
Abweichung der Prüfkörper	3,94 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte gemäß *Niemeyer (Bauwelt 1944)*.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde ein Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um sehr mageren Lehm.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiegung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um feinkörniges Material mit 84 Prozent Feinkornanteil und gröberen Anteilen.

Si, Cl	<0,063 mm	84,6 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	8,4 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	3,1 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	2,2 %
Gr	>2,0 mm	1,6 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehmbau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine niedrige Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Eine Aufbereitung durch Mischen wäre möglich. Eine direkte Herstellung von Lehmstoffen (Lehmputz) durch Mischung mit Zuschlagstoffen ist wahrscheinlich. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse B-0, was sehr magerem Lehm mit einer Bindekraft von 50-80 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

M A T E R I A L B I L D
E N T N A H M E S T E L L E



Probe P9 | Rothneusiedl | Zukunftshof

In Rothneusiedl soll ein neues Stadtteils mit ca. 9.000 Wohnungen erbaut werden. Im Jahr 2030 ist die bauliche Umsetzung angedacht. Im Bereich der Baustoffauswahl wäre der Einsatz von Aushub ein wertvoller Beitrag. Die Probe wurde in einer bestehenden Grabung am Rand des Bebauungsgebiets in einer Tiefe von 2,00 Metern gewonnen.

Projekt	Stadtviertel
Adresse	Rosiwalgasse 41-43, 1100 Wien
Entnahmetiefe	1,5 m
Datum Entnahme	15.06.2023
Projektstand	Konzept- / Entwurfsphase
Verwendungszweck	Derzeit nicht bekannt

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Wohnen m. Garten / Handel, Gewerbe / Acker
1991	Wohnen m. Garten / Handel, Gewerbe / Acker
2001	Wohnen m. Garten / Handel, Gewerbe / Acker
2005	Wohnen m. Garten / Handel, Gewerbe / Acker
2007	Mischnutzung / Acker
2012	Mischnutzung / Acker
2020	Mischnutzung / Acker

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Formar, festes Drücken notwendig, starke Linienbildung
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, Abflachung mit wenig Rissebildung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich zerdrücken

Einschätzung Bindekraft **Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft**

Schneideversuch	Stumpfe, raue Schnittfläche, leichtes Knirschen
Reibeversuch	Klebrige Masse, feine Haptik
Waschversuch	Seifig, langsames Ablösen von Feinkorn - Sand schnell

Einschätzung Schluff / Ton **Schluffig**

Mineralgerüst Feinkörnig

Riechversuch	Weitestgehend geruchslos, leicht feuchter Geruch
Farbestimmung	Hellbraun (gelblich), sehr homogen

Einschätzung Organik **Kein Humusanteil**

Bei dem vorliegenden Material wird eine hoher Schluffanteil erwartet. Die Versuche deuten auf eine mittelhohe Bindekraft. Die Probe enthält keine organischen Bestandteile (durch Farbe auszuschließen) und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	6,02 mg/l	0,024 M-%
Nitrat	0,30 mg/l	0,001 M-%
Chlorid	2,41 mg/l	0,010 M-%
Sulfat	3,31 mg/l	0,013 M-%
Elektrische Leitfähigkeit	95,2 µS/cm	

Die Ermittlung der Salzgehalte von Nitrat, Chlorid und Sulfat wurde anhand der 5:200-Lösungen durchgeführt. Diese wurden Chromatografie analysiert. Zusätzlich wurde die Leitfähigkeit durch die 20:100-Lösung ermittelt.

Bei dem untersuchten Material ist kein erhöhter Salzgehalt vorhanden. Es eignet sich daher für den Lehmabau.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, langanhaltendes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen sehr hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

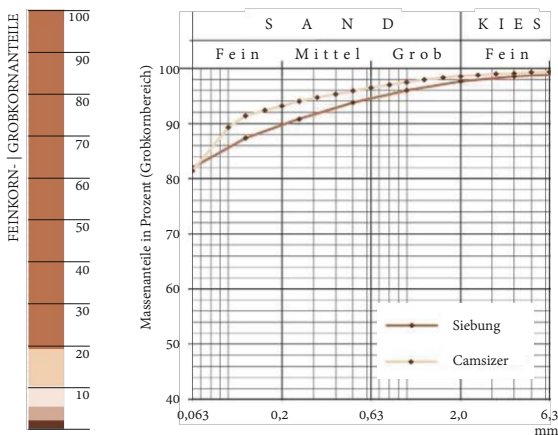
Bezeichnung	sehr mager
Bindekraft	53,93 g/cm ²
Standardabweichung	2,46 g/cm ²
Masse beim Bruch	269,67 g
Abweichung der Prüfkörper	9,41 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte gemäß *Niemeyer (Bauwelt 1944)*.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde ein Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um sehr mageren Lehm.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um feinkörniges Material mit 80 Prozent Feinkornanteil und gröberen Anteilen.

Si, Cl	<0,063 mm	80,6 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	8,8 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	5,0 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	3,2 %
Gr	>2,0 mm	2,4 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehmabau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine niedrige Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Eine Aufbereitung durch Mischen wäre möglich. Eine direkte Herstellung von Lehmabaustoffen (Lehmputz) durch Mischung mit Zuschlagstoffen ist wahrscheinlich. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse B-0, was sehr magerem Lehm mit einer Bindekraft von 50-80 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

M A T E R I A L B I L D E N T N A H M E S T E L L E



Probe P10 | Franz-Steiner-Gasse

Das Bauvorhaben ist der Neubau eines Einfamilienhauses, im dessen Rahmen ein Baugrundgutachten angefertigt wurde.

Die Probe wurde im Schurf für den Sickersversuch in einer Tiefe von 0,9 Metern gewonnen.

Projekt	Einfamilienhaus (Neubau)
Adresse	Franz-Steiner-Gasse 23, 3011 Purkersdorf
Entnahmetiefe	0,9 m
Datum Entnahme	20.06.2023
Projektstand	Baugrunduntersuchung
Verwendungszweck	Derzeit nicht bekannt

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Ton- Sandstein, Mergel und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

Wohngebiet

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Gut formbar, starke Linienbildung
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, wenig Abflachung, leichte Rissbildung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich schwer zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Glänzende, z.T. glatte / raue Schnittfläche, Knirschen
Reibeversuch	Klebrige Masse, sandig
Waschversuch	Mittelschnelles Ablösen, Feinkorn verbleibt länger
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig, sandig
Mineralgerüst	Grobkörnig mit großer Körnung (flach)
Riechversuch	Weitestgehend geruchslos
Farbbestimmung	Dunkelbraun (leicht gräulich) mit hellbraunen und rötlichen Stellen
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil

Bei dem vorliegenden Material wird eine hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine hohe Bindekraft.
Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Bei der vorliegenden Probe ist aufgrund der Flächen-nutzung kein Verdacht auf eine erhöhte Salzbelastung gegeben.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest kein Aufbrausen auf. Dadurch ist anzunehmen, dass ein sehr geringer bis kein natürlicher Kalkgehalt vorhanden ist.

BINDEKRAFT

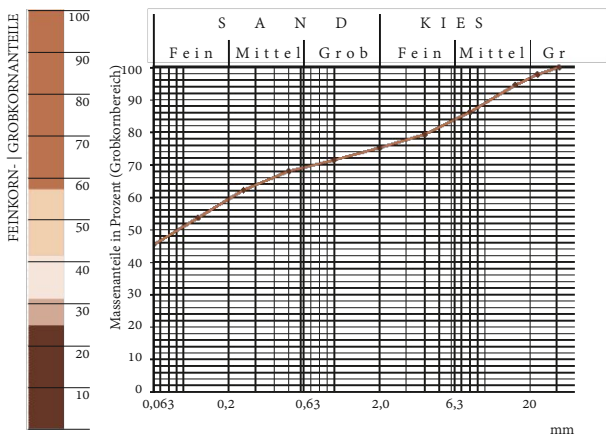
Bezeichnung	Ton
Bindekraft	400,13 g/cm ²
Standardabweichung	21,67 g/cm ²
Masse beim Bruch	1929,67 g
Abweichung der Prüfkörper	9,46 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfah-ren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte gemäß *Niemeyer (Bauwelt 1944)*.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Stan-dardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtablauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde zwei Mal bis zu Erreichen eines validen Ergeb-nisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemesse-nen Bindekraft um Ton.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Bestimmung der Grobkornanteile wurde durch die Trockensiebung analysiert.

Bei dem Material handelt es sich um gemischtkörniges Material mit 42 Prozent Feinkornanteil und gröberen Anteilen >2 mm von 25 Prozent.

Si, Cl	<0,063 mm	42,5 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	16,0 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	10,2 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	6,4 %
Gr	>2,0 mm	25,0 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehm-bau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine hohe Bindekraft und besteht aus einem hohen Grobkornbe-reich >2 mm.

Eine Herstellung von Lehm-baustoffen (Stampflehm) durch Mischung mit Zuschlagstoffen ist wahrschein-lich. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse G-2, was Ton mit einer Bindekraft von >360 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von >25 Prozent entspricht.



Probe P11 | Robert Hohenwarter-Gasse

Das Bauvorhaben ist der Neubau eines Einfamilienhauses, im dessen Rahmen ein Baugrundgutachten angefertigt wurde.
Die Probe wurde aus dem Aushub des Schurfs von einer Tiefe von 2,4 Metern gewonnen.

Projekt	Einfamilienhaus (Neubau)
Adresse	Robert Hohenwarter-Gasse, 3011 Purkersdorf
Entnahmetiefe	2,4 m
Datum Entnahme	20.06.2023
Projektstand	Baugrunduntersuchung
Verwendungszweck	Derzeit nicht bekannt

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Ton- Sandstein, Mergel und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

Wohngebiet

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Gut formbar, starke Linienbildung
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, wenig Abflachung, leichte Rissbildung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich schwer zerdrücken

Einschätzung Bindekraft **Fetter Lehm, hohe Bindekraft**

Schneideversuch	Glänzende, z.T. raue Schnittfläche, leichtes Knirschen
Reibeversuch	Klebrige, klumprige Masse, sandig
Washversuch	Mittelschnelles Ablösen, Feinkorn verbleibt länger

Einschätzung Schluff / Ton **Tonig, sandig**

Mineralgerüst	Grobkörnig mit großer Körnung (flach)
---------------	---------------------------------------

Riechversuch	Weitestgehend geruchslos
Farbestimmung	Warmes Dunkelbraun mit wenigen hellbraunen Stellen (leicht gelblich)

Einschätzung Organik **Kein Humusanteil**

Bei dem vorliegenden Material wird eine hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine hohe Bindekraft.
Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehm- und Tonbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Bei der vorliegenden Probe ist aufgrund der Flächen-nutzung kein Verdacht auf eine erhöhte Salzbelastung gegeben.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest kein Aufbrausen auf. Dadurch ist anzunehmen, dass ein sehr geringer bis kein natürlicher Kalkgehalt vorhanden ist.

BINDEKRAFT

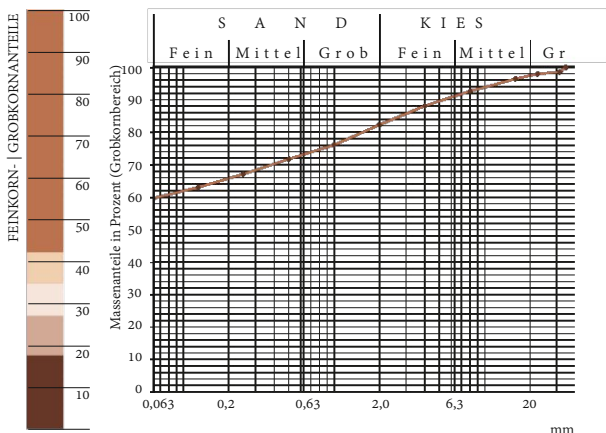
Bezeichnung	Ton
Bindekraft	465,27 g/cm ²
Standardabweichung	17,70 g/cm ²
Masse beim Bruch	2326,33 g
Abweichung der Prüfkörper	8,50 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch ein Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte gemäß *Niemeyer (Bauwelt 1944)*.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtverlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde zwei Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um Ton.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch ein Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Bestimmung der Grobkornanteile wurde durch die Trockensiebung analysiert.

Bei dem Material handelt es sich um gemischtkörniges Material mit 58 Prozent Feinkornanteil und gröberen Anteilen >2 mm von 18 Prozent.

Si, Cl	<0,063 mm	57,5 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	7,5 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	7,6 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	9,5 %
Gr	>2,0 mm	17,9 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehm-bau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine hohe Bindekraft und besteht aus gemischten Korngrößen mit einem recht hohen Grobkornbereich >2 mm.

Eine Herstellung von Lehm-baustoffen (Stampflehm) durch Mischung mit Zuschlagstoffen ist wahrscheinlich. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse G-1, was Ton mit einer Bindekraft von >360 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von >20 Prozent entspricht.

<h3>Probe P13 Kopernikusgasse</h3> <p>Im Innenhof einer Blockrandbebauung der Gründerzeit soll im Rahmen eines Landschaftsprojektes dort anfallender Aushub als Lehmputz in der Sanierung des ehemaligen Wirtschaftsgebäudes verwendet werden. Die Probe wurde von dem bereits ausgehobenen Material genommen, wodurch die Tiefe unbekannt ist.</p>	Projekt	Sanierung / Landschaftsprojekt
	Adresse	Kopernikusgasse 10, 1060 Wien
	Entnahmetiefe	nicht bekannt
	Datum Entnahme	06.06.2023
	Projektstand	Konzept- / Entwurfsphase
Verwendungszweck	Lehmputz	

<h4>GEOLOGISCHES PROFIL</h4> <p>Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton</p>
<h4>FLÄCHENNUTZUNG</h4> <p>1981 Wohnmischgebiet 1991 Wohnmischgebiet 2001 Wohnmischgebiet 2005 Wohnmischgebiet 2007 Wohnmischgebiet 2012 Wohnmischgebiet 2020 Wohnmischgebiet</p>



FELDVERSUCHE	
Kugelformtest	Formbar, festes Drücken notwendig, Linienbildung
Kugelfalltest	Zerbricht in wenige Teile
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	z.T. glatte / raue Schnittfläche, starkes Knirschen
Reibeversuch	Leicht klebrige Masse, größere Körnung
Waschversuch	Schnelles Ablösen
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig, sandig
Mineralgerüst	Grobkörnig mit großer Körnung (kantig)
Riechversuch	Stark modrig
Farbbestimmung	Hellbraun, dunkelbraune / schwärzliche Stellen
Einschätzung Organik	Humusanteil
<p>Bei dem vorliegenden Material wird eine mittelhoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine hohe Bindekraft. Die Probe enthält jedoch organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend nicht für den Lehmbau.</p>	

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Bei der vorliegenden Probe ist aufgrund der Flächen-nutzung kein Verdacht auf eine erhöhte Salzbelastung gegeben.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, kurzandauerndes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

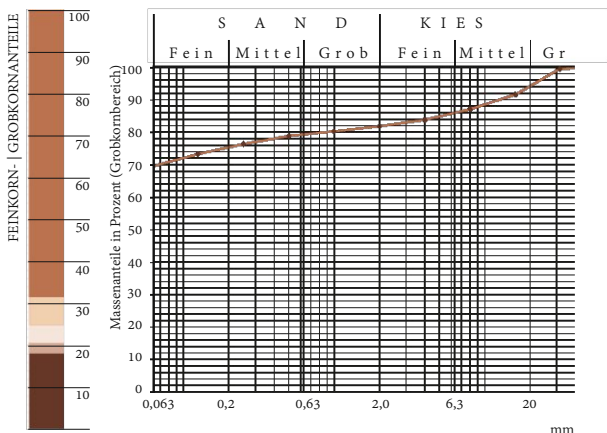
Bezeichnung	fast fett
Bindekraft	183,73 g/cm ²
Standardabweichung	6,03 g/cm ²
Masse beim Bruch	918,67 g
Abweichung der Prüfkörper	7,40 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde ein Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um fast fetten Lehm.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Bestimmung der Grobkornanteile wurde durch die Trockensiebung analysiert.

Bei dem Material handelt es sich um gemischtkörniges Material mit 68 Prozent Feinkornanteil und gröberen Anteilen >2 mm von 18 Prozent.

Si, Cl	<0,063 mm	68,3 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	6,8 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	4,1 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	2,6 %
Gr	>2,0 mm	18,3 %

ERGEBNIS

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der organischen Bestandteile nicht um Baulehm. Bei der Aushebung des Materials kam es zur Vermischung mit dem Oberboden, wodurch Vermengung von Lehm und Humus stattfand. Das Material weist trotzdem eine hohe

Bindekraft auf und wäre bei sachgerechter Aushebung wahrscheinlich verwertbar gewesen.

Das Material ist nicht als Baulehm im Lehmbau zu verwenden.



Probe P14 | Musterhaus

Das Musterhaus besteht aus einem Holz-Lehm-Verbundsystem. Der verwendete Lehm stammt aus einer Lehmgrube auf dem Grundstück. Durch variierende Zuschlagstoffe und Mischungen findet er eine vielfältige Anwendung im Musterhaus. Die Probe wurde von dem bereits ausgehobenen Material entnommen, wodurch die Tiefe unbekannt ist.

Projekt	Musterhaus
Adresse	Europastraße 7, 2070 Mitterretzbach
Entnahmetiefe	nicht bekannt
Datum Entnahme	01.09.2023
Projektstand	Baubetrieb
Verwendungszweck	Holz-Lehm-Verbundsystem

GEOLOGISCHES PROFIL

Klastische Sedimente des inneralpinen Beckens (Molassezone),
Kies, Sand, Ton

FLÄCHENNUTZUNG

ehemalige landwirtschaftlich genutzte Fläche (Weinbau und Tierhaltung)

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Formbar, Linienbildung
Kugelfalltest	Zerbricht in wenige Teile
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich schwer zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Glänzende, z.T. glatte / raue Schnittfläche, Knirschen
Reibeversuch	Klebrige Masse, feine Haptik
Waschversuch	Seifig, langsames Ablösen von Feinkorn - Sand recht schnell
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig, sandig
Mineralgerüst	Grobkörnig
Riechversuch	Weitestgehend geruchslos, leicht feuchter Geruch
Farbestimmung	Hellbraun (gelblich) mit hellgrauen Tonstücken
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil

Bei dem vorliegenden Material wird eine hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine mittelhohe Bindekraft.

Die Probe enthält keine organischen Bestandteile (durch Farbe auszuschließen) und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	7,19 mg/l	0,029 M-%
Nitrat	0,14 mg/l	0,001 M-%
Chlorid	2,44 mg/l	0,010 M-%
Sulfat	4,61 mg/l	0,018 M-%
Elektrische Leitfähigkeit	164,6 µS/cm	

Die Ermittlung der Salzgehalte von Nitrat, Chlorid und Sulfat wurde anhand der 5:200-Lösungen durchgeführt. Diese wurden Chromatografie analysiert. Zusätzlich wurde die Leitfähigkeit durch die 20:100-Lösung ermittelt.

