

Materialforschung Stampflehm – Ein Beitrag zur Weiterentwicklung des Baustoffes Stampflehm

vorgelegt von
Diplom-Ingenieurin
Christina Janson

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. S. Savidis
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. K. Rückert
Gutachter: Prof. em. Dr.-Ing. Klaus Dierks

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 12. Dezember 2012

Berlin 2013

D83

Vorwort

Mein großes Interesse an dem *alten* Baustoff Lehm motivierte mich zu dieser Arbeit am Fachgebiet für Tragwerksentwurf und -konstruktion des Institutes für Architektur der Technischen Universität Berlin.

Für die Betreuung und für die fachlichen Anregungen möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Rückert bedanken. Dank gebührt auch Herrn Professor Dr.-Ing. em. Klaus Dierks, der durch seine Mitbetreuung und stetige Diskussionsbereitschaft zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Für die Unterstützung bei den durchgeführten messtechnischen Untersuchungen möchte ich mich beim Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, insbesondere bei Frau Cordelia Lange sowie dem Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität, vor allem bei Herrn Harald Podeswa, bedanken. Mein Dank gilt außerdem dem Geographischen Institut der Humboldt - Universität zu Berlin für die Bereitstellung messtechnischer Geräte.

Besonders danken möchte ich meinem Ehemann Marco für sein langjähriges Verständnis und seine liebevolle Unterstützung.

Kurzdarstellung

Das steigende ökologische Bewusstsein der letzten Jahrzehnte führte zu einem wachsenden Interesse an dem *alten* Baustoff Lehm. Neben seinen ästhetischen und bauphysikalischen Vorzügen, die ihn besonders für den Einsatz in Wohngebäuden empfehlen, wird der Baustoff auch aufgrund seiner Wiederverwendbarkeit wieder interessant.

Gegenüber den heute üblichen genormten Baustoffen wie z.B. Stahl und Beton gibt es bislang für den Baustoff Stampflehm noch keine anerkannte Methodik zu seiner Optimierung, mit der gewünschte Materialeigenschaften erreicht werden können. Bisher wird üblicherweise durch eine experimentelle Rezepturfindung ein Stampflehmgemisch, unter Verwendung eines natürlich vorkommenden Lehmgemisches, entwickelt. Damit verbunden sind hohe zeit- und materialaufwendige Prüfungen.

Die vorliegende Arbeit gibt Ansätze für die Rezeptur und die Prüfung von Grubenlehm zur Aufbereitung als Stampflehm.

Zielsetzung ist die Entwicklung einer Methodik, mit der - ausgehend von natürlichen Lehmvorkommen - Stampflehmgemische mit gewünschten Materialeigenschaften durch definierte Stoffzusammensetzungen erstellt werden können.

Dazu wurde der Ausgangsstoff Lehm zunächst in seiner Zusammensetzung durch geeignete Prüfmethode analysiert. Die Bestimmung und Analyse des Ausgangsstoffes Naturlehm erfolgte an ausgewählten Grubenlehmen mit verschiedenen, in der Geotechnik bewährten Prüfmethode. Die einzelnen Messmethoden werden auf ihre Eignung und Anwendbarkeit auf Stampflehm überprüft, die Genauigkeit der Messergebnisse bewertet und der ökonomische Aufwand ermittelt.

Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden verschiedene Stampflehmproben systematisch zusammengestellt, geprüft sowie Rückschlüsse auf die jeweiligen Einflussgrößen gezogen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es für Stampflehmgemische einen Kornverteilungsbereich gibt, der die gewünschten optimalen Materialeigenschaften im Hinblick auf Verarbeitbarkeit, Oberfläche, Schwindmaß und Druckfestigkeit ermöglicht.

Eine Analyse der Tonminerale und der Feinkornzusammensetzung ist nicht erforderlich, vielmehr ist die Findung von optimalen Stampflehmgemischen auch mit Hilfe einfacher qualitativer Prüfverfahren möglich.

Es hat sich bestätigt, dass dazu die traditionelle Methode der Knetprüfung sehr gut geeignet ist, sie konnte in einigen Punkten weiterentwickelt werden.

Einen wesentlichen Bestandteil der Arbeit bilden Untersuchungen, mit denen Prüfverfahren auf deren Zuverlässigkeit und Vollständigkeit überprüft werden, um zu gewährleisten, dass Lehmstoffe als Stampflehm verwendet werden können.

Abstract

The increasing environmental consciousness in recent decades has led to a growing interest in the old building material clay. In addition to its aesthetic and structural advantages that recommend clay for residential buildings, it becomes interesting again because of its recyclability.

Compared to today's standardized construction materials such as steel and concrete there is no accepted methodology to optimize clay material for achieving desired material properties yet for the building material rammed earth. Until now, rammed earth material is usually developed by an experimental finding of a recipe, using natural clay. However this causes huge time-consuming and materially intense tests.

This PhD thesis is a research in the field of building with rammed earth, which describes and elaborates new approaches for the design and testing of clay building material.

The main objective is to develop a methodology by which - based on natural-insoluble clay deposits – rammed earth material with desired parameters can be created by using defined material compositions.

For this purpose the substance clay in its composition is carefully analyzed by selecting and using appropriate test methods. The identification and analysis of different systematically selected natural clays is carried out with different approved methods in geotechnical engineering.

The individual measurement methods are tested for their suitability and applicability in building with rammed earth, the accuracy of the measurement results are evaluated and the economic costs are determined.

On the basis of the results rammed earth samples are systematically collected and investigated, and later conclusions on the respective variables are drawn.

The investigations have shown that rammed earth mixtures with optimal material properties cannot be described in an accurate way by just one given grain size distribution.

Rather, the investigations defined a specified grain distribution range, with which the desired optimum material properties in terms of processing, surface shrinkage and compressive strength can be achieved.

A detailed analysis of the clay mineral holdings and the fine grain composition is not really necessary; a deliberate composition of optimal rammed earth was rather possible by using simple qualitative testing procedures.

It has been confirmed that the method of kneading test is very well suited and could be further developed.

An essential part of the investigations are the application, examination and documentation of test methods. In addition to accepted test methods, methods of concrete technology are tested for their applicability in rammed earth.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	15
1 Einleitung	16
1.1 Problemstellung.....	16
1.2 Zielsetzung	17
2 Begriffe und Begriffsbestimmung	19
3 Phase 1 – Prüfung und Analyse von Grubenlehm	22
3.1 Vorstellung Prüfverfahren.....	24
3.1.1 Vorhandensein organischer Substanzen.....	25
3.1.2 Korngrößenanalyse	25
3.1.3 Analyse des Mineralbestands.....	32
3.2 Die Grubenlehme – Gewinnung und charakteristische Merkmale	35
3.3 Analyse von ausgewählten Grubenlehmen unter Anwendung der beschriebenen geotechnischen Messverfahren.....	36
3.3.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung im Grobkornbereich	37
3.3.2 Bestimmung der Korngrößenverteilung im Feinkornbereich	38
3.3.3 Vergleich und Bewertung der Prüfverfahren.....	45
3.3.4 Bestimmung des Mineralbestands.....	54
3.4 Untersuchungsstrategie zur Analyse von Grubenlehm	62
3.5 Zusammensetzung der Grubenlehme	63
3.5.1 Korngrößenverteilung	63
3.5.2 Mineralbestand	64
4 Phase 2 – Materialforschung Stampflehm	65
4.1 Stampflehm - Wahl und Analyse der Ausgangsstoffe	67
4.1.1 Grubenlehme	67
4.1.2 Gesteinskörnungen.....	68
4.2 Stampflehm - Prüfverfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften	69
4.2.1 Herstellungsbedingungen.....	69
4.2.2 Prüfverfahren	70

4.3	Stampflehm - Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Zusammensetzung.....	85
4.3.1	Einflussgröße Korngrößenverteilung	86
4.3.2	Feinkornanteil – Einfluss und Zusammensetzung	118
4.4	Stampflehm - Entwicklung eines Baustoffes mit definierten Eigenschaften	125
5	Ergebnisübersicht Phase 1 und Phase 2	129
6	Zusammenfassung.....	134
Anhang 1	Beschreibung der Sedimentationsverfahren.....	138
	Aräometer-Methode	138
	Atterberg-Methode	140
	Zentrifugen-Methode	141
Anhang 2	Protokolle der Sedimentations-Untersuchungen.....	142
Anhang 3	Protokolle des Laser-Verfahrens	148
Anhang 4	Stampflehm – Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Zusammensetzung - Versuchsprotokolle	150
	Rohdichte	150
	Druckfestigkeit.....	151
	Schwindmaß.....	152
	Elastizitätsmodul	153
Anhang 5	Stampflehm - Rechnerische Ermittlung der Zusammensetzung von Stampflehmgemischen	154
Anhang 6	Stampflehme mit vorgegebener Materialzusammensetzung – Versuchsprotokolle	165
	Rohdichte	165
	Druckfestigkeit.....	166
	Schwindmaß.....	167
	Literaturverzeichnis	168

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Stampflehm – Zusammensetzung und Einflussgrößen	17
Abb. 2	Gewählte Prüfverfahren für die Untersuchung der Grubenlehme	24
Abb. 3	Elektromagnetische Laborsiebmaschine	27
Abb. 4	Fraktioniertes Siebgut.....	27
Abb. 5	Messprinzip Laserbeugung	29
Abb. 6	Versuchsaufbau Laserdiffraktometer mit angeschlossenem Karussellschüttler	30
Abb. 7	optische Einheit des Laserdiffraktometers.....	30
Abb. 8	Karussellschüttler mit Materialproben.....	30
Abb. 9	Einfüllen des Probenmaterials in das Schlauchsystem des Laserdiffraktometers.....	30
Abb. 10	Grafische Darstellung eines Messprotokolls des Laserpartikelanalysators.....	31
Abb. 11	Darstellung der mit dem Laserpartikelanalysator ermittelten Korngrößenverteilungen eines Grubenlehmes.....	31
Abb. 12	Typische Röntgendiffraktogramme von Tonmineralen.....	33
Abb. 13	Anfertigung der Schmierprobe.....	33
Abb. 14	Bedampfung mit Ethylenglykol	33
Abb. 15	Röntgendiffraktometer	34
Abb. 16	Pulverpräparat in Probenhalter.....	34
Abb. 17	Einfüllen von Sammelproben in das Röntgendiffraktometer.....	34
Abb. 18	Naturlehme aus Lehmvor-kommen für Ziegeleien.....	35
Abb. 19	Naturlehme aus dem Abraum von Kiesgruben.....	35
Abb. 20	Darstellung der Korngrößenverteilung der Grubenlehme gemäß DIN 18123	37
Abb. 21	Aräometer-Methode – Darstellung der Kornverteilungslinien gemäß DIN 18123	39
Abb. 22	Atterberg-Methode – Darstellung der Kornverteilungslinien gemäß DIN 18123....	41
Abb. 23	Zentrifugen-Methode – Darstellung der Kornverteilungslinien gemäß DIN 18123	42
Abb. 24	Laserdiffraktometrie – Darstellung der Kornverteilungslinien gemäß DIN 18123..	44
Abb. 25	Kornverteilungslinien eines Grubenlehmes (GL-3) in Abhängigkeit des verwendeten Messverfahrens	45
Abb. 26	Maximale Abweichungen der Messergebnisse der Aräometer-Methode zu den Prüfwerten des Referenzverfahrens in Prozent.....	48
Abb. 27	Maximale Abweichungen der Messergebnisse der Zentrifugen-Methode zu den Prüfwerten des Referenzverfahrens in Prozent.....	49
Abb. 28	Maximale Abweichungen der Messergebnisse der Laserdiffraktometrie zu den Prüfwerten des Referenzverfahrens in Prozent.....	50