Bei dem untersuchten Material ist kein erhöhter Salzgehalt vorhanden. Es eignet sich daher für den Lehmabau.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, kurzandauerndes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

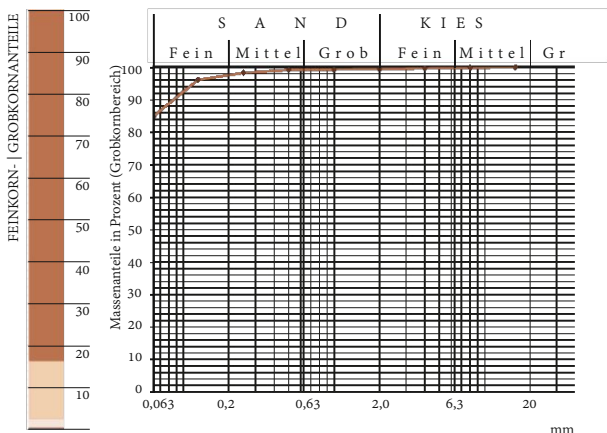
Bezeichnung	fett
Bindekraft	215,87 g/cm ²
Standardabweichung	7,88 g/cm ²
Masse beim Bruch	1079,33 g
Abweichung der Prüfkörper	7,58 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde ein Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um fetten Lehm.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Bestimmung der Grobkornanteile wurde durch die Trockensiebung analysiert.

Bei dem Material handelt es sich um feinkörniges Material mit 83 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	83,5 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	13,9 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	1,8 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,3 %
Gr	>2,0 mm	0,5 %

ERGEBNIS

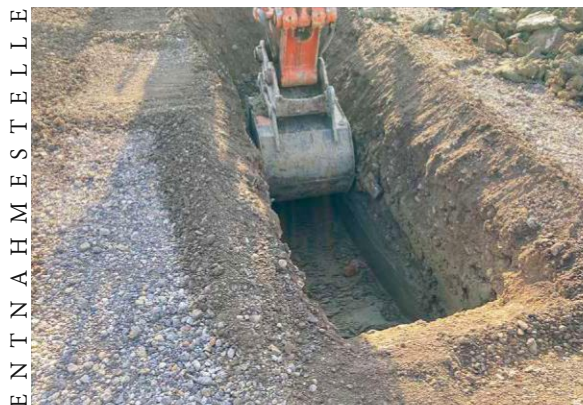
Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehmabau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine hohe Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Eine Herstellung von Lehmabaustoffen durch Mischung mit Zuschlagstoffen ist möglich und bereits praktisch bewiesen.

Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse E-0, was fettem Lehm mit einer Bindekraft von 200-280 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

<h3 style="color: #A52A2A;">Probe P15 Kurbadstraße</h3> <p>In der Kurbadstraße sollen mehrere Wohnbauten entstehen. In geeigneten Baufeldern ist die Verwertung des Aushubes im Bau angedacht, was bereits bei der Ausschreibung der Erdarbeiten berücksichtigt wurde. Die Probe wurde aus dem Aushub des Schurfs von einer Tiefe von 1,5 Metern gewonnen.</p>	Projekt	Wohnbau (Neubauten)
	Adresse	Kurbadstraße (zwischen 8 -12), 1100 Wien
	Entnahmetiefe	1,5 m
	Datum Entnahme	12.09.2023
Projektstand	Baugrundgutachten	
Verwendungszweck	Geplante Verwertung	

<h3 style="color: #A52A2A;">GEOLOGISCHES PROFIL</h3> <p>Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton</p>	
<h3 style="color: #A52A2A;">FLÄCHENNUTZUNG</h3>	
1981	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
1991	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2001	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2005	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2007	Solitäre Handelsstrukt. / Straßenraum (begrünt)
2012	Solitäre Handelsstrukt. / Straßenraum (begrünt)
2020	Park / Parkplätze / Straßenraum (begrünt)



<h3 style="color: #A52A2A;">FELDVERSUCHE</h3>	
Kugelformtest	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, wenig Abflachung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich nicht zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Waschversuch	Seifig, schweres Ablösen
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig
Mineralgerüst	Feinkörnig
Riechversuch	Geruchslos
Farbestimmung	Dunkelgrau mit rötlichen Schlieren
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil
<p>Bei dem vorliegenden Material wird eine sehr hoher Tonanteil erwartet. Die Versuche deuten auf eine sehr hohe Bindekraft. Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.</p>	

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	7,95 mg/l	0,032 M-%
Nitrat	0,11 mg/l	0,000 M-%
Chlorid	2,41 mg/l	0,010 M-%
Sulfat	5,43 mg/l	0,022 M-%
Elektrische Leitfähigkeit	162,8 µS/cm	

Die Ermittlung der Salzgehalte von Nitrat, Chlorid und Sulfat wurde anhand der 5:200-Lösungen durchgeführt. Diese wurden Chromatografie analysiert. Zusätzlich wurde die Leitfähigkeit durch die 20:100-Lösung ermittelt.

Bei dem untersuchten Material ist kein erhöhter Salzgehalt vorhanden. Es eignet sich daher für den Lehmabau.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, kurzandauerndes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

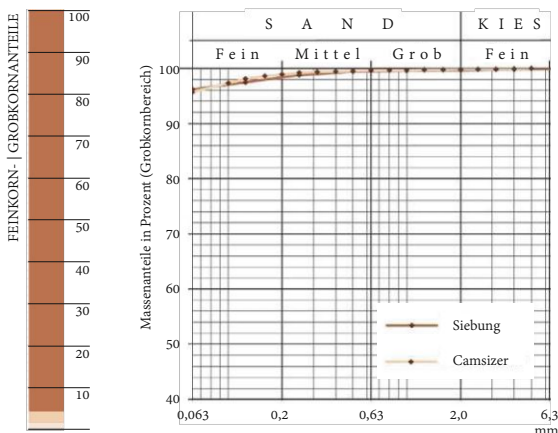
Bezeichnung	fett
Bindekraft	204,53 g/cm ²
Standardabweichung	7,35 g/cm ²
Masse beim Bruch	1022,67 g
Abweichung der Prüfkörper	8,43 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde vier Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um fetten Lehm.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiegung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiegung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um sehr feinkörniges Material mit 96 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	95,5 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	2,8 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	1,3 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,2 %
Gr	>2,0 mm	0,3 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehmabau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine hohe Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Er sollte vorrangig einer Nassaufbereitung (Mauken, Sumpfen, Quirlen) oder dem Mahlen (getrocknet) unterzogen werden. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse E-0, was fettem Lehm mit einer Bindekraft von 200-280 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

M A T E R I A L B I D E N T A H M E S T E L L E



Probe P16 | Kurbadstraße

In der Kurbadstraße sollen mehrere Wohnbauten entstehen. In geeigneten Baufeldern ist die Verwertung des Aushubes im Bau angedacht, was bereits bei der Ausschreibung der Erdarbeiten berücksichtigt wurde. Die Probe wurde aus dem Aushub des Schurfs von einer Tiefe von 3,0 Metern gewonnen.

Projekt	Wohnbau (Neubauten)
Adresse	Kurbadstraße (zwischen 8 -12), 1100 Wien
Entnahmetiefe	3,0 m
Datum Entnahme	12.09.2023
Projektstand	Baugrundgutachten
Verwendungszweck	Geplante Verwertung

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
1991	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2001	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2005	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2007	Solitäre Handelsstrukt. / Straßenraum (begrünt)
2012	Solitäre Handelsstrukt. / Straßenraum (begrünt)
2020	Park / Parkplätze / Straßenraum (begrünt)

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, wenig Abflachung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich nicht zerdrücken

Einschätzung Bindekraft **Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft**

Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Washversuch	Seifig, schweres Ablösen

Einschätzung Schluff / Ton **Tonig**

Mineralgerüst Feinkörnig

Riechversuch	Geruchslos
Farbestimmung	Warmes Hellbraun mit starken rötlichen Stellen

Einschätzung Organik **Kein Humusanteil**

Bei dem vorliegenden Material wird eine sehr hoher Tonanteil erwartet. Die Versuche deuten auf eine sehr hohe Bindekraft.

Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehm- und Tonbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Siehe Probe P15.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein schwaches, sporadisches Aufbrausen auf. Das deutet auf einen niedrigen natürlichen Kalkgehalt hin.

BINDEKRAFT

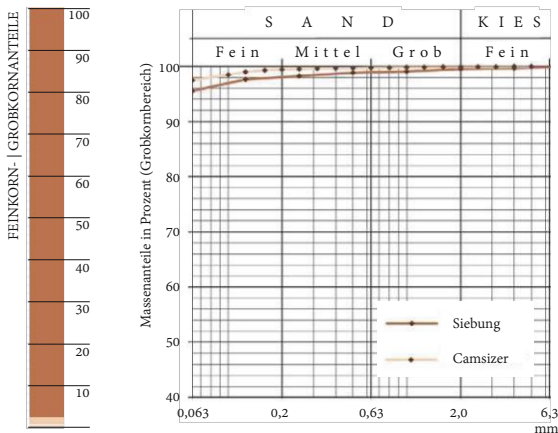
Bezeichnung	Ton
Bindekraft	509,07 g/cm ²
Standardabweichung	9,50 g/cm ²
Masse beim Bruch	2545,33 g
Abweichung der Prüfkörper	4,41 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch ein Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtverlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde zwei Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um Ton.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiebung durch ein Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um sehr feinkörniges Material mit 97 Prozent Feinkornanteil.

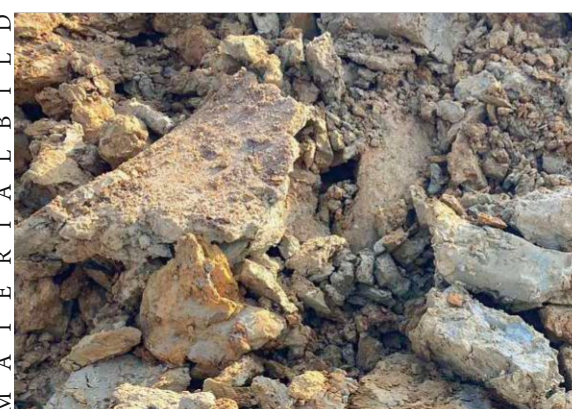
Si, Cl	<0,063 mm	97,3 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	1,7 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	0,5 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,3 %
Gr	>2,0 mm	0,2 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehm- und Ziegelbau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine hohe Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Er sollte vorrangig einer Nassaufbereitung (Mauken, Sumpfen, Quirlen) oder dem Mahlen (getrocknet) unterzogen werden. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse G-0, was Ton mit einer Bindekraft von >360 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

M A T E R I A L B I D E N T A H M E S T E L L E



Probe P17 | Kurbadstraße

In der Kurbadstraße sollen mehrere Wohnbauten entstehen. In geeigneten Baufeldern ist die Verwertung des Aushubes im Bau angedacht, was bereits bei der Ausschreibung der Erdarbeiten berücksichtigt wurde. Die Probe wurde aus dem Aushub des Schurfs von einer Tiefe von 4,5 Metern gewonnen.

Projekt	Wohnbau (Neubauten)
Adresse	Kurbadstraße (zwischen 8 -12), 1100 Wien
Entnahmetiefe	4,5 m
Datum Entnahme	12.09.2023
Projektstand	Baugrundgutachten
Verwendungszweck	Geplante Verwertung

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Schluff und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
1991	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2001	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2005	Handel und Gewerbe / Straßenbahn
2007	Solitäre Handelsstrukt. / Straßenraum (begrünt)
2012	Solitäre Handelsstrukt. / Straßenraum (begrünt)
2020	Park / Parkplätze / Straßenraum (begrünt)

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Gut formbar, Kugel wirkt sehr fest
Kugelfalltest	Bleibt am Stück, wenig Abflachung
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich nicht zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Sehr fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Glänzende, glatte Schnittfläche
Reibeversuch	Klebrige Masse, sehr feine Haptik
Waschversuch	Seifig, schweres Ablösen
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig
Mineralgerüst	Feinkörnig
Riechversuch	Geruchslos
Farbestimmung	Hellbraun (gräulich) mit roten Schlieren
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil

Bei dem vorliegenden Material wird eine sehr hoher Tonanteil erwartet. Die Versuche deuten auf eine sehr hohe Bindekraft.

Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmbau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Siehe Probe P15.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, kurzandauerndes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen hohen natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im trockenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des Material ausüben.

BINDEKRAFT

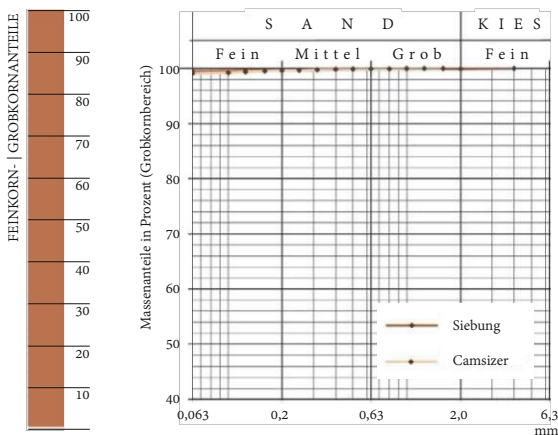
Bezeichnung	Ton
Bindekraft	630,47 g/cm ²
Standardabweichung	16,68 g/cm ²
Masse beim Bruch	3152,33 g
Abweichung der Prüfkörper	6,00 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfahren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Standardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der Gesamtlauf der Prüfkörperanfertigung und Messung wurde ein Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnisses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemessenen Bindekraft um Ton.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG



Die Ermittlung von Grob- und Feinkornanteile fand anhand der Nasssiegung durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 0,063 mm statt. Die Grobkornanteile wurden durch die Trockensiebung und die dynamische Bildanalyse bestimmt.

Bei dem Material handelt es sich um sehr feinkörniges Material mit 99 Prozent Feinkornanteil.

Si, Cl	<0,063 mm	99,0 %
fSa	0,063 - 0,02 mm	0,3 %
mSa	0,02 - 0,63 mm	0,5 %
cSa	0,63 - 2,0 mm	0,1 %
Gr	>2,0 mm	0,1 %

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um geeigneten Baulehm für den Lehmbau. Es wurden keine Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine hohe Bindekraft und besteht hauptsächlich aus Bestandteilen des Feinkornbereichs.

Er sollte vorrangig einer Nassaufbereitung (Mauken, Sumpfen, Quirlen) oder dem Mahlen (getrocknet) unterzogen werden. Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur Klasse G-0, was Ton mit einer Bindekraft von >360 g/cm² und einem Grobkornanteil >2 mm von <10 Prozent entspricht.

M A T E R I A L B I L D E N T N A H M E S T E L L E



Probe P18 | Rudolf-Steiner-Schule

Der Neubau der Rudolf-Steiner-Schule schließt an ein Bestandsgebäude an. Der dadurch entstandene Aushub wurde als Putz im neuen Holzbau sowie im Bestand eingesetzt. Das Material wurde durch Siebung aufbereitet und nach Abmagerung als Oberputz verwertet. Die Probe wurde von dem bereits ausgehobenen Material entnommen, wodurch die Tiefe unbekannt ist.

Projekt	Neubau und Sanierung
Adresse	Endresstraße 100, 1230 Wien
Entnahmetiefe	nicht bekannt
Datum Entnahme	05.10.2023
Projektstand	Baubetrieb
Verwendungszweck	Lehmputz

GEOLOGISCHES PROFIL

Sedimentgesteine des Wiener Beckens, hauptsächlich Kies, Sand und Ton

FLÄCHENNUTZUNG

1981	Wohnen mit Garten
1991	Wohnen mit Garten
2001	Wohnen mit Garten
2005	Wohnen mit Garten
2007	Wohnmischgebiet (mittlerer Dichte)
2012	Wohnmischgebiet (mittlerer Dichte)
2020	Wohnmischgebiet (mittlerer Dichte)

FELDVERSUCHE

Kugelformtest	Formbar, starke Linienbildung
Kugelfalltest	Zerbricht in wenige Teile
Trockenfestigkeitsversuch	Lässt sich schwer zerdrücken
Einschätzung Bindekraft	Fast fetter Lehm, hohe Bindekraft
Schneideversuch	Raue Schnittfläche, Knirschen
Reibeversuch	Klebrige Masse, sandig
Waschversuch	Mittelschnelles Ablösen, Feinkorn verbleibt länger
Einschätzung Schluff / Ton	Tonig, sandig
Mineralgerüst	Grobkönig mit großer Körnung (gerundet)
Riechversuch	Geruchslos
Farbbestimmung	Warmes hellbraun (leicht rötlich)
Einschätzung Organik	Kein Humusanteil

Bei dem vorliegenden Material wird eine hoher Tonanteil erwartet. Dies äußert sich in den Versuchen durch eine mittelhohe Bindekraft.

Die Probe enthält keine organischen Bestandteile und eignet sich dahingehend für den Lehmabau.

SALZGEHALT

Gesamtsalzgehalt	-
Nitrat	-
Chlorid	-
Sulfat	-
Elektrische Leitfähigkeit	-

Bei der vorliegenden Probe ist aufgrund der Flächen-
nutzung kein Verdacht auf eine erhöhte Salzbelastung
gegeben.

KALKGEHALT

Das Material wies im Salzsäuretest ein starkes, kurzan-
dauerndes Aufbrausen auf. Das deutet auf einen hohen
natürlichen Kalkgehalt hin. Dieser könnte sich im tro-
ckenen Zustand positiv auf die Druckfestigkeit des
Material ausüben.

BESTIMMUNG DER KORNGRÖSSENVERTEILUNG

Aufgrund der geringen Probemenge konnte keine
akkurate Bestimmung der Korngrößenverteilung statt-
finden.

ERGEBNIS

Bei dem vorliegenden Material handelt es sich um
geeigneten Baulehm für den Lehm- und Ziegelbau. Es wurden keine
Ausschlusskriterien durch organische Bestandteile oder
Salzgehalt festgestellt. Der Lehm verfügt über eine hohe
Bindekraft.

Eine Herstellung von Lehm- und Ziegelbaustoffen durch Siebung

BINDEKRAFT

Bezeichnung	fast fett
Bindekraft	157,47 g/cm ²
Standardabweichung	6,94 g/cm ²
Masse beim Bruch	787,33 g
Abweichung der Prüfkörper	9,77 %

Die Bindekraft wurde mit dem Achterlingsprüfverfah-
ren nach *Lehmbau Regeln* ermittelt. Die Probe wurde im
Zuge der Vorbereitung luftgetrocknet zerkleinert und
durch einen Analysesieb mit der Maschenweite 2 mm
gesiebt. Die Aufbereitung nach Wasserzugabe erfolgte
nach Methoden aus der Keramik.