Abb. 29	Dauer für die Ermittlung der Korngrößenverteilung für das jeweilige Prüfverfahren.....	53
Abb. 30	Korngrößen von Tonmineralen [Jasmund/Lagaly – 1993].....	54
Abb. 31	Grubenlehm GL-2 Fraktion $d < 0,002$ mm.....	56
Abb. 32	Grubenlehm GL-2 Fraktion $0,002 \text{ mm} < d < 0,006$ mm.....	56
Abb. 33	Grubenlehm GL-2 Fraktion $0,006 \text{ mm} < d < 0,02$ mm.....	57
Abb. 34	Grubenlehm GL-2 Fraktion $0,06 \text{ mm} < d < 0,063$ mm.....	57
Abb. 35	Kornverteilungslinien der Grubenlehme GL-1 bis GL-5.....	63
Abb. 36	Kornverteilungslinien der Grubenlehme GL-1 bis GL-5.....	67
Abb. 37	Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung und der Prüfkörperform für STL-1.....	72
Abb. 38	Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung und der Prüfkörperform für STL-2.....	72
Abb. 39	Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung und der Prüfkörperform für STL-3.....	73
Abb. 40	Probewürfel mit $a = 20$ cm und Darstellung der Bruchfigur.....	74
Abb. 41	Probezylinder mit $d = 15$ cm und Darstellung der Bruchfigur.....	74
Abb. 42	Probewürfel mit $a = 10$ cm und Darstellung der Bruchfigur.....	74
Abb. 43	Prüfaufbau für Elastizitätsmodul-Messung.....	75
Abb. 44	Beispieldiagramm – Plastische Verformung einer Stampflehmprobe bei mehrmaligen Belastungswiederholungen.....	76
Abb. 45	Belastungs-Zeit-Diagramm für Elastizitätsmodul-Messung.....	76
Abb. 46	Schwindverlauf von Stampflehm mit unterschiedlicher Zusammensetzung.....	80
Abb. 47	Gesamtverformung einer Stampflehmprobe bei einer Dauerlast von $1/3$ bzw. $1/7$ der zu erwartenden Bruchspannung.....	82
Abb. 48	Prüfaufbau Kriechverformungs-messung.....	83
Abb. 49	Prüfkörper in der Versuchseinrichtung.....	83
Abb. 50	Untersuchungsprogramm.....	85
Abb. 51	Sieblinien gemäß DIN 1045 Teil 2 für ein Größtkorn von 16 mm.....	87
Abb. 52	Darstellung des Untersuchungsbereiches mit den definierten oberen und unteren Grenzlinien.....	88
Abb. 53	Darstellung der definierten Prüfbereiche und der begrenzenden Kornverteilungslinien KVL I bis KVL III.....	89
Abb. 54	Darstellung der definierten Prüfbereiche und Einordnung der Kornverteilungslinien der untersuchten Stampflehmgemische.....	91
Abb. 55	Prüfprogramm für Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung.....	92
Abb. 56	Unterteilung des Prüfbereiches b in die Bereiche b_1 und b_2	93

Abb. 57	Beurteilung der Verarbeitbarkeit für die Kornverteilungsbereiche a bis d.....	95
Abb. 58	Darstellung der verwendeten Stoffanteile bzw. der schrittweisen Erhöhung des Naturlehmanteils für die Herstellung der Kornverteilungslinien KL-1a bis KL-1f ...	98
Abb. 59	Knetproben von KL-1a bis KL-1f für die qualitative Zuordnung	99
Abb. 60	Knetproben von KL-3a bis KL-3f für die qualitative Zuordnung	99
Abb. 61	Einordnung der untersuchten Stampflehmgemische in die Zustände I bis IV gemäß Knetprüfung	99
Abb. 62	Beispielhafte Prüfbeschreibung für die Oberflächenstruktur eines Probekörpers mit a) grobkörniger Zusammensetzung und b) gemischtkörniger Zusammensetzung	101
Abb. 63	Einschätzung der Homogenität für die untersuchten Probekörper	102
Abb. 64	Einschätzung der Ebenheit für die untersuchten Probekörper	102
Abb. 65	Einschätzung der Abriebfestigkeit für die untersuchten Probekörper.....	102
Abb. 66	Einschätzung der Rissempfindlichkeit für die untersuchten Probekörper.....	102
Abb. 67	Einschätzung der Oberflächenqualität beruhend auf den einzelnen Kriterien Homogenität, Rissempfindlichkeit, Abriebfestigkeit und Ebenheit für die untersuchten Probekörper	102
Abb. 68	Mindestwerte der ermittelten Rohdichten einer Versuchsserie	104
Abb. 69	Druckfestigkeiten von Stampflehmgemischen mit einer Kornverteilung in den Siebbereichen b_1 , b_2 und c – Darstellung der kleinsten Einzelwerte der Versuchsserien	107
Abb. 70	Druckfestigkeiten von Stampflehmgemischen mit einer Kornverteilung in den Siebbereichen b_1 , b_2 und c - Darstellung der größten Einzelwerte der Versuchsserien	108
Abb. 71	Einordnung Fuller-Parabel und Parabel nach Boemanns in die definierten Kornverteilungsbereiche	109
Abb. 72	Darstellung der Kornverteilungsbereiche b und c und Einordnung der Parabel nach Boemanns und dem gefundenen Bereich für günstige Druckfestigkeiten ..	110
Abb. 73	Schwindmaß von Stampflehmgemischen mit einer Kornverteilung in den Siebbereichen b_1 , b_2 und c	111
Abb. 74	Elastizitätsmodul von Stampflehmgemischen mit einer Kornverteilung in den Siebbereichen b_1 , b_2 und c	112
Abb. 75	Darstellung der definierten Kornverteilungsbereiche.....	113
Abb. 76	Qualitative Bewertung der Stoffeigenschaften in Abhängigkeit der Kornzusammensetzung (Kornverteilungsbereich a-d).....	114
Abb. 77	Darstellung Kornverteilungsbereich mit optimalen Materialeigenschaften	116
Abb. 78	Darstellung von Sieblinienverläufen für Gesteinskörnungen von Stampflehmgemischen im Schaubild nach DIN 1045-2 (Größtkorn 16 mm).....	117
Abb. 79	Zusammenhang Tonmineralgehalt zum Gesamtanteil der Körner mit $d < 0,25$ mm.....	119

Abb. 80	Zusammenhang Tonmineralgehalt zum Schluffgehalt (Körner $0,002 < d < 0,063$ mm)	120
Abb. 81	Verhältnis Anteil nichtbindiger Bestandteile $d < 0,25$ mm zu bindigen Bestandteilen in Abhängigkeit des Tonmineralgehalts (bindige Bestandteile)	121
Abb. 82	Zusammensetzung von Stampflehmgemischen mit optimalen Materialeigenschaften im Feinkornbereich (Korngrößen $d < 0,25$ mm)	122
Abb. 83	Zusammensetzung der bindigen Bestandteile (Tonminerale) von Stampflehmgemischen mit optimalen Materialeigenschaften.....	123
Abb. 84	Spezifische Oberflächen der Tonminerale in Stampflehmgemischen mit optimalen Materialeigenschaften	124
Abb. 85	Kornverteilungslinien der Stampflehmmischungen.....	126
Abb. 86	Ermittelte Druckfestigkeit – Minimal- und Maximalwerte der Versuchsserien	127
Abb. 87	Ermittelte Rohdichten	127
Abb. 88	Ermittelte Schwindmaße.....	128
Abb. 89	Ablaufdiagramm für Stampflehmgemische mit optimalen Materialeigenschaften	133

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Übersicht – Struktur und Eigenschaften von Tonmineralen	20
Tab. 2	Gewählte Messverfahren für die Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Kornfraktion	26
Tab. 3	Übersicht der Grubenlehme und deren charakteristische Einschätzung.....	36
Tab. 4	Siebdurchgänge der Grubenlehme für Korngrößen über 0,063 mm	37
Tab. 5	Aräometer-Methode - Korngrößenverteilung im Feinkornbereich	39
Tab. 6	Atterberg-Methode - Korngrößenverteilung im Feinkornbereich	40
Tab. 7	Zentrifugen-Methode - Korngrößenverteilung im Feinkornbereich	42
Tab. 8	Laserdiffraktometrie - Korngrößenverteilung im Feinkornbereich.....	43
Tab. 9	Übersicht über die verwendeten Geräte und Materialien	53
Tab. 10	Zuordnung Kornfraktionen – Korngrößen gemäß DIN 18123.....	55
Tab. 11	Mineralbestand GL-1 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion.....	58
Tab. 12	Mineralbestand GL-2 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion.....	58
Tab. 13	Mineralbestand GL-3 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion.....	58
Tab. 14	Mineralbestand GL-4 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion.....	59
Tab. 15	Mineralbestand GL-5 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion.....	59
Tab. 16	Übersicht des Gesamtmineralbestands für die untersuchten Grubenlehme	61
Tab. 17	Übersicht der in Phase 1 - Prüfung und Analyse von Grubenlehmen verwendeten Prüfverfahren	62
Tab. 18	Übersicht des Gesamtmineralbestands für die untersuchten Grubenlehme	64
Tab. 19	Zusammensetzung der untersuchten Naturlehme, aufgeschlüsselt nach bindigen (Tonminerale) und nicht bindigen Bestandteilen.....	64
Tab. 20	Übersicht des Gesamtmineralbestands für die untersuchten Grubenlehme	67
Tab. 21	Mineralische Zuschläge im Untersuchungsprogramm.....	68
Tab. 22	Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnungen	68
Tab. 23	Berechnung Kriechzahl	82
Tab. 24	Bewertungskriterien für die Einschätzung der Verarbeitbarkeit.....	95
Tab. 25	Übersicht Zustände I bis IV gemäß Definition Knetprüfung.....	97
Tab. 26	Bewertungsschlüssel für Abb. 76	115
Tab. 27	Spezifische Oberflächen von Tonmineralen [Bussert – 2004].....	124
Tab. 28	Zusammensetzung der Stampflehmgemische (Angabe in Raumteilen RT).....	126
Tab. 29	Zusammenfassung Materialeigenschaften	128
Tab. 30	Übersicht der in Phase 1 - Prüfung und Analyse von Grubenlehmen verwendeten Prüfverfahren	130

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Lehm stellte im Verlauf der Menschheitsgeschichte für mehrere Jahrtausende bis zum Ende des 19. Jahrhunderts neben Holz und Naturstein einen der wichtigsten Baustoffe dar. Mit der einsetzenden Industrialisierung wurden jedoch neue Baustoffe entwickelt, die in Verbindung mit neuen Fertigungstechniken als Massenprodukte angeboten werden konnten und den Lehm als Baumaterial fast vollständig aus der Bauwirtschaft verdrängten. Dass der Lehm nicht völlig an Bedeutung verlor, verdankt er seiner einfachen und energiearmen Herstellungsweise, die ihn besonders in Krisenzeiten als Baustoff wieder aufleben ließ.

Mit dem steigenden ökologischen Bewusstsein in den letzten Jahrzehnten setzte ein Umdenken ein, das zu einem wachsenden Interesse an dem *alten* Baustoff führte. Neben seinen ästhetischen und bauphysikalischen Vorzügen empfiehlt sich Lehmmaterial als nachhaltiger Baustoff, da er wieder verwendbar ist.

Neben Anwendungsgebieten wie Putzen oder Ausfachungen könnte der Einsatz von Stampflehm, der eine tragende Funktion im Bauwerk erfüllen soll, wieder belebt werden.

Gegenüber den heute üblichen Designbaustoffen wie z.B. Stahl und Beton gibt es für den Stampflehm bislang noch keine anerkannte Methodik zur Optimierung des Baustoffes mit der gewünschte Materialeigenschaften erreicht werden können. Bisher wird üblicherweise durch eine experimentelle Rezepturfindung ein Stampflehmgemisch, unter Verwendung eines natürlich vorkommenden Lehmgemisches, entwickelt. Damit verbunden sind zeit- und materialaufwendige Prüfungen. Wegen fehlender Kenntnisse über die Materialeigenschaften im Einzelfall werden die Materialkennwerte des Stampflehmes, die für statische Bemessungen notwendig sind, mit hohen Sicherheitsbeiwerten belegt. In der Praxis ergibt sich damit für Tragkonstruktionen aus Stampflehm ein relativ hoher Materialaufwand.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit liefert neue Ansätze für die Rezeptur von Grubenlehm zur Aufbereitung zu Stampflehm.