Die Prüfung wurde anhand von drei Prüfkörpern
durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis mit Stan-
dardabweichung bildet. Die Abweichung zwischen den
drei Messergebnissen betrug unter 10 Prozent. Der
Gesamtablauf der Prüfkörperanfertigung und Messung
wurde ein Mal bis zu Erreichen eines validen Ergebnis-
ses durchgeführt.

Bei dem Material handelt es sich aufgrund der gemesse-
nen Bindekraft um fast fetten Lehm.

sowie Mischung mit Zuschlagstoffen ist möglich und
bereits praktisch bewiesen.

Für eine sortierte Ablagerung zählt das Material zur
Klasse D-X, was fast fettem Lehm mit einer Bindekraft
von 110-200 g/cm² entspricht.

Interview mit **Prof. Dr. Dipl.-Ing. Christof Ziegert**

von ZRS Architekten Ingenieure, 18.08.2022
zum Weleda-Projekt

Christof Ziegert ist gelernter Maurer und praktizierte das Handwerk über mehrere Jahre bevor er sein Bauingenieursstudium an der TH Leipzig begann, welches 1996 mit einer Diplomarbeit zum Brandverhalten von Lehmbaustoffen abschloss. 2003 promovierte er an der TU Berlin zur Thematik Schäden und Sanierung von Wellerlehmbauten. Im selben Jahr gründete er gemeinsam mit Eike Roswag und Uwe Seiler das Planungsbüro ZRS in Berlin. Zudem ist Christof Ziegert Obmann des Normungsausschusses Lehm-bau NA 005-06-08 AA beim DIN, Vorstandsmitglied des Dachverband Lehm e.V., Sachverständiger für Schäden im Lehm-bau (IHK Berlin), Mitglied bei ICOMOS-Deutschland, Expert Member der ICOMOS Arbeitsgruppe ISCEAH (International Scientific Committee on Earthen Architectural Heritage) und beratender Ingenieur der Baukammer Berlin.

Wie sieht die statische Planung für so ein großes Bauvorhaben mit tragenden Stampflehmwänden aus?

Wir haben die Statik für die Stampflehmwände geplant, wie bei jedem anderen Projekt auch. Es gibt für uns Architekten und Ingenieure verschiedene Leistungsphasen: In den ersten Leistungsphasen der Grundlagenermittlungen und der Vorentwurfsplanung schaut man erst mal, ob das Bauvorhaben überhaupt machbar ist. Das Projekt von Weleda ist schon an der Grenze des Machbaren und die Einschätzung dessen basierte auf meiner Projekterfahrung. Deshalb sind wir in den frühen Leistungsphasen nicht zu dem Schluss gekommen, dass es nicht funktioniert. Ein wichtiger Faktor dafür war die Festigkeit des Materials. Deshalb war es auch gut, dass die Materialentwicklung bzw. die Vorabentwicklung der Rezeptur in meinen Händen lag. Anhand des Materials konnte ich abschätzen, ob das plausibel ist, was ich in der Statik angenommen habe. Fertig entwickelt wurde die Rezeptur für den Stampflehm dann von Jörg Meyer von Conluto.

Sie haben also bereits im Voraus das Material Prüfungen unterzogen – wie genau fanden die Prüfungen statt?

Bei diesem Projekt war es so, dass ich zuerst mit dem Bodengutachter auf der potenziellen Baugrube unterwegs war. Wenn man ein Bodengutachten macht, entstehen nur kleine Bohrlöcher, in die man nicht richtig reinschauen kann. Wir haben uns anhand der bereits vorhandenen Aufschlusspunkte - so heißen die Bohrungen für das Bodengutachten - überlegt, wo es Sinn macht Schürfungen anzulegen. Also haben wir mit einem kleinen Bagger an diesen Stellen Proben entnommen. Im Vergleich zum Baugrund haben wir ein recht kleines Areal ausgemacht, an dem tatsächlich geeigneter Lehm lag. Dieses Material habe ich ins Labor mitgenommen; Vollgeladen war mein Auto dann schon tiefergelegt: Ich habe ca. 600 Kilo Material für die Prüfung mitgenommen.

Im Labor habe ich die Vorentwicklung der Rezeptur gemacht. Ich wusste, welche Festigkeit für dieses Projekt notwendig war, weshalb es grundsätzlich darum ging, ob man mit dem Material diese Festigkeit erzielen konnte. Ich habe dafür aber nicht die Gesteinskörnung von vor Ort genommen, sondern den Baulehm mit einer Modellkörnung vermischt, damit ich anhand der typischen Sieblinie anschauen konnte, was unter den getroffenen Annahmen rauskommt. Die Vorversuche sind positiv ausgefallen, woraufhin ich im anschließenden Bericht empfohlen habe das Material für das Bauvorhaben zu verwenden. Danach habe ich die Rezepturenentwicklung an Jörg Meyer übergeben, der das Material produziert. Er hat mit dem Baulehm und der Körnung vor Ort die finale Rezeptur entwickelt.

Was unterscheidet sich in der Planung mit lokalem zu standardisiertem Material? Gibt es Unterschiede bei den Kosten?

Das Teuerste bei dem Weleda-Projekt war der Orts-termin – also wegen der Materialmitnahme mit dem Auto hin- und zurückfahren (*Anmerkung: Christof Ziegert ist aus Berlin nach Schwäbisch Gmünd angereist*). Im Allgemeinen sind aber die Prüfungen noch recht teuer, sodass es sich tatsächlich nur für größere Bauvorhaben lohnt.

Der eigentliche Unterschied ist die Materialentwicklung, welche auf den regionalen Baulehm mit den lokalen Zuschlagstoffen abgestimmt ist. Die Eignungsprüfungen des Baulehms mit der Rezepturabschätzung kosten ca. 2.000 Euro. Die Eignungsprüfung beinhaltet die Bindekraftprüfung, Schwindmaß, etc. und die Entwicklung der Vorab-

rezeptur wird anhand der Zuschläge erstellt. Das ist beim Stampflehm am aufwändigsten: Die Probekörper sind viel größer und damit auch die Mengen, die man bewegen muss. Bei Lehmputz kostet die Prüfung weniger, weil die Probekörper nur 4 x 4 x 16 cm groß sind. Beim Stampflehm haben wir 20 cm große Würfel.

Für das Weleda-Projekt mussten wir zusätzlich noch das E-Modul untersuchen, also die Steifigkeit, weil oben noch mal ein ganzes Stück Holzfassade draufkommt. Das war wichtig, um diese ganzen Anschlüsse zu bemessen.

Die anschließende Qualitätsüberwachung im laufenden Baustellenbetrieb gibt es bei jeder Bauweise, die tragend ausgeführt wird und führt nicht zu zusätzlichen Kosten im Bereich des Lehmbaus. Die Materialprüfungen, die Jörg Meyer momentan während des Baus macht, sind also nichts Außergewöhnliches. Bei jedem Betonmischwerk werden diese ebenfalls durchgeführt. Davon bekommt man aber normalerweise nichts mit.

Welche Voraussetzungen muss man erfüllen, um ein solches Gebäude statisch zu berechnen zu können?

Wir haben in Deutschland ein Regelwerk zum Lehmbau - die Lehmbau Regeln. Für Stampflehm im tragenden Lehmbau ist dort aber nur der Gültigkeitsbereich für die Gebäudeklassen eins und zwei festgelegt, wobei das nicht auf das Bauvorhaben von Weleda zutrifft. Aber im Prinzip bedeutet das, jeder kann Gebäudeklasse eins und zwei berechnen. Für alles, was darüber hinausgeht, braucht man schon eine gewisse Erfahrung und Kompetenz.

Beim Lehmsteinbau gehen wir aus dieser Begrenzung raus. Im September wird der Entwurf veröffentlicht von der neuen Lehmsteinmauerwerksnorm, mit der Gebäudeklasse vier möglich sein wird (*Anmerkung: Die DIN-Norm 18940 'Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung' wurde im Juni 2023 veröffentlicht*). Diese haben wir als Büro verfasst und sind dann im Normausschuss beschlossen worden. In Deutschland setzen wir uns dafür ein, dass der Lehmbau die breite Masse geht - Ich spreche hier auch für den Dachverband Lehm e.V.. Dafür muss es Regelwerke geben anhand dessen das jeder realisieren kann.

Es gibt viele Kolleg:innen, die der Meinung sind, dass Normen ihre Kreativität einschränken würden und dann kann es doch jeder. Aber genau das ist doch:

jeder sollte es können! Das ist ein positives und kein negatives Argument. Personen, die diese Ansicht vertreten, haben Angst, dass dann nicht mehr „genug“ für sie da ist. Meine Erfahrung ist je breiter man Wissen streut, desto mehr kommt bei einem selbst an, weil die Gesamtbewegung einfach größer wird. Ich meine das so: Vielleicht wird mein Kuchenstück schmaler, aber dadurch, dass der Kuchen größer wird, ist das schmale Kuchenstück dann immer noch mehr als vorher. Ich bin davon zutiefst überzeugt, dass es so einfach richtig ist und erlebe das genau so.

Haben Sie schon andere Projekte realisiert, bei denen das lokale Material vor Ort wiederverwendet wurde?

Die Anfragen häufen sich. Letztes Jahr (2021) hatte ich drei Anfragen zur Untersuchung des lokalen Baulehms für Stampflehmprojekte: Eins davon ist im Ausland, ein anderes wurde nicht realisiert und das Dritte ist das Weleda-Projekt, welches dann gebaut wurde. Wir hatten noch ca. fünf bis sechs Anfragen zur anderweitigen Nutzung von lokalem Baulehm, wie zur Herstellung von Lehmsteinen, Lehmputzen und Lehmmauermörtel.

Im Moment landet vieles bei mir auf dem Schreibtisch oder bei uns im Labor. **Das nimmt langsam auch Ausmaße an, dass man wirklich darüber nachdenken muss sich breiter auszustellen.**

Gab es auch schon Materialprüfungen, bei denen Sie zu dem Ergebnis gekommen sind, dass sich das Material nicht für die Verwertung im Lehmbau eignet?

Ja, zum Beispiel hat die Stadt Göteborg mir Material geschickt, welches vom U-Bahn-Bau in Göteborg stammte. Sie wollten zukünftige Schulen und Kindergärten mit diesem Material in Form von Lehmsteinen, -putz, -mauermörtel und vielleicht auch Stampflehmwänden ausstatten. Deshalb haben sie mich um eine Einschätzung gebeten und ich habe das Material daraufhin untersucht. Göteborg liegt an der Küste und deshalb kam bei den Untersuchungen heraus, dass der Salzgehalt im Boden zu hoch war. Dieser hätte Ausblühungen im späteren Baustoff bewirkt. Man kann Salze zwar auswaschen, aber dazu braucht man extrem viel Süßwasser, weshalb sie sich dann dagegen entschieden haben. Das ist zum Beispiel ein Grund, warum es nicht verwertbar ist.

In Berlin ist es häufig der Fall, dass nicht genug Bindigkeit da ist. Aber da ist der Nordosten tatsächlich

eine unrühmliche Ausnahme. Ansonsten klappt das fast in ganz Deutschland, dass man geeigneten Lehm findet. Es ist eher eine Frage von mehr oder weniger Aufbereitung, die notwendig ist. Zum Beispiel ist das größte Problem, welches Jörg Meyer mit dem Lehm für das Weleda-Projekt hatte, dass das Material relativ fett ist. Man würde denken ‚je stärker, desto besser‘, aber es klumpte auch umso mehr und ist deshalb schwieriger mit den Zuschlägen zu vermischen.

Es ist also in den meisten Fällen eine Frage des Aufwandes für die Aufbereitung und nicht der generelle Einsatz. Die Wahrscheinlichkeit, dass ich auf geeigneten Baulehm treffe, ist tatsächlich in Deutschland bei weit über 50 Prozent.

Welche Problematiken sehen Sie im aktuellen Bauwesen bezüglich des Bauens mit Aushub? Wieso wird das noch nicht öfter gemacht?

Im Moment haben sich die Ressourcen- und Entsorgungsfrage sowie die Transportkapazitäten noch nicht so dramatisch zugespitzt, dass es wirklich eine Schlüsselrolle spielt mit Aushub zu bauen. Aber wir sind davon gar nicht mehr so weit entfernt. Uns fehlen nur noch wenige Stellschrauben, wie zum Beispiel finanzielle Anreize oder die ökologische Gesamtbewertung, bis es tatsächlich bei jedem Bauvorhaben ernsthaft geprüft wird.

Ein ganz schönes Beispiel aus einer anderen Zeit: In den 1950er Jahren wurde im Osten Deutschlands sehr viel mit Stampflehm gebaut – Ganze Siedlungen, Mehrfamilienhäuser, tausende Wohneinheiten allein in der Stadt München bei Halle! Ich habe einen Schriftwechsel von einer Baufirma und der dortigen Baubehörde gelesen, indem es hieß: „Liebe Baubehörde, wir könnten uns auch vorstellen, dreistöckig in Lehmbauweise zu bauen – wir trauen uns das jetzt zu.“ Da hat die Baubehörde geantwortet, dass das gute Neuigkeiten wären, aber der Aushub eines Kellers reiche nur für genau für zwei Geschosse – Also wurden weiterhin zwei Geschosse gebaut. Sie haben das, was sie für die Keller ausgehoben haben im Hochbau eingebracht. Und das ist ein Vorgang, der theoretisch irgendwann wieder rückgängig gemacht werden konnte – komplett ohne Transport. Damals war der Grund die Mangelwirtschaft, aber wir sind aktuell wieder in einer Krisensituation, dem Klimanotstand, in der wir auf solchen Erfahrungen aufbauen können.

Welchen primären Vorteil sehen Sie im Bauen mit Aushub? Und welche Potenziale gibt es vielleicht so in der Zukunft?

Ich sehe das größte Potential in einem angemessenen Umgang mit unseren zur Verfügung stehenden Ressourcen und an diesen Punkt müssen wir kommen. Die Verwendung von Lehm im Bauwesen als gleichgestellter Baustoff spielt dabei eine wichtige Rolle. Es ist nur noch die Frage, wie man es sinnvoll organisiert.

„Architects for Future“ haben mich mal gefragt, ob die Prüfung von Baugrubenaushub bezüglich seiner Verwendbarkeit nicht verpflichtend gemacht werden könnte. Und dann kam die Frage, wer das machen könnte, ob das nicht vielleicht der TÜV übernehmen könnte. Da habe ich mich erinnert, dass es nach dem Zweiten Weltkrieg – ich bin noch nicht so alt, dass ich immer auf alte Sachen verweise, aber das sind schöne Parallelen – über Deutschland verteilt ein ganzes Netz an sogenannten ‚Lehmbau Lehr- und Beratungsstellen‘ gab. Dort konnte man mit seinem Baulehm hingehen und nachfragen, wofür er sich eignet. Diese Beratungsstellen hatten die Funktion: Die Organisation von fachkundigen Baulehmprüfungen im regulären Bauwesen.

Interview mit Jörg Meyer

Inhaber des Unternehmens Conluto® - Vielfalt aus
Lehm, 07.2022
zum Weleda-Projekt

Zu Conluto:

Wir verarbeiten bei uns im Werk nur Aushub aus Baustellen aus dem näheren Umkreis von 10 bis 15 Kilometern. Das machen wir sowieso schon seit 29 Jahren so. Es geht um Aushub von Großbaustellen, bei denen große Mengen anfallen. Das ist teilweise schon in den Ausschreibungen geregelt. Der Bauherr oder der Architekt kontaktiert uns schon vorab, ob wir etwas gebrauchen könnten, und der Bauherr spart sich dadurch die Kosten der Entsorgung.

Welcher Lehmbaustoff wird in Ihrem Werk am meisten hergestellt?

Lehmunterputz – das ist unser Kernprodukt. Dicke Lagen an Putzschichten werden einfach jeden Tag gebraucht. Stampflehm wie bei diesem Bauvorhaben ist bisher noch eher eine Randerscheinung.

Reicht der Aushub der drei Gebäude aus, um die acht Meter hohen Stampfwände für die Lagerhalle zu bauen?

Es ist so gedacht, dass das Aushubmaterial nicht weggefahren wird. Mit dem Aushub wird auch die Landschaft um die Gebäude modelliert. Der Lehm ist nur ein kleiner Teil, den wir von dem Aushub nehmen. Insgesamt wurden ungefähr 50.000 bis 60.000 Kubikmeter Material ausgegraben. Wir verbauen nur 1.900 Kubikmeter davon.

Um was für einen Lehm handelt es sich bei dem Bodenaushub, den Sie vorgefunden haben?

Hier gibt es alles - von fetten Tonen bis mittelfetten Lehm. Das Material wurde vorher untersucht und dementsprechend hat der Geologe beim Abbaggern geschaut, dass nur der brauchbare Lehm an der Seite gelagert wird, sodass wir hier nur den fetten Lehm haben.

Wie wurde das Aushubmaterial aufbereitet?

Das Material wird direkt auf der Baustelle gelagert. Dann kommt die Gesteinskörnung dazu und es wird vermischt. Dafür haben wir eine Maschine mitge-

bracht: die zerkleinert den Lehm und mischt ihn dann mit den Zuschlagstoffen. Anschließend wird das Material gestampft.

Welche Problematiken sind bei dem Aushubmaterial aufgekommen?

Der Gesteinsanteil im Aushub ist nicht verwendbar. Der Stein, der hier ausgehoben wurde, ist kein reiner Fels, sondern Steine mit Lehmanteil. Die lassen sich nicht brechen, weil sie die Löcher vom Brecher mit Lehm verkleben. Außerdem gibt es das Problem, dass der Lehm recht fett ist und für die Stampflehm-mischung muss ein hoher Feinanteil im gebrochenen Gestein sein. Das war mit dem Material hier nicht möglich und hätte nicht in einem Kosten-Nutzen-Verhältnis zu fertig gebrochenem Material gestanden.

Sie sind für die Mischung verantwortlich – Wie wird diese getestet?

Es werden Würfel (20 x 20 cm) gestampft, die vier bis sechs Wochen trocknen und dann abgedrückt werden. Eine Abdrückmaschine stellt fest wie viel der Würfel aushält – das wird beim Beton genauso gemacht. Der Stampflehm muss mindestens drei Minuten Druckfestigkeit pro Quadratmillimeter haben und das muss nachgewiesen werden. Das macht eine zertifizierte Prüfzelle; Für dieses Projekt hat es eine Prüfzelle in Detmold gemacht, eine ganz normale Betonzertifizierungsstelle. **Ursprünglich ist der Stampflehm-bau der erste Schalungsbau gewesen und daraus ist der Betonbau entstanden. Die Testmethode ist also die gleiche.**

Als Qualitätssicherung im Baubetrieb, nehme ich auch alle 50 Kubikmeter, die hier gemischt werden, Proben. Daraus werden dann jeweils drei Würfel hergestellt und die werden wiederum abgedrückt.