Zielsetzung ist die Entwicklung einer Methodik, mit der - ausgehend von natürlichen Lehmvorkommen - Stampflehmgemische mit gewünschten Materialkennwerten durch die Auswahl definierter Stoffzusammensetzungen erstellt werden können. Gleichzeitig sollen die - bisher bei Stampflehm un vermeidlichen - großen Streuungen der Materialkennwerte entscheidend verringert werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wird dazu der Baustoff Stampflehm zunächst in seine Bestandteile zerlegt und analysiert. Dabei gilt es herauszufinden, in wie weit die Einzelbestandteile die Eigenschaften des Lehmstoffes beeinflussen.

Eine Übersicht der zu bewertenden Einflussgrößen kann der Abb. 1 entnommen werden, mit der bereits das prinzipielle Vorgehen für die Erarbeitung der formulierten Zielstellung verdeutlicht wird.

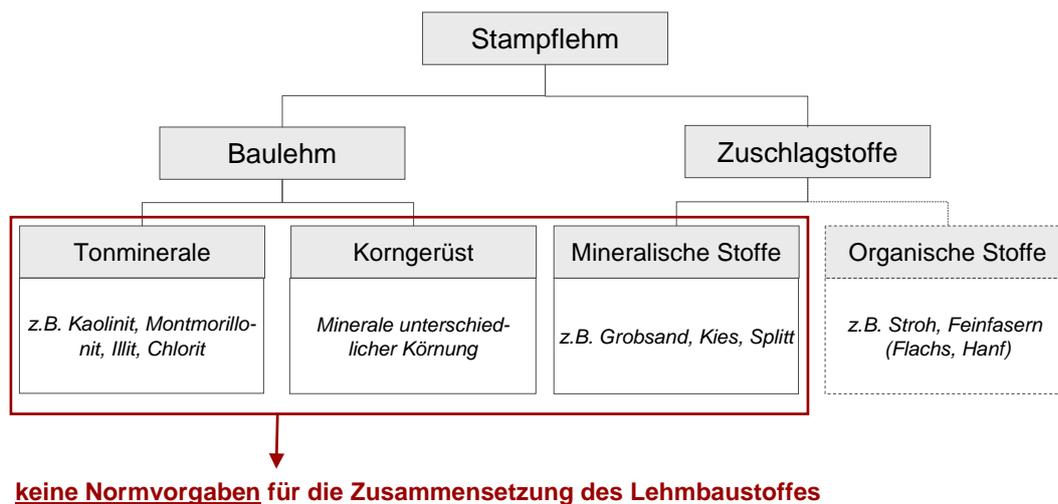


Abb. 1 Stampflehm – Zusammensetzung und Einflussgrößen

Für den Baustoff Lehm werden vom Dachverband Lehm e.V. die *Lehmbau Regeln* herausgegeben, in denen Empfehlungen für die Herstellung und Prüfung gegeben werden. Die *Lehmbau Regeln* wurden in die Musterliste der Technischen Baubestimmungen des Deutschen Institutes für Bautechnik Berlin aufgenommen und damit den Bundesländern zur bauaufsichtlichen Einführung empfohlen. [Dachverband Lehm e.V. – 2009]

Der aktuellen Auflage der Lehmbau Regeln können für den Baustoff Stampflehm hauptsächlich qualitative Angaben zur Materialzusammensetzung und Prüfung von Stampflehmgemischen entnommen werden. [Dachverband Lehm e.V. – 2009, Seite 21-24] Quantitative Angaben im Hinblick auf die Korngrößenverteilung von Stampflehmgemischen, den Feinkorngehalt oder dem Tonmineralgehalt sind nicht enthalten.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Zielstellung ist es, eingrenzende quantitative Aussagen zur Materialzusammensetzung des Baustoffes Stampflehm zu treffen.

Neben den reinen materialtechnischen Untersuchungen wird ein weiterer Schwerpunkt auf die Bewertung und Dokumentation von Prüfverfahren gesetzt. Diese werden auf ihre spezielle Eignung im Stampflehmbau untersucht und bewertet.

2 Begriffe und Begriffsbestimmung

Baulehm

Als Baulehme werden Lehmvorkommen bezeichnet, die zur Herstellung von Lehmbaustoffen geeignet sind. [Dachverband Lehm e.V. – 2009] Baulehm wird aus natürlichen Lagerstätten (Naturlehm) gewonnen. Baulehm soll frei sein von schädlichen Fremdstoffen und sonstigen Verunreinigungen.

Lehm mit deutlich wahrnehmbaren Humusbestandteilen, Mutterboden oder organischen Bestandteilen ist für Bauzwecke ungeeignet, da er geminderte Festigkeit aufweist und zur Schimmelbildung neigt. [Schneider et al – 1996]

Gleichgewichtsfeuchte

Gleichgewichtsfeuchte (auch: *Ausgleichsfeuchte*, *Bilanzfeuchte*, *praktischer Feuchtegehalt*) ist derjenige Wassergehalt, der sich in einem Baustoff nach längerer Lagerung in einem Raum mit konstanter relativer Luftfeuchte und konstanter Temperatur ergibt.

Lehm

Als Lehm wird ein Gemisch aus Kies, Sand, Schluff (feinstes, staubförmiges Gesteinsmaterial, auch Staubsand und Silt genannt) und Tonmineralen bezeichnet. Er entsteht aus Verwitterung und Zertrümmerung von Festgestein zu Lockergestein. Lockergestein setzt sich aus Anteilen von Gesteinspartikeln verschiedener Größe zusammen. [Huber et al – 1997] Es werden einzelne Gruppen, sogenannte Fraktionen, nach Durchmesser der Einzelbestandteile (Korngrößen) gebildet:

Steine	über 60 mm
Kies	2 bis 60 mm
Sand	0,06 bis 2 mm
Schluff (Silt)	0,002 bis 0,006 mm
Feinstes*	0,002 mm und weniger

* Tonminerale und nichtbindige Bestandteile

Tonminerale

Tonminerale sind Verwitterungs- und Umwandlungsprodukte magmatischer, metamorpher oder sedimentärer Ausgangsgesteine. Sie können durch Anreicherungsverfahren zu Tonsedimenten und Tongesteinen abgelagert und umgewandelt werden. Die Bildung der Tonminerale ist von der Zusammensetzung der Ausgangsgesteine sowie dem vorherrschenden Verwitterungsmilieu abhängig. [Heim - 1990]

Tonminerale werden über ihre kristalline Struktur definiert. Die wesentlichen Merkmale der kristallinen Struktur von Tonmineralen sind ihre plättchenförmige Gestalt mit negativer Oberflächenladung. [Huber et al - 1997]

Die Grundbausteine der Tonminerale sind:

- vier Sauerstoffatome, die eine Tetraedereinheit um ein vierwertiges Silizium-Ion bilden (Tetraederschicht)
- sechs Sauerstoffatome, die eine Oktaedereinheit um ein sechswertiges Aluminium-Ion bilden (Oktaederschicht)

Aus den Grundbausteinen, die sich verbinden und in unterschiedlicher Zusammensetzung schichtförmig aufbauen, entstehen die verschiedenen Tonminerale in Plättchenform. [Bussert – 2004]

	Zweischicht- minerale	Dreischicht- Minerale	Dreischicht- Minerale (quellfähig)	Vierschicht- minerale
Struktur:	T Tetraederschicht O Oktaederschicht	T Tetraederschicht O Oktaederschicht T Tetraederschicht	T Tetraederschicht O Oktaederschicht T Tetraederschicht	T Tetraederschicht O Oktaederschicht T Tetraederschicht O Oktaederschicht
Bindung der Elementar- schichtenh	Wasserstoffbrücken (Halloysit: H ₂ O- Moleküle)	Zwischenschicht- Kationen	Zwischenschicht- Kationen	Zwischenschicht- Kationen
Häufigster Vertreter:	Kaolinit	Illit	Montmorillonit	Chlorit
Farbe:	weiß	grau, grün, weiß	weiß, gelb	grünlich
Quellfähigkeit:	fehlt	fehlt (gering)	vorhanden	fehlt
Spezifische Oberfläche [m ² /g]:	30 (gering)	50 – 200 (abh. von der Korngröße und Aufweitung)	800 (hoch)	< 200 (mäßig)

Tab. 1 Übersicht – Struktur und Eigenschaften von Tonmineralen

Im Zusammenhang mit der Schichtstruktur der Tonminerale ergeben sich deren Quellfähigkeit bzw. Wasseraufnahmevermögen.

Durch ihre Struktur bilden die Tonminerale untereinander starke Bindekräfte aus, die entscheidend für das Festigkeitsgefüge des Lehngemisches sind.

Spezifische Oberfläche

Als spezifische Oberfläche wird die Summe aller Grenzflächen fest-flüssig und fest-gasförmig einer Festsubstanz, z.B. eines Bodens, bezogen auf seine Gewichtseinheit [cm²/g] oder [m²/g] definiert.

Stampflehm

Der Baustoff Stampflehm ist ein Gemisch aus Baulehm und Zuschlagstoffen, in der Regel Gesteinskörnungen. Diese werden dem Naturlehm beigemischt, um das Schwindverhalten und die Festigkeiten zu verbessern. Besonders geeignet sind von Natur aus gemischtkörnige bis steinige Lehme, wie beispielsweise Berg- und Gehängelehme. [Dachverband Lehm e.V. – 2009]

Die Begriffsbezeichnung Stampflehm leitet sich aus der Art des Einbaus des Baumaterials ab. Stampflehm wird lagenweise eingebracht und verdichtet.

Zuschlagstoffe

Als Zuschlagstoffe werden Materialien bezeichnet, die dem Baulehm zur Erreichung bestimmter Materialeigenschaften beigefügt werden.

Mineralische Zuschlagstoffe sind Grobsand, Kies oder Splitt. *Organische Zuschlagstoffe* sind z.B. Feinfasern (Flachs, Hanf) oder Stroh bis zu ca. 10 cm Länge. [Dachverband Lehm e.V. – 2009]

3 Phase 1 – Prüfung und Analyse von Grubenlehm

Grundlage für den Baustoff Stampflehm ist natürlich vorkommender Lehm, der durch Zugabe von Zuschlagsstoffen materialtechnisch aufgewertet wird.

Bisher existieren für den Lehmbau keine mit dem Betonbau vergleichbaren Regelwerke, die eine systematische Zusammenstellung von Stampflehmgemischen ermöglichen. Dies liegt hauptsächlich in den unterschiedlichen Zusammensetzungen der Naturlehme begründet, die keine Produkte mit genormten Materialkennwerten darstellen.

Der Herstellungsprozess von Stampflehmgemischen wird in der Regel von dem Geschick und den Erfahrungen einzelner Personen entschieden, die geeignete Rezepturen durch eine Variation der Ausgangsstoffe suchen und diese in Form von Versuchsreihen im Hinblick auf die gewünschten Materialeigenschaften des Stampflehms bestätigen.

Eine vorherige sorgfältige Analyse des Naturlehms bzw. der Ausgangsstoffe ist bislang nicht üblich. Vielmehr wird der Findungsprozess eines geeigneten Stampflehmgemisches maßgeblich durch den Erfolg einer experimentellen Variation der Ausgangsstoffe bestimmt. Dazu müssen zunächst verschiedene Stampflehmmischungen hergestellt, und nach dem Erreichen der Ausgleichsfeuchte auf die Einhaltung der gewünschten Materialeigenschaften untersucht und danach gegebenenfalls variiert werden. Insgesamt stellt dies einen zeit- und materialaufwendigen Prozess dar, den es zu minimieren gilt.

In dieser Arbeit werden deshalb Möglichkeiten gesucht, den Prüfaufwand zu reduzieren und die Eingangsparameter für die späteren Untersuchungen, mit denen gewünschte Materialeigenschaften generiert werden sollen, zu bestimmen.

Dazu wird im ersten Teil der Arbeit, der im Folgenden Phase 1 genannt wird, der Ausgangsstoff Lehm in seiner Zusammensetzung durch die Auswahl geeigneter Prüfmethoden analysiert. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse können in Phase 2 verschiedene Stampflehmproben systematisch zusammengestellt, geprüft sowie Rückschlüsse auf die jeweiligen Einflussgrößen gezogen werden.