Wie findet der Mischvorgang genau statt?

Wir haben dafür eine Maschine konzipiert. Im Computer wird die Rezeptur eingestellt: hier sind das ungefähr ein Teil Lehm und 3,3 Teile Gestein. In eine Kammer wird der Lehm eingefüllt und in die andere das kieshaltige Material. Das wird vermischt und dann kommt Wasser dazu.

Wie erfolgt der Einbau des Materials?

Das erdfeuchte Material wird in Wannen hoch transportiert, anschließend in dünnen Schichten eingebaut, immer zehn bis zwölf Zentimeter, und dann verdich-

tet. Wir müssen das Material recht feucht einbauen wegen der Hitze und Trockenheit. Die Hitze bringt ihre Herausforderungen mit sich, wenn das Material lange steht, muss es immer wieder befeuchtet werden. Zur Testung zwischendrin gibt die Fallprobe, die man macht und die auch in dem Regelwerk (*Lehmbau Regeln, Dachverband Lehm e.V.*) beschrieben wird: Man drückt eine Kugel zusammen und lässt diese aus einem Meter fallen. Sie sollte in drei bis vier Teile zerfallen. Wenn es ein Klumpen bleibt, ist das Material zu nass, viele kleine Stücke deuten auf Trockenheit hin.

Hat das Aushubmaterial in dem Bauvorhaben noch eine andere Verwendung?

Ja, zur Modellierung der Landschaft und es wird auch wahrscheinlich für den Innenputz des Verwaltungsgebäudes verwendet, wenn noch etwas übrigbleibt. Es muss dann dementsprechend aufbereitet werden.

Was war die größte Herausforderung bei diesem Projekt?

Die Herausforderung, dass der Lehm hier anders ist als der bei unserem Werk Blomberg. Bei uns gibt es eher Lösslehm und der Lehm hier hat eine andere Entstehungsgeschichte durch die Schwäbische Alb. Deswegen ist das Material hier auch sehr unterschiedlich, verworfen und die Farben ändern sich sehr schnell - es ist eben etwas anders. Dass das Material direkt vor Ort gemischt wird, ist für uns das erste Mal. Deswegen auch die Maschine, die extra dafür konzipiert wurde.

Welchen primären Vorteil sehen Sie im Bauen mit Aushub?

Lehm ist ebenfalls zu 100 Prozent wiederverwendbar - das Cradle-to-Cradle-Prinzip ist bei Lehm komplett umsetzbar. Ich könnte den Stampflehm, den wir hier verwenden, theoretisch wieder aufbereiten und könnte damit wieder bauen. Es gibt sonst keinen Baustoff, aus dem ich wieder genau das Gleiche daraus bauen kann - nur durch Aufbereitung.

**Interview mit
Dipl.-Ing. Martin Car**

vom Österreichischen Baustoff-Recycling Verband,
14.03.2023

Martin Car zum Österreichischen Baustoff-Recycling Verband (BRV):

Der Baustoff-Recycling-Verband ist ein Verband von produzierenden Recycling-Baustoff-Betrieben. Wir haben etwa 110 Anlagen bei uns, die von ca. 90 Mitgliedsfirmen betrieben werden. 1990 hat sich der Verband gegründet; Wir sind also seit über 30 Jahren aktiv.

Der BRV ist ein freier Wirtschaftsverband und hat keine Zuwendungen, das bedeutet wir sind nicht politisch abhängig. Allerdings haben wir sehr gute Vernetzungen mit der Auftraggeberseite sowie zu Behörden und zur Wissenschaft. Aber es gibt nicht nur den Baustoff-Recycling Verband, sondern auch einen Qualitätssicherungsverband, den Österreichischen Güteschutzverband Recycling-Baustoffe (GSV), in dem beispielsweise das Land Niederösterreich, die TU Wien und ähnliche Organisationen vertreten sind. Der Baustoff-Recycling Verband ist als Instrument der Unternehmen gedacht, während der GSV als objektivierte Qualifikationsgruppe fungiert, bei der die Qualität von neutralen Stellen kontrolliert wird. Unser Ziel ist es die Thematik durch die Herausgabe von Richtlinien und Abhaltung von Seminaren und Schulungen an die breite Fachöffentlichkeit zu bringen; Beginnend von vom Häuslebauer über den Behördenvertreter der Länder, also die Bezirkshauptmannschaft (BH), bis hin zur Wissenschaft. Wir versuchen Gesetze, Verordnungen, technische Standards, Normen und Produkte bezüglich der Praxistauglichkeit zu vereinfachen und mittels Informationsmaterialien zu verbreiten.

Wie ist das Verhältnis zwischen der Verwertung von Aushubmaterialien im Vergleich zu Bau- und Abbruchabfälle bei der Herstellung von Recycling-Baustoffen?

Recycling-Baustoffe werden in Anlagen hergestellt. Es handelt sich hierbei um behandelte Abfälle, also mineralische Baurestmassen, die zum Beispiel durch Brechen, Sortieren, Klassieren oder durch Reinigungsprozesse wie Sieben und Sichten aufbereitet werden. Behandelte Stoffe bestehen schätzungsweise

zu über 90 Prozent aus mineralischen Fraktionen von Baurestmassen wie Asphalt, Beton, Mauerwerk und Ziegel. **Nur relativ geringe Fraktionen kommen von Aushubmaterialien, weil derzeit die Verwertung von Aushub direkt auf der Baustelle stattfindet wie beispielsweise als Bodenausgleich im Straßenbau.** In dieser Form wird Boden in großen Massen verwendet, was wahrscheinlich einen größeren Umfang darstellt als die Mengen an Materialien, welche in die Herstellung von Recycling-Baustoffe fließen. Jedoch handelt es sich um eine direkte Verwertung womit der Aushub nach rechtlicher Regelung nicht zu Abfall wird, da er auf der Baustelle bleibt.

Wenn man Aushub nicht auf der eigenen Baustelle verwendet, stellt sich die Frage, ob er auf die Deponie oder in eine Recyclinganlage kommt; In den meisten Fällen wird er deponiert. Nach der Statistik vom Bundesabfallwirtschaftsplan sind 70 bis 80 Prozent des anfallenden Aushubs Deponiegut und ca. 22 Prozent fließen in die Verwertung. Aber die Statistik ist verfälscht, weil sie sich nur auf Abfälle bezieht. Aushub wird im größeren Ausmaß verwertet, aber eben in Form von Boden und nicht als Recycling-Baustoff.

Um die Frage abzuschließen: Für Recycling-Baustoffe werden einige 100.000 Tonnen Aushub verwertet, aber die werden bei uns nicht extra erfasst. **Dass man aber Böden in großen Mengen zu Recycling-Baustoffen aufbereitet, ist derzeit noch nicht der Fall.**

Für welche Recycling-Baustoffe werden Bodenaushubmaterialien aktuell eingesetzt?

Für Recycling-Baustoffe wird Bodenaushub meist nur als Zumischkomponente verwendet, das heißt zur Verbesserung der technischen Qualität. Es können verschiedene technische Qualitäten sein, wie die Sieblinie oder der Los-Angeles-Koeffizient, also der Zertrümmerungsfaktor. Aber wie bereits erwähnt ist die Verwertung von Aushubmaterialien zur Herstellung von Recycling-Baustoffen eine sehr kleine Schiene. Aktuell arbeiten wir an der ÖNORM B 31 41, die wie die Richtlinie für Recycling-Baustoffe speziell auf die Verwertung von Aushubmaterialien ausgelegt ist.

In Realität verwendet man Aushubmaterialien meist ungebunden als Tragschichtmaterial, denn dort braucht man Millionen Tonnen von Material. Wenn man sich eine Autobahn mit einer Breite von 25 Meter vorstellt und der Aufbau der Tragschicht aus 40 Zentimeter für die untere und 30 Zentimeter für die

obere Schicht besteht, dann benötigt man für einen Kilometer Autobahn überschlagen 17.000 Kubikmeter Material. Das sind umgerechnet ungefähr 30.000 Tonnen Recycling-Baustoffe nur für einen Kilometer neue Autobahn. Und es ist eine riesige Menge an hochwertigen Materialien, die wirklich Primärbaustoffe substituieren, so wie es das Gesetz vorsieht. Nur es gibt eben relativ billige Naturbaustoffe, bei denen der Hersteller keine komplexe Umweltverträglichkeit prüfen und Risiken eingehen muss und deshalb eher industriellen Schotter verwendet. Und daher wird für die Betontechnologie oder Asphaltproduktion derzeit nicht unbedingt Bodenaushub verwendet.

Gibt es Ihrer Meinung nach Problematiken bei Verwertung von Aushubmaterialien, welche durch die Abfalleigenschaft entstehen?

Aufgrund der Abfallrahmenrichtlinie gilt in ganz Europa, dass die Abfalleigenschaft endet, wenn der Stoff verwertet und anschließend wieder einer Verwendung zugeführt wurde. Das ist der Grund dafür, warum die Abfalleigenschaft von Recycling-Baustoffen nicht mit der Produktion endet. Die Produktion von einem Baustoff ist nicht die Verwendung. Erst wenn man beispielsweise das Material als ungebundene Tragschichten in den Straßenbau einbringt ist das Ende der Abfalleigenschaft erreicht. Das bedeutet, das Ende der Abfalleigenschaft ist nicht dort, wo wir es gerne hätten: Nämlich im Betrieb. Wäre dies der Fall, könnten wir Produkte verkaufen; So sind wir gezwungen Abfälle zu verkaufen. Die Problematik liegt darin, dass Abfälle nur von Abfallsammlern übernommen werden dürfen und das ist natürlich eine Katastrophe, weil der Markt dadurch eingeschränkt wird. Tatsächlich sind zertifizierte Baustoffe eben noch Abfälle und das funktioniert nicht wirklich. Seit 2016 gibt es durch die Recycling-Baustoffverordnung das vorzeitige Abfallende. Es ist in Österreich auf die Qualitätsklasse UA begrenzt, was der besten Umweltqualität entspricht. Die Abfalleigenschaft endet aber auch hier nicht mit der Produktion, sondern mit der anschließenden Weitergabe oder Verkauf. Das betrifft heute ca. 90 bis 95 Prozent der Recycling-Baustoffe.

Für Bodenaushub gibt es dieses Spiel nicht. **Dafür gilt das Abfallende nur dann, wenn man es zu 10 bis 30 Prozent einem UA-Material zuführt. Bei 100 Prozent Boden bleibt das Material im Abfallregime.** Wir bemühen uns darum ein vorzeitiges Abfallende für Bodenaushub in den nächsten Jahren zu erreichen.

Sind Recycling-Baustoffe im Verkaufspreis vergleichbar zu konventionellen Baustoffen?

Ja, weil sie sich sonst nicht verkaufen würden. Grün ist vielleicht das Ziel, aber unter Anführungszeichen: Ein öffentlicher Bauherr darf öffentliche Gelder nicht für Luxusartikel verwenden, sondern muss immer im Sinne der Sparsamkeit und der Zweckmäßigkeit vorgehen. Das heißt, die Gemeinde ist verpflichtet den Bestpreis anzunehmen. Man kann Anforderungen an die Qualität stellen, aber im Endeffekt entscheidet meistens der Preis. Damit können Recycling-Baustoffe nur reüssieren, wenn sie vergleichbar oder billiger sind. Man muss dazu sagen, dass regional die Preise für Baustoffe sehr unterschiedlich sind. Aber innerhalb einer Region sind Recycling-Baustoffe immer im gleichen Preissegment wie normale Baustoffe.

Gibt es Unterschiede bei den Herstellungskosten zu konventionellen Baustoffen?

Die Mehrkosten sind die Umweltverträglichkeitsprüfung, die doch einiges ausmacht. Aber in Wirklichkeit gehen die meisten Kosten auf Transporte zurück - Je näher, desto billiger. Es geht gar nicht darum zu sagen, was der Baustoff als solches kostet, ob das 4 Euro oder 4,50 Euro pro Tonne sind, sondern es geht um die Frage: Sind es 10, 20 oder 30 Kilometer Entfernung? Bei den Materialkosten kann man unterscheiden zwischen Recycling-Baustoffen und Bodenaushub, der praktisch keinen Preis hat. Für Boden sind es maximal 3 bis 4 Euro pro Tonne; während für Recycling-Baustoffe die Tonne geschätzt 12 bis 15 Euro kostet, was ganz andere Preise sind als beim Boden.

Ist es ein finanzieller Anreiz für Auftraggeber:innen anfallenden Aushub in die Herstellung von Recyclingbaustoffen zu geben?

Für Boden ist der Anreiz sehr gering, weil jedes Bewegen von Boden teuer ist. Wenn man Boden zwischenlagern und wieder aufnehmen muss, kostet es mehr als die Deponierung. In Österreich gibt es über 1.100 Deponien und davon sind 900 Bodenaushubdeponien.

Was müsste sich ändern, um lehmhaltigen Boden-

aushub als eine Art Recycling-Baustoff zu verwerten?

Lehm ist ein Material, den wir für die Herstellung von Recycling-Baustoffen nicht benötigen. Ich meine damit die Recycling-Baustoffe als Gesteinskörnung. Lehm ist aber ein toller Baustoff und kann zum Beispiel Verwendung im Deponiebau als Dichtschichtmaterial finden, da man für Baurestmassendepoien zweilagige Tonschichten benötigt. Lehm lässt sich auch im Hochbau, etc. verwenden. Hier müsste man ein Regelwerk für den Lehmabbau schaffen. Da stellt sich die Frage, wer daran Interesse hat. Ich würde sagen, aus ökologischer Sicht müsste man Interesse haben. **Aber gleichzeitig ist es natürlich wie überall in der europäischen westlichen Welt: Wenn eine Industrie dahinter ist, dann gibt es finanzielle Interessenslagen, wenn aber keine Industrie dahinter steht, ist es schwieriger.** Man müsste schauen, welche Firmen sich für Lehm interessieren, diese an einen Tisch setzen und die sollen dann gemeinsam ein Regelwerk schaffen.

Was sind die Vor- bzw. Nachteile der Nutzung von Aushubmaterialien in Recycling-Baustoffen?

Ich glaube, da muss man zu unterscheiden in Recycling-Baustoffe nach Recycling-Baustoffverordnung, das heißt Mischungen mit Bodenaushub bis zu 50 Prozent. Da gibt es meiner Meinung nach keine Vor- oder Nachteile in dem eigentlichen Sinn, sondern es ist gleichwertig. Aus diesen Millionen Tonnen Aushub sind sicher einige Prozent ungeeignet, weil sie tonig, lehmig oder sandig sind. Wenn man diese Anteile ausschließt und man wirklich das für Recycling-Baustoff geeignete Material hernimmt, dann haben wir sehr gutes Ausgangsmaterial und das ist vollkommen gleichwertig. Es gibt keinen Grund warum dieses Material nicht als Recycling-Baustoff verwenden sollte.

Die zweite Schiene ist, wenn man mehr als 50 Prozent Bodenaushub verwenden will. Wir haben eigentlich eher politische Probleme, dass zum Beispiel die Rohstoffindustrie keine verstärkten Interessen hat. Genehmigte Gruben für Mineralrohstoffe haben Auflagen, Genehmigungen und Beschränkungen. Wenn nun nebensächlich eine Baugrube entsteht und das ausgehobene Material ohne irgendwelche Genehmigung verkauft wird, gibt es Probleme mit der Rohstoffindustrie, würde ich sagen. Aber grundsätzlich ist es das gleiche Material und es gibt überhaupt keinen Grund, warum man das nicht technisch aufbereiten sollte. Es ist eher die Frage der Organisation: Führt man das

Material in stationäre Anlagen? Die müssten natürlich die Genehmigungen für die Schlüsselnummern und die entsprechenden Technologien haben. Grundsätzlich ist aus meiner Sicht alles möglich und es sollte stark gefördert werden.

Im Dezember 2022 wurde eine neue österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie von der Regierung veröffentlicht. Sie bestimmt, dass wir bis zu Jahr 2030 25 Prozent Primärbaustoffe einsparen müssen. Recycling funktioniert schon sehr gut: Bei Betonrecycling gibt es eine Recyclingquote von 95 Prozent. Wenn man die auf 98 Prozent bringt, dann gewinnt man in der Gesamtbetrachtung kaum etwas dazu. Durch Recycling von Ziegeln kann man ein bisschen mehr dazu beitragen und bekommt damit vielleicht 3 bis 5 Prozent bis 2030 eingespart. Aber wie realisieren wir die Einsparung von den restlichen 20 Prozent? Meiner Meinung nach ist die Antwort: aus dem Bodenaushub. Wenn dort Recycling-Baustoffe gewonnen werden, haben wir viele Millionen Tonnen weniger Abfall und gleichzeitig Millionen Tonnen neue Baustoffe. Das ist das eigentliche Ziel, weil wir damit wirklich Naturressourcen sehr stark schonen können. Derzeit brauchen wir in der Bauwirtschaft ca. 100 Millionen Tonnen Baustoffe, wovon ungefähr 10 bis 11 Millionen Tonnen aus der Recyclingwirtschaft kommen. Das bedeutet, wir haben nur eine Recyclingquote von 11 Prozent. Das liegt nicht daran, dass wir so schlecht im Recycling sind, sondern dass wir nicht so viel Abbruchmaterialien haben. Wir müssen zusätzliche Quellen suchen und da ist der Bodenaushub die Quelle schlechthin.

Interview mit **Christopher Jakubiec**

Abfallwirtschaftsbeauftragter der Firma Hans-Heimo Gänger GmbH mit Bodenaushub-deponien in Strasshof, 24.04.2023

Kurze Vorstellung von Christopher Jakubiec und der Firma Hans Heimo Gänger GmbH:

Ich persönlich war 10 Jahre lang bei einem Ziviltechniker für technische Chemie als Inspektionsstellenleiter für ausführende Firmen zur Beratung zu den Themen Entsorgung, Verwertung und Recycling zuständig. Als die Firma Gänger begann Deponien sowie einen Recyclingplatz zu eröffnen, wurde mein Interesse geweckt und ich wechselte von der Beratung zur Ausführung – in der Position als Abfallwirtschaftsbeauftragter.

Wir stehen aktuell noch immer am Beginn der Recyclingrevolution. Die Zukunft gehört der Kreislaufwirtschaft und in diesen Bereich möchten wir als Firma Gänger mitentwickeln. Unser Unternehmen besteht seit über 60 Jahren und bietet höchste Qualität in allen Bereichen, in denen wir tätig sind.

Welche Arten von Böden sind auf den Bodenaushubdeponien vorhanden und welcher macht den Großteil aus?

Hauptsächlich befüllen wir Bodenaushubdeponien mit sandigem und schluffigem Material. Wie bereits erwähnt versuchen wir Materialien, die als „Abfall“ anfallen, wiederzuverwerten: Humus wird von uns aufbereitet (gesiebt) und verkauft; Auch Schotter und Kies bemühen wir uns zu sieben und stellen damit extern geprüfte Produkte in den Körnungen 0/16, 16/32 und 30/x her. Was wir nicht bei der Verwertung beeinflussen können ist Aushub von externen Firmen, die auf unseren Deponien ablagern. Eine weitere Art von Böden, die in den letzten Jahren mehr geworden ist, sind Gleisaushubmaterialien. Auf einer Bodenaushubdeponie dürfen diese, sofern sie nicht chemisch belastet sind und weniger als 20 Volumenprozent Gleisschotter beinhalten, abgelagert werden.

Gibt es auf den Bodenaushubdeponien ein Ablagerungssystem nach Herkunft, Menge oder Zusammensetzung des Bodenaushubs?

Ja und nein. Prinzipiell ist es so, dass wir auf der gesamten Fläche einer Deponie immer nur Teilbereiche

behördlich zur Ablagerung genehmigt bekommen. Beim Fortschritt der Ablagerung erfolgt immer eine Kontrolle der Behörde, wobei bautechnisch als auch chemisch darzustellen ist, dass alles den Vorgaben und dem Stand der Technik entspricht. Die sogenannte Kollaudierung der nächsten Flächen wird jeweils in einer Verhandlung mit den zuständigen Personen der Behörde betreffend Wasserrecht, Umweltschutz und Abfallwirtschaft genehmigt. Speziell auf unserer größten Aushubdeponie „Am Reuhof“ gibt es noch die Möglichkeit Bodenaushub mit erhöhten Grenzwerten abzulagern, diesen müssen wir durch ein Vermesser erfassen lassen und er darf nicht im Grundwasserschwankungsbereich abgelagert werden.

Wie viele Tonnen Bodenaushubmaterial lagern Sie jährlich ab?

Ablagerungen von reinem Aushubmaterial haben wir im Schnitt ca. 30.000 Tonnen pro Monat, also 360.000 Tonnen pro Jahr.

Wieviel kostet die Ablagerung von nicht verunreinigtem Bodenaushub (Euro/Tonne)?

Der Preis für die Deponierung ist sehr variabel und hängt von Menge pro Zeitraum, Stecke, freies Schüttvolumen und auch von der Maut ab. Ebenso verursachen die Geräte, die den Aushub laden oder nachher auf der Deponie bearbeiten, Kosten. Die reine Ablagerung für externe Anlieferungen kann ich mit ca. 5 Euro pro Tonne beziffern.

Wie groß ist der jährliche Anteil der Ablagerung von Kleinmengen?

Bei uns sind das 10 bis 20 Prozent. Hauptsächlich stammen diese von externen Mitbewerbern.

Wie wird die schadstofffreie Ablagerung bei Kleinmengen gewährleistet?

Alle unserer Deponien haben bereits auf der Waage Kameras und geschultes Personal. Sollte das Material nicht den Anforderungen entsprechen, werden die Anlieferungen abgewiesen. Des Weiteren sieht durch unser Deponiepersonal (z.B. Ladefahrer:in) jede Fuhre an und kann im schlimmsten Fall diese Ablagerungen wieder auf den LKW laden. Wir sind diesbezüglich sehr strickt.

Wie groß ist der Umkreis in Kilometern, über den Sie Aushub erhalten?

Im Regelfall bedienen wir einen Umkreis von 50 Kilometern.

Wo sehen Sie die Herausforderungen für die vermehrte Verwertung von Aushub im Bauwesen?

In Österreich ist die Gesetzgebung für die Wiederverwertung von Aushub sehr erschwerend. Abgesehen von der Qualitätsklasse UA von Bodenaushub für Recycling-Baustoffe, unterliegt der Hersteller der Dokumentationspflicht. Es muss dokumentiert werden wem das Material verkauft wird, wo und wann es eingebaut wurde sowie die Menge – wer tut sich so etwas an? Da wird es dann lieber nicht verwertet.

Die Gesetzgebung ist, meiner Meinung nach, eigentlich überreguliert im Bereich Recycling.

Die Abfalleigenschaft für Aushub soll die Entledigungspflicht regulieren – Was ist Ihre Meinung dazu?

In meiner Auffassung ist das nur in Bezug auf Kleinmengen wichtig, die jedoch nur einen geringen Teil des Aufkommens darstellen. Für die Verwertung von Aushub hingegen ist es eher einschränkend.

Sehen Sie Potenzial in der Verwertung von Bodenaushubmaterial – vor allem im Bereich Lehmabbau? Wenn ja, welche Vorteile hätte dies?

Verwertung wird bei unserem Unternehmen groß geschrieben. Auch Lehm wird bei uns eigentlich nie deponiert. Fällt Lehm an so wird er meistens als Dichtschicht auf höherwertigen Deponien benutzt, wofür auch gezahlt wird. Das Material ist sehr begehrt; Wenn davon was anfällt, läuft bei uns das Telefon heiß. Des Weiteren haben wir hier in Österreich meinem Wissen nach eher schottrige Böden, bis auf den Wiener Tegel, welcher erst in tieferen Stufen anfällt. Sonst fallen mir nur See nahe Gebiete und teilweise die Steiermark ein. Das Potenzial des Abbaus hängt natürlich von der möglichen geförderten Menge ab. Hierzu habe ich leider keine Daten.

Für uns ist die Wiederverwertung von Bodenaushub lukrativer als das Deponieren. Für das Ablagern bezahlen wir und sind für die folgenden 10 Jahre für regelmäßige Prüfungen sowie die Etablierung einer sinnvollen Nachnutzung verantwortlich. Wenn wir den Aushub verkaufen ist das für uns eigentlich besser.

Interview mit Roland Starke

Klimaministerium, Abt. Abfallvermeidung und Verwertung, 16.01.2023

Bei dem nachfolgenden Interview handelt es sich um eine Zusammenfassung (kein wörtliches Transskript) des Interviews. Starke repräsentiert darin seine persönliche Meinung als Sachverständiger; das Interview stellt keine akkordierte Stellungnahme des BMK dar.

Aushub wird als Abfall definiert, sobald er bewegt wird – wieso wurde das so festgelegt?

Festgelegt ist es in dem Sinn nicht. Es ergibt sich aus dem Abfallbegriff: Wenn ich mich einer Sache entledige, ist es Abfall bzw. auch wenn ist im öffentlichen Interesse geboten ist, dass die Sache als Abfall gesehen wird.

Bei einem Bauvorhaben ist der Bauherr Abfallerzeuger, weil durch seine angeordnete Tätigkeit Aushub entsteht. Wenn er den nicht verwenden will, sondern sich dessen entledigt, dann fällt es unter den Abfallbegriff. Aktuell wird jedoch diskutiert, ob es bei einem vernünftigen Verwendungszweck dann Abfall ist oder nicht. Bei uns ist klar geregelt, wie auch in der EU-Richtlinie, dass Aushub kein Abfall ist, wenn er vor Ort verbleibt. Das haben wir in unseren Bestimmungen ausformuliert und das funktioniert gut.

Die Frage, ob Abfall oder nicht, nimmt keinen Einfluss darauf, was letztendlich damit gemacht werden darf, soll oder kann. Das ist durch die Physik, Chemie und die Bodenkunde bedingt. Ob ich mich im Abfallregime befinde oder nicht, ist eigentlich irrelevant. Nur formal habe ich dann eben Aufzeichnungspflichten und das wird dann wichtig, wenn ich mich nicht an die Regeln halte.

Wir haben keine Aushubverordnung, wir haben nur den Bundesabfallwirtschaftsplan, der quasi ein standardisiertes Gutachten ist. Es gibt Möglichkeiten unter fachlicher Begründung diesen abzuändern (abhängig vom Fall), aber eigentlich sind die Variationen schon darin eingearbeitet, die es in der Praxis gibt.

In Hinblick auf das gerichtliche Verfahren gegen Porr – Wäre es sinnvoll Aushub als Nebenprodukt zu deklarieren?

Das ist eine gute Frage. Im Endeffekt wurde in dem Prozess keine Verordnung erlassen, sondern der

EuGH beschloss, dass in einem besonderen Fall Aushub als Nebenprodukt anfallen kann. Das ist aber in der Praxis selten - Der normale Baumarkt funktioniert eben anders.

Auf europäischer Ebene und in anderen Ländern wird der Begriff Nebenprodukt schon für Boden verwendet. Meiner Meinung nach ist das jedoch Zweckentfremdung, weil es nicht aus einem Produkt entsteht. Ich glaube auch nicht, dass das eine Zukunft hat, weil die Nebenproduktbedienungen nicht darauf ausgelegt sind.

Im Abfallwirtschaftsgesetz 2002 ist die Hierarchie zur Abfallvermeidung festgelegt – wo könnte man hier bei Aushub ansetzen, damit dessen Abfalleigenschaft beendet werden kann?

Die Problematik bei der ‚Vorbereitung zu Wiederverwendung‘ (2te Stufe der Hierarchie) ist, wie auch beim Nebenprodukt, dass Boden kein Produkt ist. Ein Produkt wird aus einem bestimmten Zweck vom Menschen gefertigt und kann im Idealfall auch wiederverwendet werden. Es werden auch Anforderungen an Produkte gestellt, um auch ein Abfallende zu gewährleisten. Die Recyclingbaustoffe sind ein gutes Beispiel: Sie werden aus Abbruchmaterialien oder Aushub gemacht und müssen bestimmte Produktanforderungen erfüllen. In der Regel handelt es sich hierbei um Eigenschaften, die genau definiert sind.

Aber Boden ist nicht vom Menschen gemacht und er hat keine Anforderungen im Sinn eines Produktes. Boden kann zwar zu einem Produkt werden, jedoch impliziert die ‚Vorbereitung zur Wiederverwendung‘, dass es schon vorher ein Produkt war.

Das Thema Abfallende ist gerade sehr aktuell. Die Problematik ist, wie deklariert man Produkteigenschaften für Aushub? Nach dem Einbau von Aushub können natürlich bestimmte Parameter gefordert werden, aber da ist er schon verwertet. Die Gefahr hierbei ist, dass Pseudodeklarationen entstehen – also dass man Boden irgendeiner Systematik unterwirft. Das ist zum einen aufwendig und zum anderen braucht man diese Information nicht.

Aktuell gibt es das Problem, dass wir kein Abfallende für Recycling-Baustoffe aus Aushubmaterial haben, aber wir arbeiten daran. Hierfür ist ein vorzeitiges Abfallende vorgesehen. Das ist möglich, da man hier in der Kategorie Produkt ist.

Durch die Recycling-Baustoffverordnung wird bereits gesteinhaltiger Aushub verwendet. Wieso ist das bei lehmhaltigem Aushub nicht der Fall?

Bisher wurde dem Lehmbau nicht viel Aufmerksamkeit geschenkt. Wir sind kein Bautechnikinstitut und haben hier auch keine Expertise; Uns geht es darum, was man mit dem Abfallaufkommen macht.

In der Recycling-Baustoff-Verordnung (RBV) ist eigentlich alles geregelt, außer Aushub – aber das ist geplant. Die bisherige Idee ist die Integration von Aushub in die RBV. Lehm würde in dem Fall auch unter diese Regelung fallen. Wenn man beispielsweise Lehmziegel herstellen würde, wäre die Ziegelproduktionsfirma Abfallsammler:in und –behandler:in und müsste auch als solche genehmigt sein. Durch die Herstellung des Produkts Ziegel, wäre die Abfalleigenschaft demnach beendet. Voraussetzung ist die vorhergehende Analyse des Materials, um Qualitätsvoraussetzungen zu erfüllen. Es gibt bereits die verschiedenen Qualitätsklassen, von denen die Klassen A1, A2 und A2-G grundsätzlich für die Nutzung unbedenklich sind. Aber es ist eben wichtig, dass ein Produkt entsteht, welches bestimmte Richtlinien oder Vorgaben im Sinn der Produktdeklaration erfüllt.

Für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Bauwesen wäre es von Vorteil, dass Aushub gar nicht erst zu Abfall werden würde, um die Verwendung dessen zu erleichtern. Wie ist Ihre Meinung hierzu?

Das ist eine Frage, mit der wir uns ebenfalls aktuell beschäftigen. Natürlich wollen wir die Kreislaufwirtschaft fördern, aber die Frage ist, ob das wirklich etwas verbessern würde. Es wird behauptet, dass das Abfallrecht die Kreislaufwirtschaft verhindert. Zugegebenermaßen sind die Regelungen auch recht streng und könnten angeglichen werden, aber im Prinzip ist es möglich, Aushub zu nutzen, wenn man sich rechtzeitig kümmert und diverse Genehmigungen einholt. Grundsätzlich kann man der Meinung sein, dass nicht verunreinigter Aushub kein Abfall sein sollte, wie es in vielen Ländern der Fall ist. In der Slowakei ist es zum Beispiel jetzt so, dass nicht verunreinigter Aushub ein Nebenprodukt ist, d.h. es besteht keine Entledigungspflicht. Was man damit dann machen kann, ist zum Beispiel durch das Naturschutzrecht beschränkt, aber das ist nicht extra dafür ausgelegt.

Aushub macht über 60 Prozent des österreichischen Abfallauskommens aus. Macht es Ihrer Meinung nach Sinn, diesen als gesonderte Kategorie zu betrachten?

Ich glaube, dass Aushub sich nicht so sehr von anderen Abfällen unterscheidet. Wir haben ja zum Beispiel auch Glas und Altpapier dabei, von dem niemandem Schaden nehmen würde – trotzdem ist es Abfall. Grund dafür ist, dass wir nicht wollen, dass es im Wald landet. Aushub unterscheidet sich davon eben nur durch seine enorme Menge. Eigentlich wäre Aushub so gesehen Bauabfall, weil er in der Regel bei Bauarbeiten anfällt. Würde man ihn jedoch dort hinzuzählen, wäre die Recyclingquote bei Bau- und Abbruchabfällen niedriger. Es ist eine Frage, was man statistisch und regelungstechnisch machen will.

Der Behandlungsgrundsatz des Bundesabfallwirtschaftsplans regelt Aushubmaterialien gesondert. Aber das ist nicht so einfach, weil man im rechtlichen Kontext immer nur von „Böden“ redet. Wenn man sich jedoch Aushub anschaut, besteht dieser aus verschiedenen Fraktionen. Es kann zum Beispiel altes technisches Schüttungsmaterial sein, das jedoch auch natürlich gewachsen Boden, der von unten ansteht, beinhalten kann. Die Frage ist dann, wie man das bewertet.

Hinsichtlich der Verwertungsquote von Aushub, die sehr schlecht ist, stellt sich auch die Frage: Liegt es vielleicht nicht daran, dass das Abfallrecht so streng ist, sondern dass die Deponierung einfach so billig ist? Die Deponierung kostet praktisch nichts – die Verwertung auch nicht, aber darum muss man sich eben kümmern.

Es gibt auch von der EU-Richtlinie die Regelung, dass Abfälle, die verwertet werden können, nicht abgelagert werden dürfen; Ein Deponierungsverbot für verwertbare Abfälle. Wenn man das wirklich ernst nimmt, wäre das sehr weitreichend, weil man praktisch jeden Abfall verwerten kann – mit der entsprechenden Behandlung.

Ja – die Verwertung ist immer ins Verhältnis des Aufbereitungsprozesses zu setzen. Hinsichtlich der Verwendung von natürlich gewachsenem Boden im Lehmbau ist das jedoch überschaubar (je nach Verwendung und Tongehalt).

Im AWG 2002 ist beschlossen, dass vom BMK Ausnahmeregelungen unter bestimmten Voraussetzungen festgelegt werden können, welche eine Beendigung der Abfalleigenschaft für definierte Abfälle bedeuten würde. Wäre es sinnvoll, eine solche Ausnahmeregelung für Aushubmaterialien, die keine energiereiche Aufbereitung benötigen, einzuführen? Grund hierfür wäre die Förderung der Aushubverwertung aus dem Bauwesen anstelle der Anlegung neuer Lehmgruben.

In der Abfallhierarchie ist das eine wichtige Thematik; Immer unter der Voraussetzung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit, was jedoch ein dehnbarer Begriff ist. In der Praxis wird immer nach finanziellen Gründen bestimmt, auch wenn diese noch so gering sind.

Wäre es bezüglich der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung sinnvoll Anreize für Unternehmen zu schaffen, um vermehrt Aushubmaterial zu verwenden anstelle „neu“ gewonnener Bodenmaterialien?

In der Kreislaufwirtschaftsstrategie ist unter anderem die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in Österreich angestrebt, was bedeutet, dass auch in diesem Feld Handlungsbedarf besteht. Es gibt mehrere Hebel, die man ansetzen kann. In der letzten Novelle der Deponieverordnung haben wir erstmals ein Deponieverbot für technisches Schüttmaterial, Asphalt, Betonbruch, Gleisschotter und Einkehrsplitt erlassen. Nicht aus dem Hintergrund einer gefährlichen oder schädlichen Ablagerung, sondern ausnahmslos aus dem Grund der Verwertung. Aktuell wird das Material immer noch deponiert - ab 2024 ist das nicht mehr zulässig. So etwas ist jedoch nur möglich, wenn die Materialien zur Verwertung eignen. Und das wird eine der Schlüsselfragen für die Kreislaufwirtschaft sein: Was sind die Kriterien (ökologisch und ökonomisch) für die Verwertbarkeit?

Für das besagte Deponierungsverbot ist festgelegt, dass die Einhaltung der für die Deponie festgelegten Grenzwerte bezüglich der Verunreinigung, das entsprechende Material dort nicht abgelagert werden darf. Wenn die Grenzwerte schlechter sind, dürfen sie deponiert werden.

Wäre eine solche Regelung auch für natürlich gewachsene Böden denkbar?

Ja, jedoch ist es bei einem natürlich gewachsenen Boden um einiges schwieriger festzulegen, wann dieser verwertbar wäre. Bei Gestein funktioniert das

durch die Bestimmung der Körnung nach der Siebung. Bei Lehm geht das nicht. Und selbst wenn es jemanden gibt der beispielsweise daraus Lehmböden machen kann, gibt es 20 Millionen Tonnen Lehm, die jedoch niemand abnimmt und gleichzeitig nicht abgelagert werden darf. Das ist dann ein ökonomisches Problem.