Die Analyse der Naturlehme umfasst folgende Parameter:

- Vorhandensein organischer Bestandteile
- Korngrößenverteilung
- Art der Tonminerale
- Tonmineralgehalt

Die Bestimmung und Analyse des Ausgangsstoffes Naturlehm erfolgt an systematisch ausgewählten Grubenlehm mit verschiedenen, in der Geotechnik bewährten Prüfmethoden. Die einzelnen Messmethoden werden auf ihre Eignung und Anwendbarkeit für den Stampflehmbau überprüft, die Genauigkeit der Messergebnisse bewertet und der ökonomische Aufwand ermittelt.

Aus dem Vergleich der Verfahren soll eine Untersuchungsstrategie entwickelt werden, die es ermöglicht, Grubenlehm – den Grundstoff von Lehmbaustoffen - wirtschaftlich und hinreichend genau zu analysieren.

3.1 Vorstellung Prüfverfahren

Für die Analyse von Naturlehm ist eine Vielzahl von Untersuchungsverfahren denkbar. Zur Eingrenzung und Reduzierung des Prüfaufwandes wurden bewährte Verfahren aus dem Gebiet der Bodenanalyse gewählt.

Eine Übersicht der gewählten Verfahren kann der Abb. 2 entnommen werden. Dabei stellt die Korngrößenanalyse des Feinkornbereichs von natürlich vorkommenden Lehmen den Schwerpunkt der Untersuchungen dar. Dies liegt vor allem in der Vielzahl der Messmethoden begründet, die sich wesentlich in ihrem Zeit- und Geräteaufwand unterscheiden. Für diese Verfahren wurde deshalb ein besonderer Fokus auf die Genauigkeit der Messergebnisse und den ökonomischen Aufwand gelegt.

Die Untersuchungen konnten in den Laboren des Institutes für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin durchgeführt werden. Die Korngrößenanalyse mittels Laserdiffraktometrie erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Humboldt-Universität zu Berlin.

Eine nähere Beschreibung der einzelnen Prüfverfahren kann den nachstehenden Abschnitten entnommen werden.



Abb. 2 Gewählte Prüfverfahren für die Untersuchung der Grubenlehme

3.1.1 Vorhandensein organischer Substanzen

Baulehme müssen weitgehend frei von organischen Bestandteilen sein.

Lehme mit viel Humusbestandteilen, Mutterboden oder anderen organischen Bestandteilen neigen zur Schimmelbildung und können zu geminderten Festigkeiten führen. Für baupraktische Anwendung sind sie deshalb ungeeignet. [Schneider et al – 1996] Eine Prüfung auf organische Substanzen kann bereits vor Ort durch einfache Verfahren, den so genannten *Riechversuch* bzw. durch *Beurteilung der Lehmfarbe* erfolgen.

Der *Riechversuch* nach DIN 4022 Teil 1 wird an der frisch entnommenen Lehmprobe durchgeführt. Sollte ein humusartiger Geruch festgestellt werden, deutet dieser auf organische Bestandteile hin. Durch Erhitzen der Probe können diese zusätzlich kenntlich gemacht werden.

Die *Lehmfarben* erdfeuchter Grubenlehme reichen von grau, gelbbraun, rotbraun bis rot. Dunkle Färbung kann auf Humusbestandteile hindeuten. Abgesehen davon, ist die Lehmfarbe für die baupraktische Verwendbarkeit ohne Bedeutung. [Dachverband Lehm e.V. – 2002]

3.1.2 Korngrößenanalyse

Mit der Korngrößenanalyse werden die Massenanteile der unterschiedlichen Kornfraktionen eines Bodens bestimmt. Die verschiedenen Bodenpartikel werden bezüglich ihrer Größe in die Klassen Steine, Kies, Sand, Schluff und Feinstes eingeteilt.

Die Korngrößenanalyse eines Bodens beginnt in der Regel mit einer *Siebanalyse*, bei der die groben Bestandteile bis herab zu 0,063 mm aufgetrennt werden. Die Feinkornfraktionen mit Durchmessern kleiner 0,063 mm lassen sich dagegen mit Hilfe eines Siebes nicht mehr unterteilen. Zur Ermittlung der Korngrößenverteilung im Feinkornbereich werden vorrangig *Sedimentationsverfahren*, aber auch *Lasertechniken* angewendet.

In der

Tab. 2 sind in Abhängigkeit des Korndurchmessers bzw. der Kornfraktion mögliche anwendbare Messverfahren für die Bestimmung der Korngrößenverteilung dargestellt, deren Ergebnisse verglichen wurden.

Korndurchmesser d in [mm]	Kornfraktion nach DIN 18123	Bestimmung der Korngrößenverteilung	Gewählte Messverfahren
> 60	Steine	Siebanalyse	Siebanalyse nach DIN 18123
2 bis 60	Kies		
0,06 bis 2	Sand		
0,002 – 0,006	Schluff	Sedimentation	Aräometer-, Atterberg-, Zentrifugen-Methode
< 0,002	Feinstes	Laserbeugung	Laserbeugung

Tab. 2 Gewählte Messverfahren für die Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Kornfraktion

3.1.2.1 Siebanalyse

Mit der Siebanalyse lässt sich die Korngrößenverteilung von Böden für Korngrößen über 0,063 mm bestimmen. Dazu wird der Boden mit Hilfe von unterschiedlichen Prüfsieben in definierte Körnungsgruppen unterteilt.

Die Analysesiebe werden mit von unten nach oben zunehmender Maschenweite zu einem Siebsatz zusammengesetzt. Für den Siebgang wird das Siebgut auf dem obersten Prüfsieb aufgegeben. Der Kornanteil, der ein Sieb passiert, wird als Siebdurchgang bezeichnet, der auf dem Sieb verbleibende Anteil als Siebrückstand.

Im Erd-, Wasser- und Verkehrsbau werden Böden nach den verbindlichen Vorgaben der DIN 18123 überprüft. Die DIN 18123 unterscheidet in Trocken- und Nass-Siebverfahren.

Böden, die ausschließlich Korngrößen über 0,063 mm enthalten, werden mittels Trockensiebung überprüft. Sind im Boden feinere Bestandteile mit einem Korndurchmesser unter 0,063 mm enthalten - wie im Naturlehm üblich - wird die zu untersuchende Probe zunächst genässt, um die Feinteile durch einen Nass-Siebgang abzutrennen.

Hier wurden die Siebversuche mit einer elektromagnetischen Laborsiebmaschine der Fa. Haver & Boecker durchgeführt (Abb. 3).

Die Abtrennung des Feinkorns erfolgt im Nass-Sieb-Verfahren. Hierzu wird das Probenmaterial als Suspension auf dem obersten Siebboden des Siebsatzes aufgegeben und der Nassdurchgang in einem Gefäß aufgefangen. Der auf den einzelnen Prüfsieben verbleibende Anteil sowie das aufgefangene Feinkorn werden nach dem Siebgang im Trocknungsofen bis zur Massenkonstanz getrocknet, der jeweilige prozentuale Anteil an der Gesamtmasse bestimmt und die Siebdurchgänge ermittelt (siehe Abb. 4)



Abb. 3 Elektromagnetische
Laborsiebmaschine



Abb. 4 Fraktioniertes Siebgut

3.1.2.2 Sedimentationsverfahren

Durch Sedimentation kann die Kornverteilung der feinen Bestandteile, mit einer Korngröße unter 0,063 mm, im Boden bestimmt werden. Mit Sedimentation wird dabei das Absinken von Körnern eines Bodens in einer stehenden Flüssigkeit bezeichnet.

Die Auftrennung der in der Suspension enthaltenen Bestandteile in die verschiedenen Kornfraktionen erfolgt durch eine Schlämmanalyse und beruht auf dem Prinzip, dass die dispergierten Teilchen, die sich in ihrer Korngröße unterscheiden, unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten aufweisen.

Die Beziehung zwischen Sinkgeschwindigkeit und Äquivalent-Korngröße¹ ergibt sich aus dem Widerstandsgesetz für Festkörper.

Mit diesem Gesetz kann ein Festkörper beschrieben werden, der sich mit einer konstanten Relativgeschwindigkeit v und einem Querschnitt F zur Strömung durch eine Flüssigkeit mit der Dichte ρ_w bewegt [Heim – 1990]:

$$W = \frac{1}{2} c \cdot F \cdot v^2 \quad [3.1] \quad (c - \text{der von der Reynold-Zahl } Re \text{ abhängige Widerstandsbeiwert)}$$

$$Re = \frac{\rho_w \cdot m \cdot v}{\eta} \quad [3.2]$$

¹ Das Widerstandsgesetz setzt voraus, dass die Teilchen glatte, starre Kugeln sind. Da dies in den wenigsten Fällen zutrifft – z.B. Blättchenform der Schichtsilikate - arbeitet man mit dem so genannten Äquivalent-Korngrößen (häufig auch Äquivalentradius). Der Äquivalentradius ist der Radius eines Körpers der beim Sedimentieren in gleicher Zeit die gleiche Strecke fällt, wie eine Quarzkugel. [Engelhardt/Müller – 1964]; [Heim – 1990]

Mit der aus dem Widerstandsgesetz abgeleiteten Formel von Stokes (1845) für sehr kleine, daher im Wasser sehr langsam absinkende Kugeln mit dem Radius r sowie der Dichte ρ , für die $c = 24/Re$ gilt.

$$v_s = \frac{g}{18} \cdot \frac{\rho - \rho_w}{\mu} \cdot d^2 = \frac{g}{18 \cdot \nu} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_w} - 1 \right) \cdot d^2 \quad [3.3]$$

V_s	[cm/s]	-Relativgeschwindigkeit (Sinkgeschwindigkeit)
$g = 981$	[cm/s ²]	-Fallbeschleunigung
ρ	[g/cm ³]	-Dichte des fallenden Minerals
ρ_w	[g/cm ³]	-Dichte der Flüssigkeit
μ	[g/(cm·s)]	-Viskosität der Flüssigkeit
r	[cm]	-Radius des fallenden Minerals
ν	[s/cm ²]	kinematische Zähigkeit

Mit der Formel für die Sinkgeschwindigkeit v_s kann nunmehr in Abhängigkeit der Fallhöhe bzw. der Dichte der Suspension, die Fallzeit für einen definierten Korndurchmesser bestimmt werden. Diese Fallzeiten stellen Vorgabewerte für die unterschiedlichen Schlämmanalysen dar.

Die Sedimentationsverfahren Aräometer-Methode, Atterberg-Methode und Zentrifugen-Methode sind in Anhang 1 ausführlich beschrieben.

3.1.2.3 Korngrößenanalyse mittels Laserbeugung

Die Methode zur Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung mit einem Laser-Diffraktometer beruht auf dem Prinzip der unterschiedlichen Streuung von Licht an Partikeln verschiedener Größe. Aus den Streuwinkeln lassen sich Rückschlüsse auf die Korngrößen schließen.

Der Streuwinkel an Partikeln nimmt dabei mit kleiner werdendem Durchmesser zu.

Während des Messvorgangs strömt die suspendierte Probe durch eine Küvette, die von einem Laser durchstrahlt wird. Der abgelenkte Laserstrahl trifft auf ein System von Detektoren. Anhand des Streumusters können Rückschlüsse auf die erfassten Partikel und damit auf die vorhandenen Korngrößen gezogen werden.

Das Messprinzip des Laser-Verfahrens wird in der nachfolgenden Grafik schematisch verdeutlicht.