Stimmt, das wäre ein radikaler Schritt, der aktuell nicht funktioniert, da entsprechende Normen für die Verwertung und ein Markt fehlen. Wäre denn hinsichtlich der Förderung dieser Fehlstellungen eine Übergangslösung denkbar? Beispielsweise in Form einer Preiserhöhung für die Deponierung?

Das ist ein anderer Ansatz, den wir bezüglich der Kreislaufwirtschaftsstrategie auch in Betracht ziehen müssen. Bodenaushub ist vom Alsag-Beitrag (Altlastensanierungsgesetz) befreit; Der Preis für die Ablagerung wird durch die Deponien festgelegt und ist nicht sonderlich hoch. Dieser Ansatz wäre wahrscheinlich auch das „Mittel der Wahl“ – Voraussetzung ist eben ein entsprechender Markt.

Sehen Sie persönlich denn Potenziale in der Verwertung von Aushub im Bausektor?

Ja, sicher. Das Problem ist, dass der Bausektor immer noch linear ist - den Kreislauf gibt es so noch nicht. Aber es gibt immer mehr Ansätze, mit denen man die Gerade zu einem Kreis biegen will, was jedoch noch Zeit braucht. Ich glaube, es bedarf bestimmten Druckmechanismen für die Kreislaufwirtschaft (ohne die Scheinverwertung zu fördern). Teil davon sollte auch die Verwertung von Aushub sein, was jedoch in Einklang mit der bestehenden Wirtschaft gebracht werden muss – zum Beispiel, dass der/die Primärproduzent:in auch Abfallbehandler:in ist. Dafür müsste der Umstand beseitigt werden, dass Material, welchen aus diesen Prozessen entsteht, kein Abfall ist. Momentan ist das noch der Fall, was man jedoch durch eine Abfallende-Verordnung legitimieren könnte. Ich glaube auch, dass eine Abfallende-Verordnung für die Entlassung von Aushub aus der Abfalleigenschaft wertvoll für die Kreislaufwirtschaft wäre. Man sieht es bei den Recycling-Baustoffen aus Baurestmassen: Wenn es eine Möglichkeit gibt, durch klare und legale Regelungen diese zu nutzen, dann wird es angestrebt, weil es ökonomisch wertvoll ist.

Interview mit
**Ao.Univ.Prof.i.R. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn.
Franz Ottner**

Institut für angewandte Geologie, Universität für
Bodenkultur Wien, 17.04.2024

Franz Ottner ist Professor an der Universität für
Bodenkultur Wien (BOKU) am Institut für ange-
wandte Geologie. Seine Expertise liegt in der Geologie,
Gesteinskunde, Paläopedologie und Mineralogie im
Speziellen der Tonmineralogie (quantitative Tonmi-
neralanalyse).

Was ist dein Bezug zum Lehm?

Ich empfinde Lehm als großartige Mischung von
unwahrscheinlich vielen Aspekten. Da ist so viel
enthalten: so viel Geschichte, so viele Verwitterungs-
momente und so viel Geologie. Das ist mein Bezug
zum Lehm.

Lehm ist sehr vielfältig: Man kann damit natürlich
Lehmbau betreiben, aber man kann auch über dem
Lehm die Geschichte des Bodens erfahren. Wenn
man ein Profil anschneidet und sich die Tonminerale
anschaut, kann man die Veränderungen, die durch
die Bodenbildung entstanden sind, verstehen. Daraus
kann man wiederum rückschließen, was in den letz-
ten 10.000 Jahren passiert ist.

**Welche Bedeutung würdest du der Mineralogie im
Lehmbau zumessen?**

Die alten Lehmbauer hatten keine Ahnung von Mine-
ralogie; Sie wussten nicht, was ein Tonmineral oder
ein Quarz ist. Trotzdem konnten sie gut mit Lehm
arbeiten, weil sie das Material mit Erfahrung und viel-
leicht ein bisschen Bauchgefühl verstehen konnten.
Damit haben sie praktisch die Eigenschaften der Ton-
minerale und der Begleitminerale mehr oder weniger
modelliert - ohne Wissen von Mineralogie.

Ich habe den Begriff Lehmbau vor 20 bis 25 Jahren
das erste Mal im Labor gehört. Ich habe mich damals
schon längst mit Tonmineralen beschäftigt als die
erste Lehmprobe vom Himalaya bei mir eintraf. Da
hat es dann begonnen, dass man einen unbekannt
Lehm analysiert ohne die Möglichkeit, diesen mit den
Händen und jahrzehntelanger Erfahrung zu begrei-
fen. Da kommt das Wissen um die Mineralogie sehr
stark zum Tragen.

Ich glaube, der ideale Umgang mit Lehm ist das Zwi-

schendrin. Man kann mit den Händen viel über die
Mineralogie erfahren, man kann aber auch Erkennt-
nisse, die im Labor gewonnen werden, auf das
Handeln übertragen.

**Wie sind die Ergebnisse von der Tonmineral- und
Gesamtmineralanalysen im Lehmbau zu werten?**

Mit einer Tonmineralanalyse, Gesamtmineralanalyse
und Korngrößenverteilung bekommt man eine gute
Kombination für die Beurteilung vom Material aus
der Ferne. Wenn man beispielsweise nur ein bisschen
Ton zum Analysieren und viele Fragen dazu hat, die
für die praktische Anwendung relevant sind, kann
man damit ein gewisses Vorwissen erlangen.

Im Lehmbau gibt es oftmals keine Erklärung für
bestimmte Eigenschaften der Tone; Vieles basiert auf
Erfahrungswerten, die weitergegeben werden. Aber
durch die Ton- und Gesamtmineralanalyse bekommt
man das Wissen dazu.

**Welche Vorteile haben die Gesamtmineralanalyse
und Tonmineralanalyse gegenüber den üblichen
Verfahren im Lehmbau?**

Es gibt zwei Wege: Der praktische mit den Händen
sowie dem Bauchgefühl und der mit dem Kopf. Ideal
ist es aber, wenn man die drei Faktoren zusammen-
bringt; Dass man mit den Händen fühlt, was das
Bauchgefühl sagt und die Informationen aus der Ana-
lytik bestätigen. Es ist sicherlich nicht gut, wenn man
nur Zahlen hat und nicht in den Ton reingreift. Dafür
ist die einfache Zahlenaufstellung zu wenig. Man
weiß zwar ganz genau, wie der Ton aussieht, welche
Eigenschaften er hat und wozu man ihn verwenden
kann, aber man muss ihn auch testen und bestätigen,
dass man damit gut arbeiten kann.

Wenn man zum Beispiel ein großes Projekt hat und
fünf verschiedene Tonquellen zu Verfügung stehen,
dann kann man sich einfach die Ergebnisse der Ana-
lytik anschauen und damit abgleichen, was gebraucht
wird und welche Anforderungen es gibt. So können
vielleicht schon einige Quellen ausgeschlossen wer-
den und man kann sich dann für den geeigneten Ton
entscheiden, womit viel praktische Arbeit und Zeit
gespart werden. Es ist sicherlich ein Vorteil, wenn
man von der Ferne beginnt.

Die Gesamtmineralanalyse und Tonmineralanalyse sind mineralogische Verfahren - Siehst du Potenzial in der Mineralanalyse als reguläres Verfahren für die Materialprüfung im Lehmbau?

Materialkenntnis ist wichtig. Kein Zement verlässt ein Zementwerk, der nicht x-mal kontrolliert wurde. Da weiß man sehr genau, was die Materialeigenschaften von einem Zement sind, bevor er rausgeht. Und das sollte man auf den Ton übertragen.

Im Zementwerk ist die Materialuntersuchung Routine und es gibt ausgebildete Mineralogen, die dort mit sehr guter Ausstattung arbeiten. Das Rohmaterial wird analysiert und mit den Erkenntnissen dazu wird der Fertigungsprozess intensiv gesteuert. Das ist technisch reguliert: Es gibt automatische Probennehmer, die alle 10 Minuten eine Probe nehmen und ins Diffraktometer geben, wo diese dann automatisch ausgewertet werden. Die Ergebnisse fließen direkt in die Steuerung der Herstellung, wie die Brenn- und Erzeugungsprozesse. Da ist wahnsinnig viel Technik, Mineralogie und Umsetzung vorhanden. Das Endprodukt wird dann noch einmal kontrolliert. Da müssen wir auch mit dem Lehmbau hin.

Aktuell ist die Tonmineralanalyse ein recht zeitaufwendiges Verfahren. Siehst du Potenziale oder Stellschrauben in dem Verfahren, die verbessert werden oder spezifischer auf den Lehmbau angepasst werden könnten?

Die Frage im Lehmbau ist, welche Eigenschaften der Lehm hat, der verwendet werden soll. Da hat sich bisher die Dreiergliederung aus Gesamtmineralanalyse, Tonmineralanalyse und Korngrößenverteilung als sehr starkes Tool herausgestellt, womit man diese theoretischen Fragen gut beantworten kann. Das ist natürlich zeitaufwendig und man müsste sich überlegen, welche Produkte gewünscht sind und abhängig von den Anforderungen sowie dem geplanten Herstellungsprozess analysieren. Man könnte festlegen, auf welchen Grad der Genauigkeit oder Differenzierung in der Analytik hinarbeitet wird. Ein Beispiel ist die Unterscheidung von Smektit und Vermikulit, ein nomenklatorisches Problem, das bis jetzt nicht wirklich gelöst ist. Man macht den sehr aufwendigen Arbeitsschritt, welcher das Vermikulit durch Kalium in eine bestimmte Kontraktion zwingt. Für den Lehmbau ist es wahrscheinlich nicht relevant, ob man ein Vermikulit hat, das Kalium aufnimmt, oder ob es Smektit ist, da die Eigenschaften der beiden

Tonminerale im Lehmbau ähnlich sind. Allein durch den Wegfall dieser Unterscheidung könnte der ganze Prozess der Analyse halbiert werden.

Aus der Gesamtmineralanalyse bekommt man auch schon wichtige Erkenntnisse und diese geht sehr schnell; Man muss den Lehm nur trocknen, vermahlen und anschließend messen. Man könnte versuchen, Fragestellungen aus dem Lehmbaugeschehen zu formulieren, die durch die Gesamtmineralanalyse beantwortet werden können. Aber dazu müssten eben die Fragen sehr konkret gestellt werden in Abhängigkeit zum Produkt und der Produktentwicklung sowie der Herkunft. Da bedarf es noch vieler Überlegungen.

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wird normgemäß eine Trockensiebung vorgeschlagen. Wie geht ihr bei diesem Verfahren vor?

Ich sage immer wieder, dass jede Siebanalyse schlichtweg falsch ist. Man kann nur durch wirkliches Bemühen versuchen, die Fehler so gering wie möglich zu halten. Damit kann man nahe an die richtige Verteilung rankommen, aber bei der Trockensiebung ist bereits im Voraus ein sehr großer Fehler durch das Anhaften von Ton an größeren Partikeln gegeben.

Bei der Trockensiebung von Schotter entstehen nur geringe Fehler, weil sich Sand und Kies leicht trennen lassen. Der Ton braucht einen anderen Umgang, deshalb machen wir bei uns im Labor Nasssiebungen in der Tonmineralanalyse.

Was müsste sich deiner Meinung nach ändern, damit die Mineralogie Einzug in den Lehmbau findet?

Man müsste mit den Praktizierenden im Lehmbau Schulungen machen und ihnen die einfachen Mineralogiekenntnisse beibringen. In der Universitätsausbildung habe ich immer versucht, in der Einführungsvorlesung einmal die wichtigsten Begriffe abzuklären: Was ist ein Mineral? Was ist ein Gestein? Was ist ein Element? Was ist eine geologische Einheit? Was ist eine geologische Schichtung? Das ist vielen nicht klar.

Im Lehmbau fehlt die Verknüpfung zwischen praktischem und theoretischem Wissen. Das Wissen ist aber da – nur eben nicht im Lehmbau. Das typische Beispiel im Lehmbau ist der Kalk. Man sagt, Kalk ist schlecht. Aber es ist die Frage, welcher Kalk vorliegt: Ist es der total harmlose Kalk, also das Calciumcarbonat? Bei Kalk hat man die absolute Mischung von nicht differenzierbaren Begriffen wie Gestein und

Mineral. Kalk ist immer das Gestein und Kalzit ist das Mineral. Wenn man Kalk brennt, entsteht Branntkalk, welcher eine Katastrophe im Lehm ist. Und dann gibt es noch den Löschkalk oder der Sumpfkalk, der dann wieder durch die Rekristallisation zum Calciumcarbonat wird. Das ist ein ganz einfacher Kreislauf, aber um diesen zu verstehen, muss man Gestein, Mineral und geologische Einheit unterscheiden können.

Welche Potenziale siehst du beim Bauen mit Aushub?

Ich denke an die Erbauung der Karlskirche im 17. Jahrhundert. Dort wurde der Aushub gemischt und in Modells reingegeben. Die Grünlinge wurden am Karlsplatz getrocknet und daneben war ein Brennofen - Direkt vor Ort am Karlsplatz. Die Karlskirche ist also genau aus dem Material, das man für sie ausgehoben hat, gebaut.

Es ist ein Riesenpotenzial da, das damals schon genutzt - und dann vergessen wurde. Es wurden viele Umwege gemacht aufgrund von Kapitalismus und Profitgier; Die Optimierung von Prozessen Richtung Kapital und Gewinn; Die Erschaffung einer Aktiengesellschaft, deren Aktionäre befriedigt werden müssen. Wir müssen diesbezüglich wieder ein bisschen zurückgehen.

Literaturverzeichnis

|Printed|

- Ardant, Daria | Brumaud, Coralie | Habert, Guillaume: The slower it is, the stronger it will be: How to improve poured earth strength without stabilisation, Beitrag zur Lehm 2020
- Bayrisches Landesamt für Umwelt: Merkblatt – Umgang mit humusreichem und organischem Bodenmaterial, 2016
- BRV - Österreichischer Baustoff-Recycling-Verband, BRV-Merkblatt „Beitragsfrei Verwerten auf Baustellen ohne Altlastensanierungsbeitrag“, 01. August 2017
- Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023
- Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie, Wien, 2022
- Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Statusbericht 2023
- Bundesministerium Landwirtschaft Regionen und Tourismus, Masterplan Rohstoffe 2030
- Correns, Carl Wilhelm: Einführung in die Mineralogie (Kristallographie und Petrologie), Berlin Heidelberg, Springer Verlag GmbH, 1949
- Dethier, Jean: Lehmbaukultur, 1. Auflage, Detail Business Information GmbH, 2019
- Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, DGL-Merkblatt 456, Hinweise zur Kalkdüngung, Frankfurt am Main, 2022
- Ender, Philipp: Mechanische Untersuchung von Lehm mit Additiven und natürlichen Rohstoffen, Diplomarbeit, Wien, Technische Universität Wien, 2022
- Entacher, Martin | Hartlieb, Julia: Praxishandbuch Baugrundrisiko, 1. Auflage, Wien, Linde Verlag, 2022
- Feiglstorfer, Hubert: earth construction & tradition, vol 2, IVA-ICRA, 2018
- Fouad, Nabil A.: Bauphysik Kalender 2008 - Bauwerksabdichtung, Berlin, Ernst&Sohn (Verlag für Architektur und technische Wissenschaften) GmbH, 2008
- Janson, Christina: Materialforschung Stampflehm – Ein Beitrag zur Weiterentwicklung des Baustoffes Stampflehm, Dissertation, Berlin, Technische Universität Berlin, 2013
- Klengel, Johannes | Wagenbreth, Otfried: Ingenieursgeologie für Bauingenieure, 2. Auflage, Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1987
- Minke, Gernot: Handbuch Lehm, Baustoffkunde, Techniken, Lehmarchitektur, 9. Auflage, Zwickau, Ökobuch, 2017
- Mitchell, Paul: Archäologische Voruntersuchung in der Karlskirche, Fundberichte aus Österreich, BDA, 2011
- Niemeyer, Richard: Der Lehm, Bau – und seine praktische Anwendung, Nachdruck, Freiburg i. Br., Ökobuchverlag, 1982
- Niemeyer, Richard: Verfahren zur Prüfung und Beurteilung von Lehm, Bauwelt, Heft 17-18, 1944,
- Ottner, Franz: Was ist Lehm – Lehm & Co, Berichte der Geologischen Bundesanstalt, Band 80, Haindorf bei Langenlois, 2009
- Pihringer, J.: Deterioration of Materials by Salt Precipitation: Technical Aspects of „Crystallisation/Hydration“, 8. Jahrgang, Heft 5, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 2002
- Quietmeyer, Friedrich, Dissertation: Zur Geschichte der Erfindung des Portlandzementes, 1911 Verlag der Tonindustrie-Zeitung GmbH, Berlin NW 21
- Ramml, Ferdinand: Ziegelöfen und Lehmabbau der politischen Bezirke Mistelbach und Gänserndorf (Niederösterreich): Geschichte und Geologie, Geologische Bundesanstalt, Wien, 2014
- Rauch, Martin in: Schittich, Christian: im Detail – Einfach Bauen, Birkhäuser Verlag für Architektur, Berlin, 2005
- Rischaneck, Andreas: Normierung und Regelwerke in der Lehm, Baupraxis, Dissertation, Wien, Technische Universität Wien, 2023
- Röhlen, Ulrich | Ziegert, Christof: Lehm, Bau-Praxis – Planung und Ausführung, 3. Auflage, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2020
- Schmidt, Hans-Henning | Buchmaier, Roland Fritz | Vogt-Breyer, Carola: Grundlagen der Geotechnik, 6. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2023

|Gesetze, Normen und Richtlinien|

- Schmitt, Burbaum, Bormann: Simmer Grundbau 1 – Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen, 20. Auflage, Wiesbaden, Springer Verlag, 2022
- Schneider, Ulrich | Schwimann, Mathias | Bruckner, Heinrich: Lehmbau für Architekten und Ingenieure, 1. Auflage, Düsseldorf, Werner, 1996
- Schröder, Horst: Lehmbau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen, 3. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2019
- Stehno, Gerhard: Baustoffe und Baustoffprüfung, Wien New York, Springerverlag 1981
- Streit, Erich | Liberto, Teresa | Kirchengast, Ines | Korjenic, Azra: Mechansiche Aktivierung von Lehm, Bauphysik 45, Heft 1, 2023
- Umweltbundesamt, REP-0589, Aushubmaterialien, Wien, 2016
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUF), Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden, Darmstadt, 2000
- Volhard, Franz | Röhlen, Ulrich: Lehmbau Regeln, Dachverband Lehm, 3. Auflage, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2009
- Zein, Mohamed Tawfik: Studie über das Bruchverhalten des Betons und Zug- und Druckbeanspruchungen, Dissertation, Dübendorf, 1974
- DIN 18123:2011 – Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung, Deutsches Institut für Normung, 2011 - 2017
- DIN 18196:2023 – Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Deutsches Institut für Normung, 2023
- DIN 18940:2023 – Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung, Beuth-Verlag, 2023
- DIN 18945:2024 – Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung, Beuth-Verlag, 2024
- DIN 18947:2024 – Lehmputzmörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung, Deutsches Institut für Normung, 2024
- DIN 18952 – Baulehm, Blatt 2: Prüfung von Baulehm, Blatt 2, 1952
- DIN ISO 11265:1997 – Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit, Beuth-Verlag, 1997
- ÖNORM B 1997-2:2017 – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bessung in der Geotechnik, Austrian Standards International, 2017
- ÖNORM B 3355:2017-03 – Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk, Austrian Standards International, 2017
- ÖNORM EN 16907-4:2019 – Bodenbehandlung mit Kalk und/oder hydraulischen Bindemitteln, Austrian Standards International, 2019
- ÖNORM EN ISO 14688-1:2020 – Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Austrian Standards International, 2020
- ÖNORM EN ISO 17892-4:2017 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4 Bestimmung der Korngrößenverteilung, Austrian Standards International, 2017
- ÖNORM L 1050:2016 – Boden als Pflanzenstandort – Begriffe und Untersuchungsverfahren, Austrian Standards International, 2016
- ÖNORM S 2126:2016 02 01 Grundlegende Charakterisierung von Aushubmaterial vor Beginn der Aushub- oder Abräumtätigkeiten, Austrian Standards International, 2016