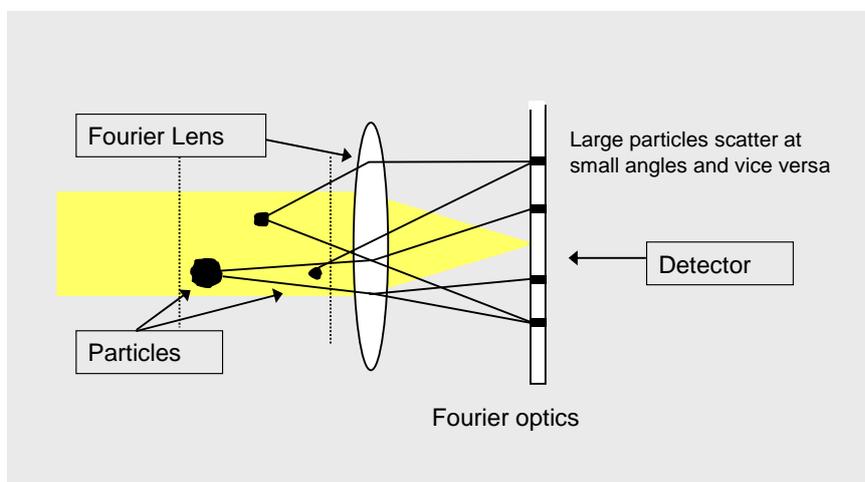


Abb. 5 Messprinzip Laserbeugung

Für die Messungen wird ein Laserdiffraktometer der Fa. Beckman - Coulter verwendet. Der Laserpartikelanalysator LS 13320 erfasst Korngrößen im Bereich von 40 nm bis 2 mm.

Für den Messgang wird eine Probenmenge von annähernd 100 mg bis 200 mg angesetzt. Die Lehmprobe wird unter Zugabe von Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat) und destilliertem Wasser in verschließbare Röllchen gefüllt und über einen Zeitraum von mindestens 12 Stunden in einem Karussellschüttler geschüttelt.

Je Versuchslehm werden fünf Teilproben gemessen und der Mittelwert als repräsentative Korngrößenverteilung bestimmt. In den Abbildungen Abb. 6 bis Abb. 9 wird beispielhaft der Versuchsaufbau sowie einzelne Komponenten der Anlage dargestellt.

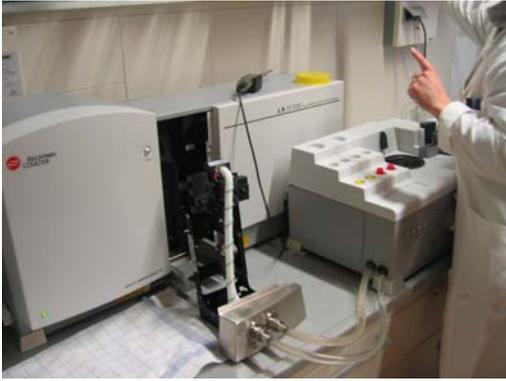


Abb. 6 Versuchsaufbau Laserdiffraktometer mit angeschlossenem Karussellschüttler



Abb. 7 optische Einheit des Laserdiffraktometers



Abb. 8 Karussellschüttler mit Materialproben



Abb. 9 Einfüllen des Probenmaterials in das Schlauchsystem des Laserdiffraktometers

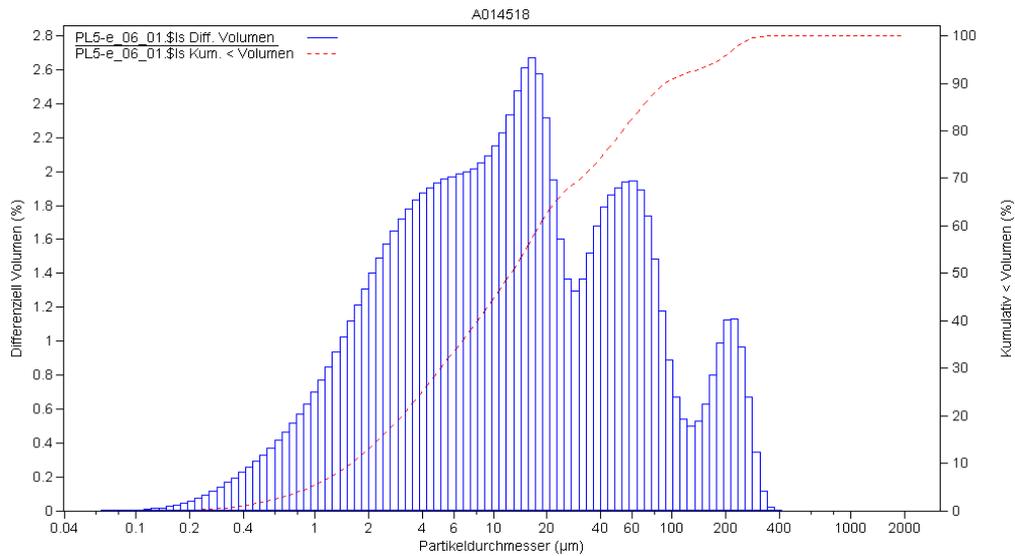


Abb. 10 Grafische Darstellung eines Messprotokolls des Laserpartikelanalysators

Darstellung des Volumens in Abhängigkeit der Partikelgröße für einen einzigen Messdurchlauf

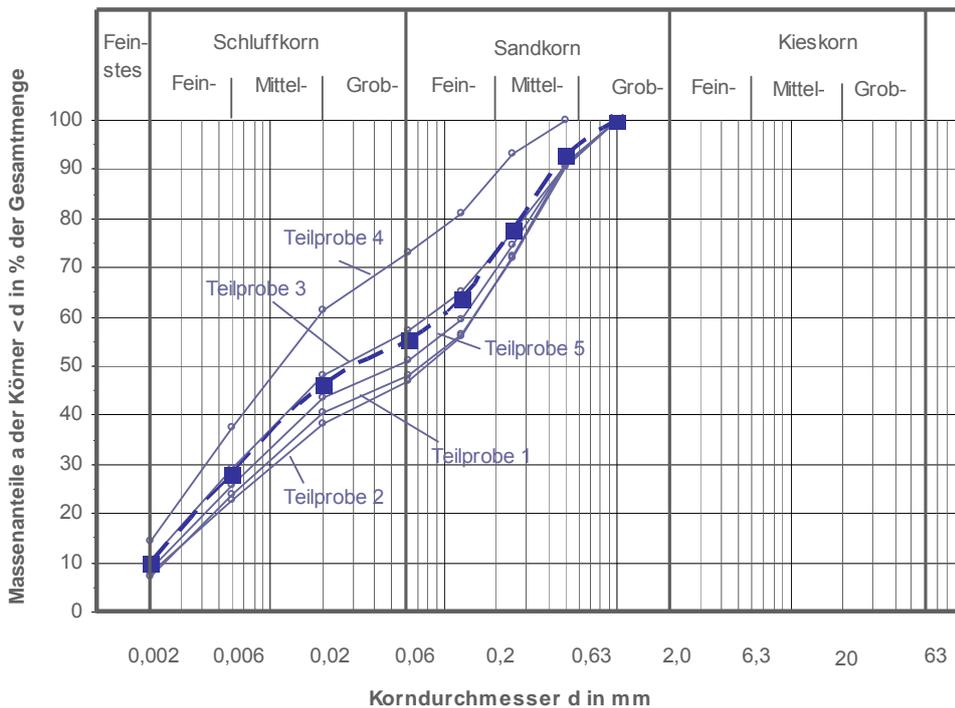


Abb. 11 Darstellung der mit dem Laserpartikelanalysator ermittelten Korngrößenverteilungen eines Grubenlehmes

Darstellung des arithmetischen Mittels aus fünf Teilprobenmessungen zur Reduzierung der Messungenauigkeiten:

3.1.3 Analyse des Mineralbestands

Identifizierung der Tonminerale

Auf dem Gebiet der Mineralanalyse hat sich inzwischen eine erhebliche Vielfalt von Untersuchungsmethoden entwickelt. Hierzu zählen beispielsweise die Lichtmikroskopie, die Thermoanalyse, die Infrarot-Spektroskopie sowie die Rasterelektronenmikroskopie.

Für die Analyse sehr feinkörniger Minerale – speziell Tonminerale – wird in geotechnischen Anwendungsbereichen bevorzugt die *Röntgendiffraktometrie* angewendet.

Mit einem Röntgendiffraktometer wird das Probenmaterial unter sich stetig änderndem Winkel bestrahlt. Die Probe wird dazu mit gleich bleibender Geschwindigkeit im Strahlenbündel (Röntgenstrahl) gedreht. Trifft der Röntgenstrahl auf Kristallflächen kommt es zu einer Beugung des Röntgenstrahls.

Die abgeleitete Röntgenstrahlung wird auf einen Detektor geleitet, elektronisch verstärkt und dokumentiert. Anhand der empfangenen Röntgenstrahlung können dann Rückschlüsse auf die detektierten Tonminerale gezogen werden.

Für die Messung wird das Probenmaterial auf drei unterschiedliche Arten vorbereitet und anschließend geröntgt. Die Analyse erfolgt durch den Vergleich der drei Röntgendiagramme. Die einzelnen Tonminerale können anhand der Veränderungen ihrer Positionen und ihrer Geometrie infolge der entsprechenden Behandlung identifiziert werden.

Die unterschiedlichen Vorbereitungsmethoden sind im Einzelnen:

- 1) Probe wird luftgetrocknet
- 2) Probe wird mit Ethylenglykol bedampft
- 3) Probe wird auf 550°C erhitzt

In der nachstehenden Abbildung sind beispielhaft verschiedene Röntgendiffraktogramme verschiedener Tonminerale in Abhängigkeit der Vorbereitungsmethode dargestellt.

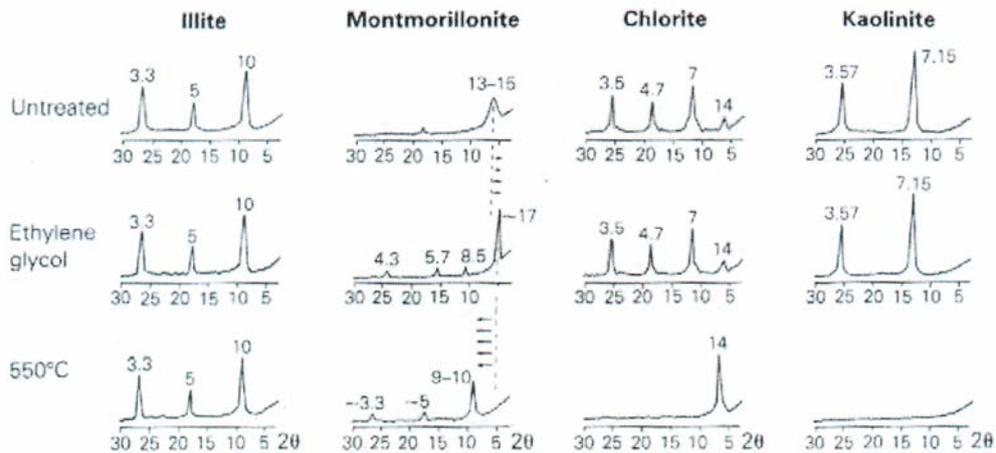


Abb. 12 Typische Röntgendiffraktogramme von Tonmineralen

[Lindholm – 1987]

- 1 - luftgetrocknet (untreated)
- 2 - mit Ethylenglykol bedampft
- 3 - auf 550 °C erhitzt

Die Diagramme der luftgetrockneten Proben geben einen Überblick über den Tonmineralbestand und die Kristallinität der einzelnen Phasen.

Nach einer Behandlung mit Ethylenglykol verändern sich vor allem die Smektite, die sich dadurch aufweiten und deren Kristallgitter höhere Basisabstände aufweisen.

Das Kristallgitter des Kaolinit zerfällt beim Erhitzen, die Kaolinit - Peaks verschwinden im entsprechenden Diagramm.

Der Hauptpeak des Chlorits wird nach dem Erhitzen intensiver. Illite bleiben nahezu unbeeinflusst von den Behandlungen. [Bussert – 2004]

Weitere vertiefende Betrachtungen zur röntgenographischen Tonmineralbestimmung können z.B. [Heim – 1990; Abs. 8.3.2.2] entnommen werden.