- Technisches Merkblatt TM05: Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehmbaumstoffe – Richtlinie, Dachverband Lehm e.V., 2011
- WTA Merkblatt 4-5-99/D – Beurteilung von Mauerwerk – Mauerdiagnostik, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserstellung und Denkmalpflege, 1999

- Abfallwirtschaftsgesetz 2002
- Deponieverordnung 2008
- Richtlinie (EU) 2018/850 des Europäischen Parlaments und des Rates
- Altlastensanierungsgesetz, Fassung 28.02.23
- Recycling-Baustoffverordnung, Fassung 01.03.23

|Online|

- Baunetzwissen: Salzbelastetes und feuchtes Mauerwerk | <https://www.baunetzwissen.de/altbau/fachwissen/aussenwand-sanierung/salzbelastetes-und-feuchtes-mauerwerk-148304> | 10.09.2023
- BC-materials | <https://bcmaterials.org/services> | 02.04.2024
- chemie.de: Bruchkraft | <https://www.chemie.de/lexikon/Bruchkraft.html> | 12.03. 2024
- chemie.de: Fotometrie | <https://www.chemie.de/lexikon/Fotometrie.html> | 10.09.2023
- chemie.de: Kalkwasserprobe | <https://www.chemie.de/lexikon/Kalkwasserprobe.html> | 22.02.2024
- chemie.de: Röntgenstrahlung | <https://www.chemie.de/lexikon/R%C3%B6ntgenstrahlung.html> | 12.04.2024
- cycle terre | <https://www.cycle-terre.eu/cycle-terre/le-projet/> | 21.04.2024
- Dietrich|Untertrifaller: Rudolf Steiner-Schule, Wien (AT) | <https://www.dietrich.untertrifaller.com/projekte/rudolf-steiner-schule-wien/> | 21.04.2024
- F+P Architekten, House of Health Sciences | https://www.fp-arch.at/fp_projekte/house-of-health-professions/ | 31.03.2024
- GeoDZ: Glühverlust | <http://www.geodz.com/deu/d/Gl%C3%BChverlust> | 10.04.2024
- GeoSphere Austria: Interaktives RohstoffInformationsSystem (IRIS) | <https://geolba.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=ef8095943a714d7893d41f02ec9c156d> | abgerufen am 18.04.2024
- Gerichtshof der Europäischen Union, Pressemitteilung Nr. 109/22, <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2022-06/cp220109de.pdf> | 20.03.2023
- Grimm: Was ist Luftkalkputz, Okt. 2017 | <https://www.baustoffwissen.de/was-ist-luftkalkputz-31102023> | 05.01.2023
- IBO: Clay to stay | <https://www.ibo.at/forschung/referenzprojekte/data/clay-to-stay> | 28.03.24
- IBO: Erdbewegung | <https://www.ibo.at/forschung/referenzprojekte/data/erdbewegung> | 28.03.24
- IG-Lehm: Lehmbaumboerse | <https://www.iglehm.ch/verband/lehmbaumboerse-aktuell> | 28.03.24

- Kappeln/Schlei: Bau der Drehbrücke | <http://www.kappeln-eschmidt.de/seiten/1925-09-c/1925-09-c.htm> | 23.11.2023
- Karlhorst Klotz: Industrielle Herstellung große Lehmsteine für tragendes Mauerwerk, 05.05.2023 | <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/baustoffe/industrielle-herstellung-grosser-lehmsteine-fuer-tragendes-mauerwerk/> | 15.04.2024
- Laimgrube | <https://de.wikipedia.org/wiki/Laimgrube> | 19.04.2024
- Lexikon der Biologie: Bodenversalzung | <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/bodenversalzung/9881> | 10.09.2023
- Maximilian Flassak, Interview mit Silvia Devescovi (Cycle Terre), 06.04.2022 | <http://netzwerkleh.m.at/wp-content/uploads/2023/02/cycle-terre.pdf> | 21.04.2024
- Michelgroup: Logistikzentrum Weleda | <https://www.michelgroup.eu/de/projekte/ecological-und-sustainable-industrial-campus-weleda/type/architecture/> | 21.04.2024
- Niederösterreich: Unsere Kellergassen | <https://www.niederosterreich.at/kellergassen> | 26.04.2024
- Österreich Wein: Die wichtigsten geologischen Baueinheiten | <https://www.oesterreich-wein.at/unser-wein/klima-boden/geologie/geologische-baueinheiten> | 18.04.2024
- Rabeder, Julia, Geologische Bundesanstalt (01.04.2022): Tonrohstoff in Österreich: Von der Steinzeit bis zur Forschung | <https://www.forumrohstoffe.at/2022/04/01/tonrohstoffe-in-oesterreich-von-der-steinzeit-bis-zur-forschung/> | 19.04.2024
- Rechtssache C-238/21, „Zu den Vorlagefragen“, <https://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?text=&docid=268031&pageIndex=0&doclang=DE&mode=lst&dir=&occ=first&part=1&cid=2166036> | 20.03.2023
- research FH st. Pölten: LeWeLaS – Lehm als Werkstoff für Lärmschutzwände im System Bahn | <https://research.fhstp.ac.at/projekte/lewe-las-lehm-als-werkstoff-fuer-laermschutzwaeende-im-system-bahn> | 28.03.24
- Rodolf-Steiner-Schule Wien-Mauer: Aktuelles vom Bauplatz auf 113 | <https://www.waldorf-mauer.at/wir-bauen/informationen> | 21.04.2024
- Rothneusiedl Stadt & Land | <https://rothneusiedl.wien.wirdwow.at/prozess/> | 31.03.2024
- Stadt Wien, Linie U2 von der Seestadt bis zum Wienerberg | <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/projekte/verkehrsplanung/u-bahn/u2u5/linie-u2.html> | 31.03.2024
- Stadt Wien, Nordbahnhof – Ein neues Grätzchen mit viel Grün | <https://www.wien.gv.at/stadtplanung/nordbahnhof> | 31.03.2024
- Stadt Wien: Laimgrube (Vorstadt) | [https://www.geschichtewiki.wien.gv.at/Laimgrube_\(Vorstadt\)](https://www.geschichtewiki.wien.gv.at/Laimgrube_(Vorstadt)) | 19.04.2024
- Statistik Austria: Baufertigstellung | <https://www.statistik.at/statistiken/bevoelkerung-und-soziales/wohnen/baufertigstellungen> | 08.02.2023
- Statistik Austria: Wohnsituation | <https://www.statistik.at/statistiken/bevoelkerung-und-soziales/wohnen/wohnsituation> | 07.02.2023
- Stresstech: X-ray | <https://www.stresstech.com/de/knowledge/x-ray-diffraction/> | 12.04.2024
- Stresstech: X-ray | <https://www.stresstech.com/de/knowledge/x-ray-diffraction/> | 12.04.2024
- TerraTerre | <https://terraterre.ch/de> | 28.03.24
- Weleda: Europas größte Lehmabbaustelle der Weleda Logistik-Campus | <https://www.weleda.at/presse/europas-groesste-lehmabbaustelle> | 21.04.2024
- Wir!-Bündnis GoLehm: Lehmhaus des Monats, September 2023 | <https://www.golehm.de/lehmhaus-des-monats> | 23.03.2024
- Ziegert, Christof: Vortrag bei ibW und IG Lehm e.V., 06/05/2023: Zurück in die Zukunft | <https://www.ibw.ch/sites/default/files/2023-06/Christof%20Ziegert.pdf> | 22.02.2024

Abbildungsverzeichnis

Wenn nicht anders angegeben, unterliegen die Bildrechte ©Karolin Wagner

- Abb. 1.01 Ablagerung von Baustellenaushub
Abb. 1.02 Karte der Eingemeindung der Laimgrube in Wien um 1830
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/62/Wien_1830_Vasquez_Mariahilf_Laimgrube.jpg/1600px-Wien_1830_Vasquez_Mariahilf_Laimgrube.jpg [19.04.2024]
Abb. 1.03 Lehmbautechniken ausgerichtet auf den lokal verfügbaren Lehm
Feiglstorfer | S. 40
Abb. 1.04 Massivbauweise Weinviertel
Abb. 1.05 Hybridbauweise Burgenland
Abb. 1.06 Baubesprechung zum Erbau der Wiener Basteien und strategische Platzierung der Ziegelöfen
Historische Schrift aus dem Hofkammerarchiv von 1549
Abb. 1.07 Gemischtes Mauerwerk
Abb. 1.08 Laserscan eines Kellers mit dazugehörigem Presshaus
Lukas Stampfer, Eva Kodzoman | Technische Universität Wien, Forschungsbereich Baugeschichte und Bauforschung
Abb. 1.09 Zweigeschossige Siedlung Müheln
Vortrag von Christof Ziegert: Lehm- und Volle Kraft voraus! | <https://www.ibw.ch/sites/default/files/2023-06/Christof%20Ziegert.pdf> [13.02.2024] | S. 29
Abb. 1.10 BC Materials, Aufbereitungsanlage
BC Materials, Services | <https://bcmaterials.org/services> [02.03.2024]
Abb. 1.11 Lehmputz
Abb. 1.12 Verarbeitung
Abb. 1.13 Baugrube
<https://baufotos.waldorf-mauer.at/> [10.05.2024]
Abb. 1.14 Mensa in Bauausführung
Abb. 1.15 Siebung des Aushubs
Abb. 1.16 Materialbild
Abb. 1.17 Siebrückstand
Abb. 1.18 Ausgewinterter Baulehm
Abb. 1.19 Wandschicht aus Lehm
Abb. 1.20 Aufgestellte Wandsysteme
Abb. 1.21 Einbringung der Lehmschicht
Foto: Martin Stockreiter
Abb. 1.22 Abziehen der Lehmoberfläche
Abb. 1.23 Zwangsmischer für die Lehmmischung
Abb. 1.24 Lehmgrube vor Ort
Abb. 1.25 Baustellenaushub zur Geländemodellierung
Abb. 1.26 Mischanlage (Conluto)
Abb. 1.27 Materialeinbringung
Abb. 1.28 Fertige Lagerhalle
Weleda: Europas größte Lehmbaustelle der Weleda Logistik-Campus | <https://www.weleda.ch/footer/dialog/presseartikel/europas-groesste-lehmbaustelle> [13.03.2024]
Abb. 1.29 Stampflehm
Abb. 1.30 Rohbau
Abb. 2.01 Österreich unterliegt dem Stufen-
aufbau der Rechtsordnung
Zivildienstserviceagentur, Österreich als Rechtsstaat | <https://www.zivildienst.gv.at/zivildienere-learning-zivildienere-learning-12-oesterreich-als-rechtsstaat.html> [09.03.2023]
Abb. 2.02 Abfallaufkommen von 1990 bis 2021
Eigene Darstellung nach | BKM, Statusbericht 2023 | S. 12
Abb. 2.03 Abfallgruppen im Jahr 2021
Eigene Darstellung nach | BKM, Statusbericht 2023 | S. 19
Abb. 2.04 Herkunft von Aushub (Mengenabschätzung)
Eigene Darstellung nach | Umweltbundesamt, 2016, REP-0589, Aushubmaterialien | S. 33 – 34
Abb. 2.05 Beispiel 1
Eigene Darstellung
Abb. 2.06 Beispiel 2
Eigene Darstellung
Abb. 2.07 Abfallbehandlung ohne Aushubmaterialien im Jahr 2021
Eigene Darstellung nach BKM, Statusbericht 2023 | S. 31
Abb. 2.08 Abfallbehandlung mit Aushubmaterialien im Jahr 2021
Eigene Darstellung nach BKM, Statusbericht 2023 | S. 31
Abb. 2.09 Massenbilanzierung des Aushubmaterials
Eigene Darstellung nach BKM, Statusbericht 2023 | S. 224 - 225
Abb. 2.10 Abfallströme der Qualitätsklassen A1, A2, A2-G und BA
Eigene Darstellung nach BKM, Statusbericht 2023 | S. 224 - 225
Abb. 2.11 Abfallströme Aushub 2021 (Bundesumweltamt)
Geänderte Darstellung nach BKM, Statusbericht 2023 | S. 227
Abb. 2.12 Aushubaufschüttung als Geländeanpassung auf landwirtschaftlicher Fläche
Abb. 2.13 Abgelagerte Massen auf Bodenaushubdeponien
BKM, Statusbericht 2023 | S. 86
Abb. 2.14 Bodenaushubdeponie, Verfüllung
Abb. 2.15 Bodenaushubdeponie, Aufschüttung
Abb. 2.16 Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle
BKM, Statusbericht 2023 | S. 77

- Abb. 2.17 Gütezeichen für Recycling-Baustoffe
BRV, Richtlinie Recycling-Baustoffe Aushubmaterialien | S. 12
- Abb. 2.18 Bodenaushubdeponie
- Abb. 3.01 Geologische Übersichtskarte
www.geologie.ac.at/fileadmin/_processed_/6/1/csm_2007_geoatlas_uebersichtskarte_oe_gba_cbbd3cec99.png [18.04.2024]
- Abb. 3.02 Digitale Bodenkarte (eBod)
<https://bodenkarte.at/#/center/13.3458,47.7132> [18.04.2024]
- Abb. 3.03 Tonvorkommen in Österreich
www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/kartierung-landesaufnahme/rohstoffe/ton [15.09.2023]
- Abb. 3.04 Interaktive Karte IRIS
<https://geolba.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=ef8095943a714d7893d41f02ec9c156d> [18.04.2024]
- Abb. 3.05 Strukturelle Zusammensetzung von Tetraedern
veränderte Darstellung nach Schröder, 2019 | S. 112
- Abb. 3.06 Strukturbildung von Silikaten
docplayer.org/docs-images/55/35365508/images/76-0.png [01.05.2024]
- Abb. 3.07 Strukturelle Zusammensetzung von Oktaedern
veränderte Darstellung nach Schröder, 2019 | S. 112
- Abb. 3.08 Zweischicht- und Dreischichtsilikate
veränderte Darstellung nach www.zi-online.info/imgs/101471255_b37431b42e.jpg [01.05.2024]
- Abb. 3.09 Glimmer
- Abb. 3.10 Kaolinit
www.dr-krakow-labor.de/ton-mineralogie [01.05.2024]
- Abb. 3.11 Illit
www.dr-krakow-labor.de/ton-mineralogie [01.05.2024]
- Abb. 3.12 Smektit
www.dr-krakow-labor.de/ton-mineralogie [01.05.2024]
- Abb. 3.13 Unterschiedliche Lehme im B-Horizont
www.lfu.bayern.de/boden/bodenreise/12_br_pic/2185027_gr.png [01.05.2024]
- Abb. 3.14 Bodenprofil Aufbau
www.mineralienatlas.de/VIEWmax.php?param=1370174511&width=250&wfixed=1 [01.05.2024]
- Abb. 3.15 Bodenschichten (Kurbadstraße)
- Abb. 3.16 Baulehm (pro Lehm)
- Abb. 3.17 Aufbereiteter Baulehm (pro Lehm)
- Abb. 3.18 Zuführung von luftgetrocknetem Material in den Beschicker
- Abb. 3.19 Siebung im Silo
- Abb. 3.20 Mischanlage und Abfüllung
- Abb. 4.01 Aushub
- Abb. 4.02 Baustoff
- Abb. 4.03 ZRS Labor
www.ibw.ch/sites/default/files/2023-06/Christof%20Ziegert.pdf [01.05.2024]
- Abb. 4.04 Lehm als Rohstoff
www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2018/10/projet-1.jpg [01.05.2024]
- Abb. 4.05 Schurf
- Abb. 4.06 Schurferstellung
- Abb. 4.07 Lehmproben
- Abb. 4.08 Feldversuch
- Abb. 4.09 Schurf zur Probenahme
Schröder, 2019 | S. 81
- Abb. 4.10 Teile der Probensammlung
- Abb. 4.11 Standorte der ausgewählten Projekte in Wien und Umgebung
Eigene Darstellung
- Abb. 4.12 Standorte der ausgewählten Projekte in Wien
Eigene Darstellung
- Abb. 4.13 Probenstandorte in der geologischen Übersichtskarte von Wien
Eigene Darstellung nach Pfeiderer, Hofmann, 2007 | S.272
- Abb. 4.14 Bestehende Grabung
- Abb. 4.15 Probenahme
- Abb. 4.16 Aufgeschüttetes Aushubmaterial
- Abb. 4.17 Probenahme
- Abb. 4.18 Schichtenaufbau
- Abb. 4.19 Probenahme
- Abb. 4.20 Schurf der Probenahme
- Abb. 4.21 Schichtenaufbau
- Abb. 4.22 Probenahme
- Abb. 4.23 Materialfarbe
- Abb. 4.24 Schurferstellung
- Abb. 4.25 Schichtenaufbau
- Abb. 4.26 Proben P15, P16, P17
- Abb. 4.27 U2-Baustelle Bacherplatz
- Abb. 4.28 Aushubmaterial Bacherplatz
- Abb. 4.29 U2-Baustelle Siebenbrunnengasse
- Abb. 4.30 Aushubmaterial Siebenbrunnengasse
- Abb. 4.31 U2-Baustelle Stiftgasse
- Abb. 4.32 Aushubmaterial Stiftgasse
- Abb. 4.33 U2-Baustelle Maria-Hilfer-Straße
- Abb. 4.34 Aushubmaterial Maria-Hilfer-Straße
- Abb. 4.35 Baustellengrube
- Abb. 4.36 Probenahme
- Abb. 4.37 Baustellengrube
- Abb. 4.38 Probenahme
- Abb. 4.39 Lehmgrube vor Ort
- Abb. 4.40 Lehmgrube + Ablagerung
- Abb. 4.41 Material vor Siebung
- Abb. 4.42 Material nach Siebung
- Abb. 5.01 Schollenbildung
- Abb. 5.02 Formbarkeit
- Abb. 5.03 Abdrücke der Probenahme
- Abb. 5.04 Probe P5 nach der Kugelfallprobe