Abb. 13 Anfertigung der Schmierprobe



Abb. 14 Bedampfung mit Ethylenglykol

Quantifizierende Untersuchung der Tonminerale

Für die halbquantitative Bestimmung der Tonmineralanteile in einem Gemisch wird die Intensität der Basisreflexe 1. Ordnung genutzt. Hierzu werden im Diffraktogramm die Peakflächen bestimmt. Da die relativen Reflexintensitäten der verschiedenen Minerale unterschiedlich sind, müssen diese mit Korrekturfaktoren belegt werden. Die Summe der korrigierten integralen Intensitäten wird gleich 100 gesetzt und die Einzelmineralanteile darauf bezogen. [Jasmund/Lagaly – 1993]

Bestimmung des Gesamtmineralbestands

Im Gegensatz zur Identifizierung der Tonminerale ist bei der Analyse des Gesamtmineralbestands die Ausrichtung der einzelnen Tonplättchen nicht mehr erforderlich. Die Analyse der Minerale wird an so genannten Pulverpräparaten durchgeführt.

Dazu werden die Lehmproben mit einem Achatmörser gemahlen und anschließend in einen Probenhalter eingefüllt und verpresst. Danach können verschiedene Probenhalter in Form von Sammelproben röntgenographisch analysiert werden. (siehe Abb. 17)



Abb. 15 Röntgendiffraktometer



Abb. 16 Pulverpräparat in Probenhalter



Abb. 17 Einfüllen von Sammelproben in das Röntgendiffraktometer

3.2 Die Grubenlehme – Gewinnung und charakteristische Merkmale

Ziel des Analyseprogramms ist es, verschiedene Grubenlehme zu verwenden, die sich möglichst in ihrer Zusammensetzung voneinander unterscheiden.

Damit soll im Untersuchungsprogramm eine große Varianz der Ausgangsstoffe erreicht werden, die Rückschlüsse auf den Einfluss einzelner Materialparameter auf den Stampflehm zulassen.

Es wurden Proben von Grubenlehmen aus unterschiedlichen Lagerstätten der Region Berlin/Brandenburg entnommen und durch Voruntersuchungen geprüft.



Abb. 18 Naturlehme aus Lehmvorkommen für Ziegeleien



Abb. 19 Naturlehme aus dem Abraam von Kiesgruben

Dazu wurde das Probenmaterial, das aus Lehmgruben verschiedener Ziegeleien sowie aus Kiesgruben entnommen wurde, vor Ort optisch und haptisch auf folgende Parameter untersucht:

- Vorhandensein organischer Bestandteile
- Mineralgerüst, Größtkorn
- Farbe
- Bindigkeit.

Im Hinblick auf die angestrebte spätere baupraktische Verwendung der Grubenlehme - als Ausgangsstoffe für Stampflehmgemische - konnten Naturlehme mit viel Humusanteilen bzw. organischen Bestandteilen nicht verwendet werden.

Aus den Voruntersuchungen, die an einer Vielzahl von Lehmgruben durchgeführt wurden, stellten sich fünf verschiedene Grubenlehme zunächst als geeignet für die weiteren Untersuchungen heraus.

In den weiteren Ausführungen werden diese Grubenlehme zukünftig mit den Bezeichnungen GL-1 bis GL-5 definiert und angesprochen.

In der nachstehenden Tabelle sind die Ergebnisse der Voruntersuchungen, die eine erste charakteristische Einschätzung darstellen, für die unterschiedlichen Grubenlehme aufgeführt:

Grubenlehm	Organische Bestandteile	Farbe	Einschätzung Mineralgerüst	Größtkorn	Einschätzung Bindigkeit
GL-1	nicht festgestellt	gelbbraun	schluffsandig	ca. 2 mm	hoch
GL-2	nicht festgestellt	gelbbraun	feinsandig	ca. 5 mm	gering
GL-3	nicht festgestellt	braun	feinsandig	ca. 2 mm	gering
GL-4	nicht festgestellt	rotbraun	feinsandig	ca. 5 mm	mittel
GL-5	nicht festgestellt	grau	tonig-schluffsandig	ca. 2 mm	hoch

Tab. 3 Übersicht der Grubenlehme und deren charakteristische Einschätzung

3.3 Analyse von ausgewählten Grubenlehmen unter Anwendung der beschriebenen geotechnischen Messverfahren

In dem Abschnitt 3.1 wurden verschiedene Prüfverfahren beschrieben, die zunächst für die Analyse von Grubenlehmen geeignet erscheinen.

Die Auswahl der Prüfverfahren erfolgte einerseits durch Empfehlungen, die der Fachliteratur für den Lehmabbau entnommen wurden. Andererseits wurden in der Geotechnik anerkannte Messverfahren gewählt, die zum Teil bereits Bestandteil des Regelwerks der Deutschen Industrie Normen sind.

Mit den gewählten Verfahren werden die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Grubenlehme (GL-1 bis GL-5) analysiert und bewertet. Dazu wurden die Grubenlehme zunächst homogenisiert, um für die anschließende Durchführung der Untersuchungen möglichst gleich bleibende Materialeigenschaften bzw. –zusammensetzungen zu gewährleisten.

Im Zuge dieser Untersuchungen werden ebenfalls die Prüfverfahren des Untersuchungsprogramms kritisch hinterfragt und auf ihre grundsätzliche Eignung und Praktikabilität für die Analyse von Grubenlehmen untersucht.

Dazu werden die fünf Probelehme (GL-1 bis GL-5) mit sämtlichen Prüfverfahren analysiert.

Durch die unterschiedliche Zusammensetzung der Probelehme und den Vergleich unterschiedlicher Messmethoden an einem Probenmaterial werden möglichst aussagekräftige Ergebnisse angestrebt.

Die Zielstellung ist, die Vor- und Nachteile einzelner Prüfverfahren darzustellen und darauf aufbauend eine Untersuchungsstrategie zur Analyse von Grubenlehmen zu entwickeln.

Der Fokus wird dabei auf die Analyse der Korngrößenzusammensetzung von Grubenlehmen im Feinkornbereich gesetzt, da die Siebkornanalyse nach DIN 18123 im Grobkornbereich bereits ein effizientes, anerkanntes und äußerst praktikables Verfahren darstellt.

3.3.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung im Grobkornbereich

Wie eingangs erwähnt wird die Korngrößenanalyse im Grobkornbereich der Grubenlehme mit der Siebanalyse nach DIN 18123 durchgeführt. Dazu wird für die Prüfung zunächst das Feinkorn im Nass-Siebverfahren abgetrennt. Anschließend wird die Korngrößenverteilung der Korngrößen mit einem Durchmesser $> 0,063$ mm im Trockensiebverfahren bestimmt.

Die für die unterschiedlichen Grubenlehme (GL-1 bis GL-5) ermittelten Siebdurchgänge in Masse - % werden in der nachstehenden Tabelle dargestellt.

Siebdurchgang in [Masse - %]

Korngröße in [mm]	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Grubenlehm GL-1	95	97	99	99	100	100	100	100	100
Grubenlehm GL-2	28	38	56	85	94	97	98	100	100
Grubenlehm GL-3	43	55	75	90	96	98	100	100	100
Grubenlehm GL-4	33	46	68	88	94	96	98	100	100
Grubenlehm GL-5	71	80	88	95	98	99	100	100	100

Tab. 4 Siebdurchgänge der Grubenlehme für Korngrößen über 0,063 mm

Eine grafische Darstellung der ermittelten Korngrößenverteilungen gemäß den Vorgaben der DIN 18123 kann der Abb. 20 entnommen werden.

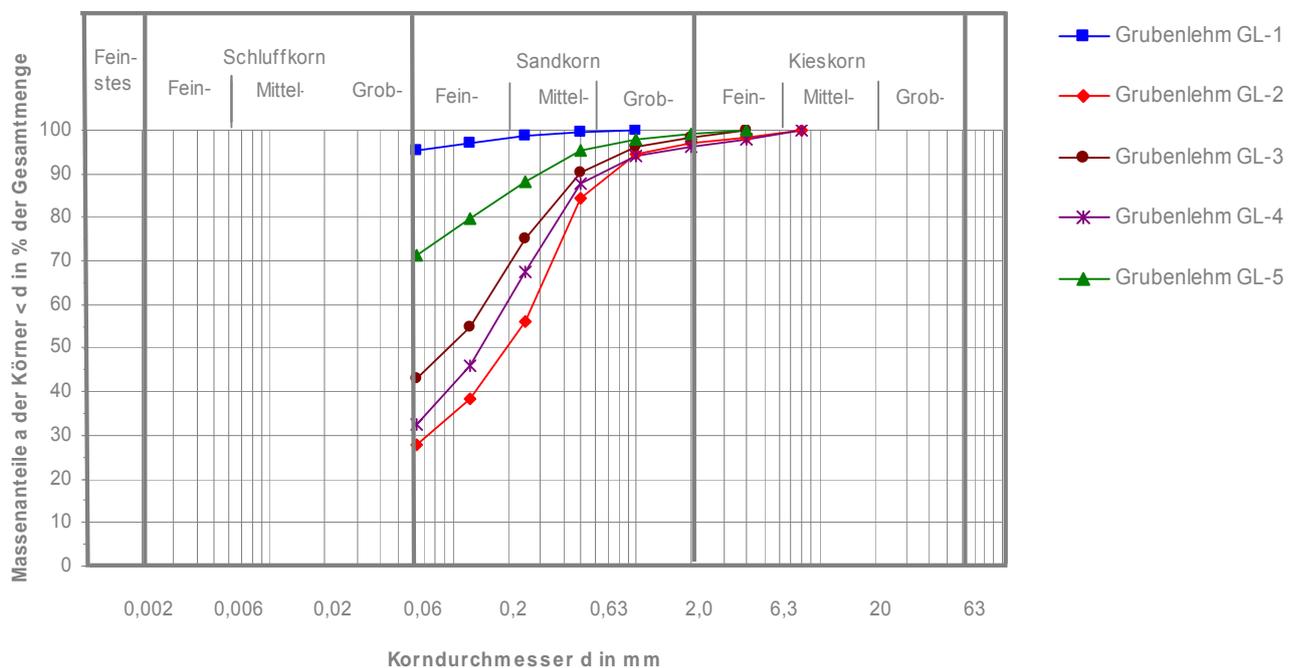


Abb. 20 Darstellung der Korngrößenverteilung der Grubenlehme gemäß DIN 18123

Dabei wird ersichtlich, dass sich die Grubenlehme bereits signifikant im Hinblick auf den vorhandenen Grobkornanteil unterscheiden.

Der Grubenlehm GL-1 hat einen Siebdurchgang bei einem Korndurchmesser von 0,063 mm von 95 Masse - %. Damit setzt sich dieser Naturlehm zu 95 % aus Bestandteilen mit einem Korndurchmesser kleiner 0,063 mm zusammen, und stellt damit ein fast vollständiges Tonmineral - Schluffgemisch dar.

Der Grubenlehm GL-2 hat bei einem Korndurchmesser von 0,063 mm einen Siebdurchgang von kleiner als 30 Masse - %. Dieser Naturlehm besteht zu mehr als 70 % aus Bestandteilen mit einem Korndurchmesser größer 0,063 mm.

Im Gegensatz zum Grubenlehm GL-1 weist der Grubenlehm GL-2 damit bereits zu einem nennenswerten Massenanteil aus dem Kornbereich auf, der den Zuschlagstoffen im Stampflehmbau zugeordnet werden.

Die übrigen Grubenlehme GL-3, GL-4 und GL-5 ordnen sich hinsichtlich der Korngrößenverteilung im Zwischenbereich ein.

3.3.2 Bestimmung der Korngrößenverteilung im Feinkornbereich

Die Zusammensetzung der Korngrößen mit einem Durchmesser kleiner 0,063 mm der Versuchslehme wird mit den in Abschnitt 3.1.2.2 vorgestellten Sedimentationsmethoden *Aräometer-Methode*, *Atterberg-Methode* und *Zentrifugen-Methode* sowie der in Abschnitt 3.1.2.3 beschriebenen *Laserdiffraktometrie* bestimmt.

Die Auswertung der ermittelten Korngrößenverteilungen erfolgt für die untersuchten Grubenlehme getrennt nach dem verwendeten Messverfahren.

3.3.2.1 Ergebnisse der Aräometer-Methode

Mit der Aräometer-Methode wurden für die untersuchten Naturlehme die Korngrößenverteilung in dem Bereich kleiner 0,063 mm bestimmt.

Für die quantifizierende Bestimmung der Körnungen mit einem Durchmesser ab $d = 0,063$ mm wurde wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, das Trockensiebverfahren gemäß DIN 18123 angewendet.

Die Ergebnisse der Messung ergaben für die Grubenlehme GL-1 bis GL-5 die in der nachstehenden Tabelle aufgeführten Kornzusammensetzungen:

Massenanteile a der Körner $< d$ in % der Gesamtmenge

[Korngröße [mm]]	Feinstes	Schluff			Sand				Kies			
	0,002	0,006	0,020	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Grubenlehm GL-1	18	32	68									
Grubenlehm GL-2	15	18	23									
Grubenlehm GL-3	19	26	34									
Grubenlehm GL-4	16	20	26									
Grubenlehm GL-5	18	48	63									

Tab. 5 Aräometer-Methode - Korngrößenverteilung im Feinkornbereich

Eine grafische Darstellung der Kornverteilungslinien kann der Abb. 21 entnommen werden.

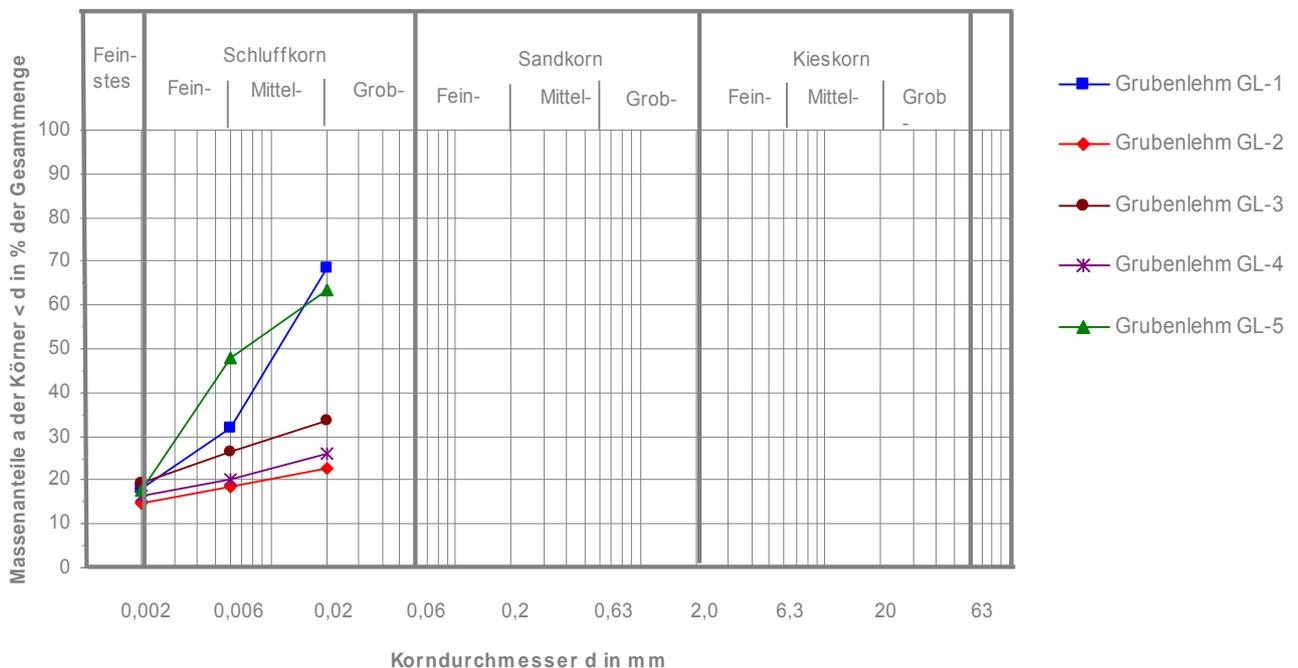


Abb. 21 Aräometer-Methode – Darstellung der Kornverteilungslinien gemäß DIN 18123

Ausgehend von der Analyse des Grobkornbereichs ließ sich bereits ein großer Schwankungsbereich des Gesamtfeinkornanteils der unterschiedlichen Grubenlehme ableiten. Dies wird durch die vorliegenden Messergebnisse bestätigt.

Bemerkenswert ist jedoch, dass bei einem Korndurchmesser kleiner 0,002 mm nur noch relativ geringe Unterschiede zwischen den Grubenlehmen vorhanden sind. So schwankt der ermittelte Massenanteil a der Körner mit einem Durchmesser $< 0,002$ mm zwischen 15 und 19 Masse-%.

3.3.2.2 Ergebnisse der Atterberg-Methode

Mit der Atterberg-Methode werden wie mit dem Aräometer-Verfahren die Korngrößenverteilungen der Naturlehme mit einem Durchmesser kleiner 0,063 mm bestimmt.

Für die Korngrößenverteilung ab 0,063 mm werden die durch das Trockensiebverfahren gemäß DIN 18123 ermittelten Werte verwendet.

Die Ergebnisse der Messungen ergaben für die Grubenlehme GL-1 bis GL-5 die in der nachstehenden Tabelle aufgeführten Kornzusammensetzungen:

Massenanteile a der Körner $< d$ in % der Gesamtmenge

[Korngröße [mm]]	Feinstes	Schluff			Sand				Kies			
	0,002	0,006	0,020	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Grubenlehm GL-1	16	25	69									
Grubenlehm GL-2	11	15	20									
Grubenlehm GL-3	19	25	34									
Grubenlehm GL-4	14	17	24									
Grubenlehm GL-5	24	43	62									

Tab. 6 Atterberg-Methode - Korngrößenverteilung im Feinkornbereich

Eine Darstellung der Kornverteilungslinien kann der Abb. 22 entnommen werden.

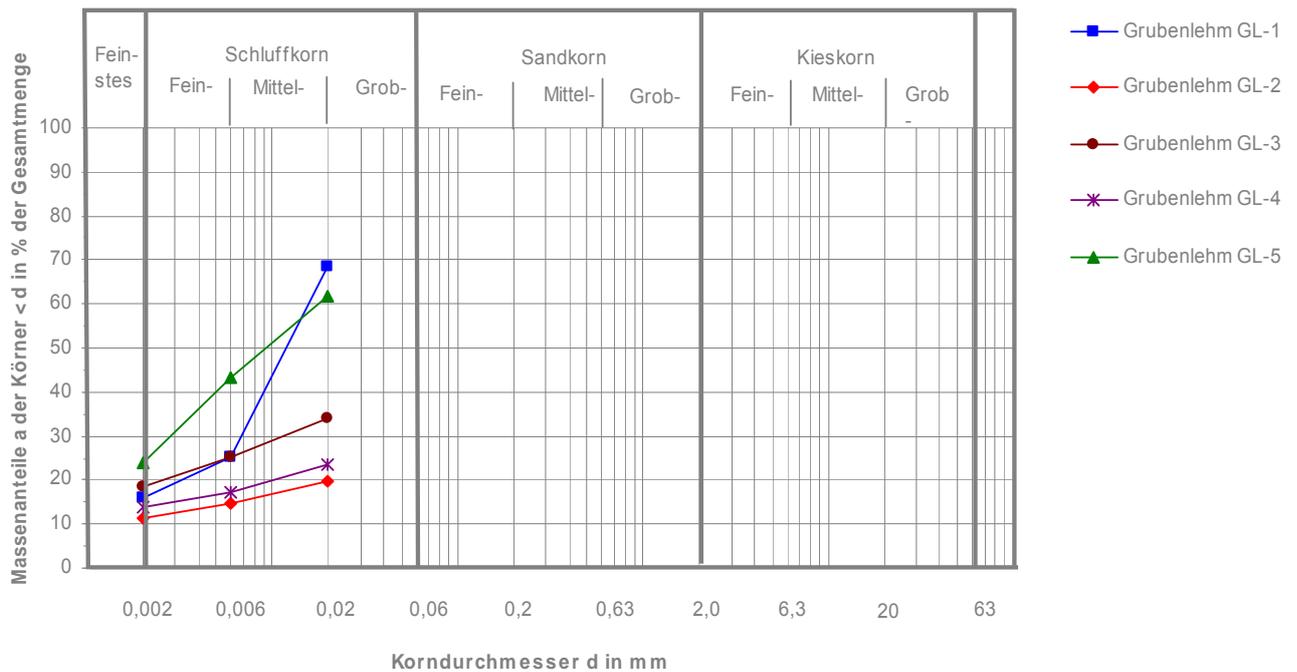


Abb. 22 Atterberg-Methode – Darstellung der Kornverteilungslinien gemäß DIN 18123

Mit dem Atterberg-Verfahren können im Wesentlichen die Ergebnisse der zuvor genannten Aräometer-Methode bestätigt werden. Beide Verfahren zeigen einen annähernd gleichen Verlauf der Kornverteilungslinien im Kornbereich $d < 0,063$ mm auf. Größere Abweichungen zur Aräometer-Methode konnten bei einem Korndurchmesser kleiner 0,002 mm festgestellt werden. Für die untersuchten Grubenlehm wurde ein Massenanteil a der Körner $< 0,002$ mm (zwischen 11 und 24 Masse - %) messtechnisch ermittelt.

3.3.2.3 Ergebnisse der Zentrifugen-Methode

Aufbauend auf der Analyse des Grobkornbereiches - mit dem Siebverfahren nach DIN 18123 - sollten für die verschiedenen Grubenlehme mit der Zentrifugen-Methode die Verteilung der Korngrößen mit einem Durchmesser $d < 0,063$ mm geprüft werden. Die Messergebnisse der zuerst geprüften Versuchslehme GL-2 und GL-3 wiesen sehr große Abweichungen auf, die zu einer Beurteilung ausreichend sind.

Massenanteile a der Körner $< d$ in % der Gesamtmenge

[Korngröße [mm]]	Feinstes	Schluff			Sand				Kies			
	0,002	0,006	0,020	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Grubenlehm GL-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grubenlehm GL-2	5	7	18									
Grubenlehm GL-3	7	9	30									
Grubenlehm GL-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grubenlehm GL-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 7 Zentrifugen-Methode - Korngrößenverteilung im Feinkornbereich

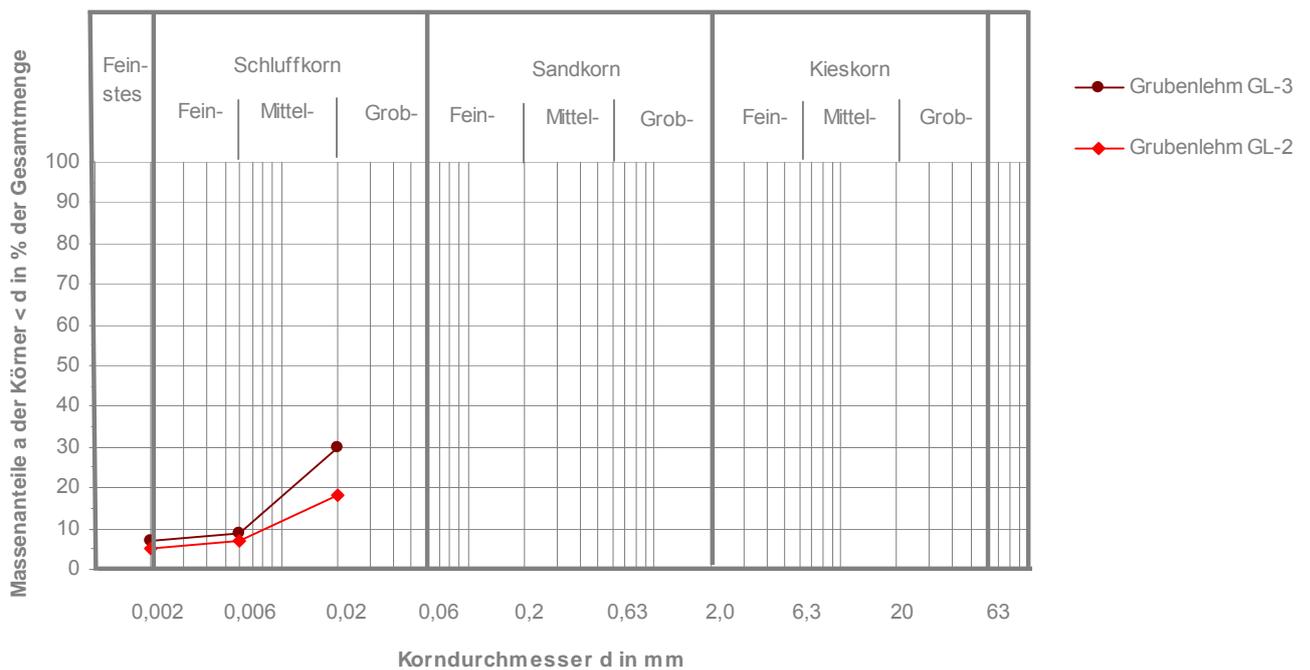


Abb. 23 Zentrifugen-Methode – Darstellung der Kornverteilungslinien gemäß DIN 18123

3.3.2.4 Ergebnisse der Laserdiffraktometrie

Die zuvor beschriebenen Verfahren (Aäometer-, Atterberg- und Zentrifugenverfahren) stellen Sedimentationsverfahren dar. Bei diesen Prüfmethode wurde aufbauend auf die Siebanalyse gemäß DIN 18123 der Korngrößenbereich für Korngrößen $d < 0,063$ mm geprüft.