- Abb. 5.05 Probe P8 nach der Kugelfallprobe
- Abb. 5.06 Probe P9 beim Trockenfestigkeitsversuch
- Abb. 5.07 Stumpfe Schnittfläche von Probe P8
- Abb. 5.08 Glänzende Schnittfläche von Probe P6
- Abb. 5.09 Sandiges, schluffiger Lehm von Probe P8
- Abb. 5.10 Toniger Lehm von Probe P11
- Abb. 5.11 Probe P14 im trockenen Zustand
- Abb. 5.12 Probe P14 im nassen Zustand
- Abb. 5.13 Durchführung der Feldversuche zu Bildungszwecken
Foto: Louai Abdul Fattah
- Abb. 5.14 Schadensbild bei organischen Bestandteilen im Putz
- Abb. 5.15 Magnetrührer
- Abb. 5.16 Gewinnung des Eluats
- Abb. 5.17 Messung
- Abb. 5.18 Dispergierte Proben
- Abb. 5.19 Absetzen der Proben
- Abb. 5.20 Messung der Küvettentests
- Abb. 5.21 Nitratgehalte
Eigene Darstellung
- Abb. 5.22 Sulfatgehalte
Eigene Darstellung
- Abb. 5.23 Chloridgehalte
Eigene Darstellung
- Abb. 5.24 Gesamtsalzgehalt (Werte der Chromatografie)
Eigene Darstellung
- Abb. 5.25 Messung der elektrischen Leitfähigkeit
- Abb. 5.26 Elektrische Leitfähigkeit
Eigene Darstellung
- Abb. 5.27 Technischer Kalkkreislauf
https://de.wikipedia.org/wiki/Technischer_Kalkkreislauf [23.11.2023]
- Abb. 5.28 Salzsäureprüfung
- Abb. 5.29 Beträufeln der Probe mit Salzsäure
- Abb. 5.30 Vergleich der Säurereaktion, links: Salzsäure, rechts: Essigsäure
- Abb. 5.31 Achterlingsprüfgerät, 1925
https://www.kappeln-eschmidt.de/seiten/1925-09-c/1925_09_ec-0100-3686.jpg [10.11.2023]
- Abb. 5.32 Achter-Form 1851
Quietmeyer, 1911 | S. 134
- Abb. 5.33 Achter-Form 1871
Quietmeyer, 1911 | S. 137
- Abb. 5.34 Achter-Form 1867-1871
Quietmeyer, 1911 | S. 139
- Abb. 5.35 Zugfestigkeitsprüfmaische
Stehno, 1981 | S. 17
- Abb. 5.36 Formen des Zugprüfkörpers
Stehno, 1981 | S. 19
- Abb. 5.37 Zulässige Druckspannungen nach Bindekraft
Niemeyer, 1944 | S.176
- Abb. 5.38 Rezepturen nach Niemeyer
Niemeyer, 1982 | S. 132
- Abb. 5.39 Geometrie des Prüfkörpers
Eigene Darstellung
- Abb. 5.40 3D-Modell der Prüfkörperform
Eigene Darstellung
- Abb. 5.41 Prüfkörperform
- Abb. 5.42 Prüfgerät
- Abb. 5.43 Prüfgerät, Schnitt
Eigene Darstellung
- Abb. 5.44 Aufbereitungsschritte: Luftgetrockneter Zustand, Zerkleinerung, Siebung
- Abb. 5.45 Siebung mit Tonfraktionen
- Abb. 5.46 Sechs Durchläufe bis zur Homogenisierung
- Abb. 5.47 Fetter Lehm nach Wasserzugabe
- Abb. 5.48 Probe nach dem Aufschlagen
- Abb. 5.49 Probe bei offener Trocknung
- Abb. 5.50 Trocknung der Proben
- Abb. 5.51 Unterschied von gehämmerter und aufgeschlagener Probe
- Abb. 5.52 Links: Ausrichtung der Tonminerale im Mittelteil senkrecht zur Bruchstelle | Rechts: Regelmäßige Ausrichtung der Tonminerale
- Abb. 5.53 Linienbildung bei Kugelformung
- Abb. 5.54 Ausbreitmaß eines recht fetten Lehms
- Abb. 5.55 Ausbreitmaß eines mageren Lehms
- Abb. 5.56 Probekörper
- Abb. 5.57 Eingestampfter Lehm
- Abb. 5.58 Anrauen der Oberfläche
- Abb. 5.59 Fehlerhafter Prüfkörper
- Abb. 5.60 Fehlerhafter Prüfkörper
- Abb. 5.61 Abziehen der Oberfläche
- Abb. 5.62 Fehlerhafter Prüfkörper
- Abb. 5.63 Rissbildung vor dem Zerreißen
- Abb. 5.64 Messergebnisse Bindekraft mit Grenzbereichen
Eigene Darstellung
- Abb. 5.65 Prüfkörper bei der Messung
- Abb. 5.66 Impressionsbilder von Lehm (in der Aufbereitung)
- Abb. 5.67 Österreichisches Bodenartendreieck ÖNORM L 1050:2016 | S. 15
- Abb. 5.68 Dreiecknetz des Lehms
Minke, 2017 | S. 17
- Abb. 5.69 Prüfmethode für Böden
Schmidt, Buchmaier, Vogt-Breyer, 2023 | S. 48
- Abb. 5.70 Beispiel für eine Korngrößenverteilung
EN ISO 17892-4:2017 | S. 31
- Abb. 5.71 Günstiges und ungünstiges Korngemisch
Klengel, Wagenbreth, 1987 | S.216
- Abb. 5.72 Einfluss verschiedener Verhältnisse des Grobkornanteils in Lehmputz (Lehm: Sand)
- Abb. 5.73 Körnungslinie von Lösslehm
Schröder, 2019 | S. 70
- Abb. 5.74 Körnungslinie von Verwitterungslehm
Schröder, 2019 | S. 73
- Abb. 5.75 Ablauf der Siebung nach ÖNORM EN ISO 17892-4
EN ISO 17892-4:2017 | S. 30
- Abb. 5.76 Nasssiebung
- Abb. 5.77 Vorsiebung im Bottich
- Abb. 5.78 Siebrückstände (5 mm und 63 µm) und Siebdurchgang (Anteil)
- Abb. 5.79 Nasssiebung in Schritten
- Abb. 5.80 Großer Siebturm
- Abb. 5.81 Kleiner Siebturm

- Abb. 5.82 Trocknung (Grobkornanteil)
- Abb. 5.83 Prozentuales Verhältnis von
Fein- und Grobkorn
Eigene Darstellung
- Abb. 5.84 Vollständige Darstellung des norm-
gerechten Diagramms | Probe P10
Eigene Darstellung
- Abb. 5.85 Körnungslinie P1 und P10
Eigene Darstellung
- Abb. 5.86 Körnungsbild P1
Eigene Darstellung
- Abb. 5.87 Körnungsbild P10
Eigene Darstellung
- Abb. 5.88 Körnungslinie P3 und P6
Eigene Darstellung
- Abb. 5.89 Körnungsbild P3
Eigene Darstellung
- Abb. 5.90 Körnungsbild P6
Eigene Darstellung
- Abb. 5.91 Aufschlüsselung des Grobkornanteils
Eigene Darstellung
- Abb. 5.92 Siebdurchgang getrocknet (Feinkornanteil)
- Abb. 5.93 Siebrückstände vor und nach der Trocknung
- Abb. 5.94 Funktionsweise, Sedigraph
http://gatscientific.com/wp-content/uploads/2020/05/sedigraph_method_poster.pdf [13.03.2024]
- Abb. 5.95 Messung, Sedigraph
http://gatscientific.com/wp-content/uploads/2020/05/sedigraph_method_poster.pdf [13.03.2024]
- Abb. 5.96 Sedigraph
- Abb. 5.97 Vergleich der Ergebnisse von Probe P5
Eigene Darstellung
- Abb. 5.98 Vergleich der Ergebnisse von Probe P17
Eigene Darstellung
- Abb. 5.99 Camsizer Funktionsweise
<https://www.microtrac.de/files/148186/camsizer-3d.pdf> [19.03. 24]
- Abb. 5.100 Camsizer
- Abb. 5.101 Bildaufnahme
<https://www.microtrac.de/files/148186/camsizer-3d.pdf> [19.03. 24]
- Abb. 5.102 Camsizer, Förderrinne
- Abb. 5.103 Camsizer, Dynamische Bildanalyse
- Abb. 5.104 Körnungslinie, Vergleich Cam-
sizer und Siebung, P6
Eigene Darstellung
- Abb. 5.105 Körnungslinie, Vergleich Cam-
sizer und Siebung, P7
Eigene Darstellung
- Abb. 5.106 Siebrückstand (Grobkornanteil)
- Abb. 5.107 Bragg'sche Gleichung
<https://virtuelle-experimente.de/bilder/elektronenbeugung/Bragg-Bedingung.png> [12.04.2024]
- Abb. 5.109 Röntgendiffraktometer
- Abb. 5.108 Netzebenen / Gitterebenen
www.stresstech.com/de/knowledge/x-ray-diffraction/ [12.04.2024]
- Abb. 5.110 Scheibenschwingmühle
- Abb. 5.112 Probeträger mit pulverisierter Probe
- Abb. 5.111 Pulverisierte Probe
- Abb. 5.113 Pulverpräparate
- Abb. 5.114 Homogenisierung
- Abb. 5.115 Chemische Reaktion mit H₂O₂
- Abb. 5.116 Rührvorgang
- Abb. 5.119 Herstellung der Texturpräparate
- Abb. 5.117 Absetzen der Schluffanteile
- Abb. 5.118 Texturpräparate
- Abb. 5.120 Röntgendiffraktometer
- Abb. 5.121 Röntgendiffraktogramm der
Gesamtmineralanalyse P5
Eigene Darstellung
- Abb. 5.122 Röntgendiffraktogramm der
Gesamtmineralanalyse P17
Eigene Darstellung
- Abb. 5.123 Röntgendiffraktogramm der
Gesamtmineralanalyse P3
Eigene Darstellung
- Abb. 5.124 Röntgendiffraktogramm der
Gesamtmineralanalyse SP-N
Eigene Darstellung
- Abb. 5.125 Röntgendiffraktogramm der Ton-
mineralanalyse P5
Eigene Darstellung
- Abb. 5.126 Röntgendiffraktogramm der Ton-
mineralanalyse P17
Eigene Darstellung
- Abb. 5.127 Röntgendiffraktogramm der Ton-
mineralanalyse P3
Eigene Darstellung
- Abb. 5.128 Röntgendiffraktogramm der Ton-
mineralanalyse SP-N
Eigene Darstellung
- Abb. 5.129 Plastischer Zustand von Löss
(100 mg) mit 30 ml Wasser
- Abb. 5.130 Plastischer Zustand von Lehm-
putz (100 mg) bei 25 ml Wasser
- Abb. 5.131 Plastischer Zustand von Bento-
nit (100 mg) mit 400 ml Wasser
- Abb. 5.132 Zustandsgrenzen nach Atterberg
Schröder, 2019 | S.92
- Abb. 5.133 Klassifizierung nach Plastizität
Schröder, 2019 | S.92
- Abb. 5.134 Prüfung zur Druckfestigkeit
https://gbd.group/de/Assets/stampflehm/img_1117.jpg/@images/image-820-7229bcfcd-ea8c55905f83480f53dbfdb.jpeg [03.05.2024]
- Abb. 5.135 Impression (Proben P15 - P17,
Kurbadstraße)

Tabellenverzeichnis

- Tab. 2.01 Aushubkategorie und Qualitätsklassen von Aushub
Umweltbundesamt, 2016, REP-0589, Aushubmaterialien | S. 33 – 34
- Tab. 2.02 Schlüsselnummern und Spezifikation von nicht verunreinigtem Aushubmaterial
Abfallverzeichnisverordnung 2020 | Anhang 1, S. 75 – 80
- Tab. 2.03 Schlüsselnummern und Spezifikation von nicht gefährlichem Aushubmaterial
Abfallverzeichnisverordnung 2020 | Anhang 1, S. 75 – 80
- Tab. 2.04 Aufkommen, Verwertung und Beseitigung von nicht verunreinigtem Aushub im Jahr 2019
BKM, Statusbericht 2021 | S. 78 – 79
- Tab. 2.05 Aufkommen, Verwertung und Beseitigung von nicht verunreinigtem Aushub im Jahr 2021
BKM, Statusbericht 2023 | S. 224 – 225
- Tab. 2.06 Deponierter nicht verunreinigter Bodenaushub im Jahr 2021 (SN 31411 29 – 32)
BKM, Statusbericht 2023 | S. 224 – 225
- Tab. 2.07 Wesentliche Input- und Output-Ströme von Aushub in Behandlungsanlagen
zwecks Verwertung
BKM, Statusbericht 2023 | S. 224 – 225
- Tab. 2.08 Verwertung von Aushub als Recycling-Baustoff
BKM, Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023, Teil 1 | S. 10
- Tab. 4.01 Überblick zu Begrifflichkeiten und Empfehlungen der Feldversuche
- Tab. 4.02 Standorte und Details zu Gruppenproben
- Tab. 5.01 Auswertung der Bindekraft nach den Feldversuchen
- Tab. 5.02 Auswertung des Ton- und Schluffanteils nach den Feldversuchen
- Tab. 5.03 Auswertung des Mineralgerüstes
- Tab. 5.04 Auswertung von Geruch und Farbe nach den Feldversuchen
- Tab. 5.05 Vergleich der Grenzwerte 1
- Tab. 5.06 Vergleich der Grenzwerte 2
- Tab. 5.07 Auswahl der Proben und Annahmen
- Tab. 5.08 Übersicht zu den Messungen
- Tab. 5.09 Unterscheidung von Mergel nach C. W. Correns
Correns., 1949 | S. 34
- Tab. 5.10 ‚Begriffe für die Bezeichnung des Kalkgehaltes‘, ‚Klassifizierung des Kalkgehalts‘
EN ISO 14688-1:2020 | S. 21
EN ISO 14688-1:2020 | S. 14
- Tab. 5.11 Ergebnisse der Salzsäureprüfung
- Tab. 5.12 Klassifizierung anhand der Bindekraft
- Tab. 5.13 Vorbereitung des Materials und Beobachtungen
- Tab. 5.14 Messergebnisse Bindekraft
- Tab. 5.15 Durchläufe und Wiederholungen
- Tab. 5.16 Einschätzungen der Feldversuche in Verhältnis zur Bindekraft
- Tab. 5.17 Unterteilung nach Bodengruppen gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1
- Tab. 5.18 Korngrößenklassen nach ÖNORM L 1050
- Tab. 5.19 Einteilung nach DIN 18196
- Tab. 5.20 Mineralische Bestandteile der Grubenlehme <2 µm
Janson, 2013 | S. 60
- Tab. 5.21 Deutung der Körnungslinien nach ÖNORM EN ISO 14688-2
- Tab. 5.22 Maschenweiten der Analysensiebe für den Rüttelsieb
- Tab. 5.23 Probemengen nach geschätztem Größtkorn
- Tab. 5.24 Größtkorn und Probemenge
- Tab. 5.25 Abweichungen zwischen Siebung und Camsizer
- Tab. 5.26 Auswahl der Proben
- Tab. 5.27 Behandlungen der Präparate für die Messung
- Tab. 5.28 Semiquantitative Ergebnisse der Gesamtmineralanalyse
- Tab. 5.29 Semiquantitative Ergebnisse der Tonmineralanalyse
- Tab. 5.30 Semiquantitative Ergebnisse der Tonmineralanalyse in Bezug auf die Gesamtprobe
- Tab. 5.31 Plastizitätszahlen verschiedener Lehmartens
- Tab. 5.32 Einteilung der Lehme nach Schwindmaß gemäß DIN 18952 Bl. 2
- Tab. 5.33 Beispielhaftes Klassifizierungssystem
- Tab. 5.34 Zusammenführung der Ergebnisse unter Auswertung nach beispielhafter Klassifizierung

Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt allen Personen, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben. Insbesondere möchte ich mich bei meiner Betreuerin, Ao.Univ.Prof.in Dipl.-Ing.in Dr.in phil. Andrea Rieger-Jandl, bedanken, die mir wertvolle Perspektiven eröffnete und stets mit Rat zur Seite stand. Ein großer Dank gilt auch bei meiner Zweitbetreuerin, Univ.Prof.in Dipl.-Ing.in Dr.in techn. Azra Korjenic, für die investierte Zeit und Förderung meiner Arbeit.

Besonders habe ich mich über die großzügige Unterstützung von Personen aus anderen Fachbereichen gefreut und möchte mich daher ganz herzlich bei allen bedanken:

- ◇ Ao.Univ.Prof.i.R. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Franz Ottner und Dipl.-Ing. Maria Mayrhofer, die mir intensive Einblicke in die Welt der Tonminerale ermöglichten.
- ◇ Univ.Ass. Dipl.-Ing. Erich Streit, für seine Beratung und sein Engagement zur Umsetzung meines Vorhabens.
- ◇ ADir Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernis Saracevic und Dipl.-Ing.in Zdravka Saracevic, die mich mit ihrem Labor und fachlichen Wissen im Bereich der Nasschemie unterstützten.
- ◇ Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer, der mich mit den neusten Techniken der Materialprüfung vertraut machte und geduldig all meine Fragen beantwortete.
- ◇ Andreas Hausenberger, der mich ebenfalls mit dem Labor und seinem umfangreichen Fachwissen im Bereich der Geotechnik unterstützte.
- ◇ Mag. Andreas Breuss, MSc., der mir die Lehmbaupraxis näher brachte und viel zu meinem Wissensstand in diesem Bereich beitrug.

Ein großes Dankeschön gilt allen Interviewpartner:innen, die meine Diplomarbeit mit ihrem Wissen maßgeblich bereichert haben. Ich möchte mich zudem bei den Mitarbeiter:innen des ZRS Ingenieure GmbH bedanken, die mir beratend zur Seite standen.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich während meines Studiums unterstützt und bestärkt hat. Sehr dankbar bin ich außerdem für meine Freund:innen im Studium – der Weg, den wir bis hier her geteilt haben, war ein wundervolles Erlebnis.