Das Laserverfahren ist eine Methode für die Ermittlung der Korngrößenverteilung, die auf der Messung des Reflexionsverhaltens eines Laserstrahls, auf Oberflächen verschiedener Größen beruht. Mit dem Laserverfahren kann ein Messbereich von Korngrößen bis zu einem Korngrößendurchmesser $d = 2,0$ mm abgedeckt werden.

Innerhalb der Untersuchungen wird dieser Messbereich für die einzelnen Naturlehme angesetzt, da sich damit Überschneidungen mit den Ergebnissen der Siebanalyse gemäß DIN 18123 ergeben. Dies ermöglicht einen ausschnittweisen Vergleich des Laserverfahrens mit den sicheren Referenzwerten der Siebanalyse.

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Prüfverfahren müssen hier ungesiebte Lehmproben verwendet werden.

Die Messergebnisse für die einzelnen Grubenlehme können der Tab. 8 entnommen werden.

Massenanteile a der Körner $< d$ in % der Gesamtmenge

[Korngröße [mm]]	Feinstes	Schluff			Sand				Kies			
	0,002	0,006	0,020	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Grubenlehm GL-1	10	24	56	87	98	100	100	100	100			
Grubenlehm GL-2	10	28	46	55	64	78	93	100	100			
Grubenlehm GL-3	12	29	53	73	82	93	99	100	100			
Grubenlehm GL-4	7	21	39	50	60	75	91	99	100			
Grubenlehm GL-5	13	34	65	85	93	99	100	100	100			

Tab. 8 Laserdiffraktometrie - Korngrößenverteilung im Feinkornbereich

Die Korngrößenverteilungen der Grubenlehme GL-1 bis GL-5 werden in der Abb. 24 gemäß den Vorgaben nach DIN 18123 dargestellt.

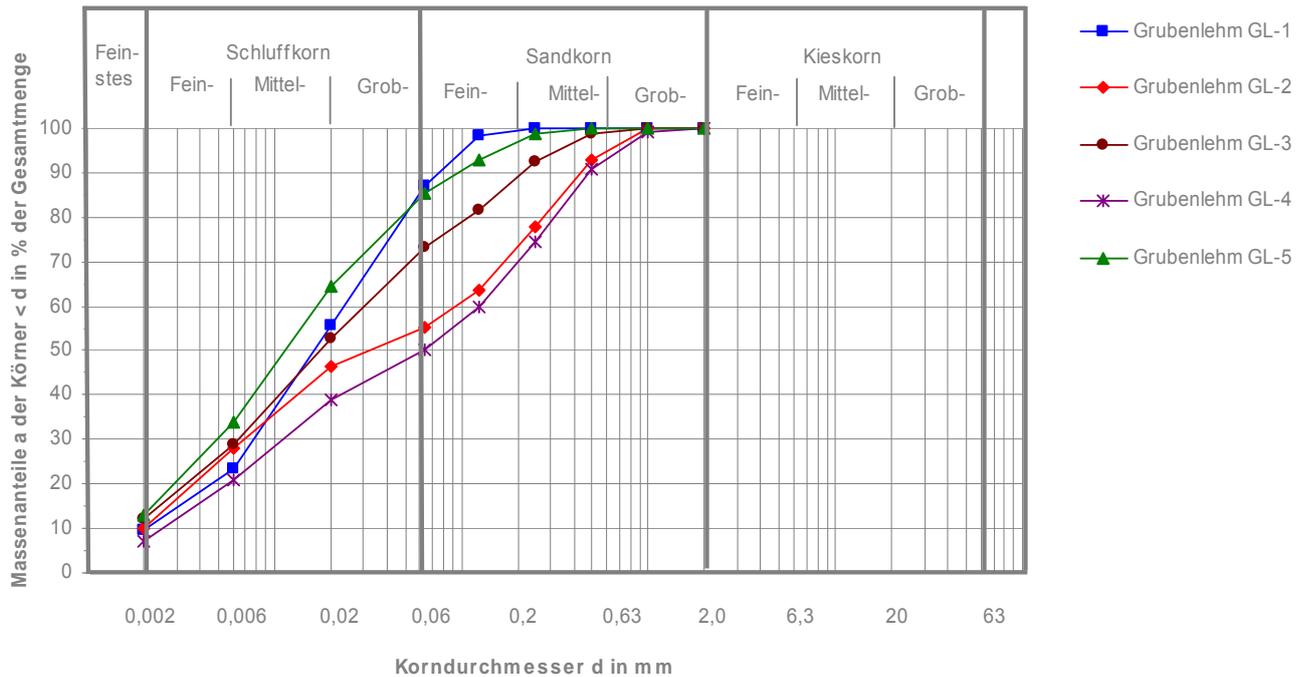


Abb. 24 Laserdiffraktometrie – Darstellung der Kornverteilungslinien gemäß DIN 18123

Im Vergleich zu den Messergebnissen der Sedimentationsverfahren zeigen die ermittelten Kornverteilungslinien einen tendenziell ähnlichen Verlauf auf.

Für den Massenanteil a der Körner $< 0,002$ mm wurde für die verschiedenen Grubenlehme eine Schwankungsbreite von 7 bis 13 Masse-% festgestellt.

Der mit dem Laserverfahren bestimmte Feinkornanteil (Korngrößen kleiner 0,063 mm) der Probelehme umfasste eine Schwankungsbreite von 50 – 87 Masse-%.

Gegenüber den Ergebnissen der Aräometer-Methode und der Atterberg-Methode konnten sichtliche Abweichungen festgestellt werden.

Auch die Messwerte der Korngrößen mit einem Durchmesser $\leq 0,063$ mm wiesen gegenüber den Resultaten der Siebanalyse größere Abweichungen auf. Eine genauere Auswertung der Messverfahren erfolgt im Abschnitt 3.3.3.1.

3.3.3 Vergleich und Bewertung der Prüfverfahren

Aufbauend auf den in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 ermittelten Massenanteilen der einzelnen Korngruppen, können nunmehr für die Versuchslehme die Kornverteilungslinien für einen Korndurchmesser $> 0,002$ mm aufgezeigt werden.

In Abb. 25 sind beispielhaft die Kornverteilungslinien eines Naturlehms (Grubenlehm GL-3) dargestellt, die sich unter Verwendung der verschiedenen Messverfahren ergeben.

Aus der Gegenüberstellung der Kornverteilungslinien wird deutlich, dass die untersuchten Verfahren zu Mess-Ergebnissen führen, die teilweise voneinander stark abweichen.

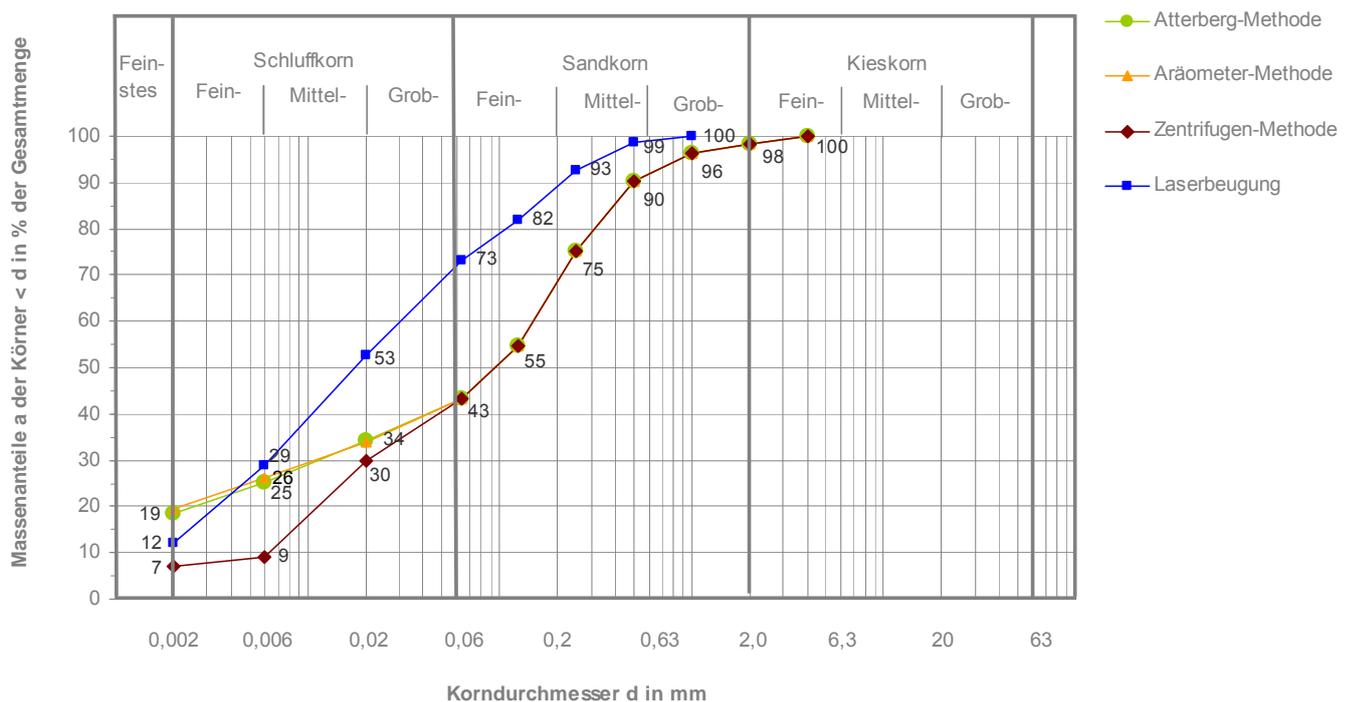


Abb. 25 Kornverteilungslinien eines Grubenlehmes (GL-3) in Abhängigkeit des verwendeten Messverfahrens

Die Aräometer-Methode und die Atterberg-Methode führten im Feinkornbereich (Korngrößen kleiner 0,063 mm) zu Ergebnissen in der gleichen Größenordnung. Die Zentrifugen-Methode lieferte im untersuchten Feinkornbereich deutliche Abweichungen zur Atterberg- und Aräometermethode.

Die Messergebnisse der Laserdiffraktometrie zeigten mit zunehmendem Korndurchmesser große Abweichungen zu den Untersuchungsergebnissen der Atterberg-Methode, der Aräometer-Methode bzw. der Siebanalyse nach DIN 18123 auf und ist deshalb für die praktische Anwendung in der Analyse von Grubenlehm nicht geeignet.

Zur Beurteilung einzelner Verfahren, im Hinblick auf ihre Eignung und Praktikabilität im Lehmabbau, werden in den folgenden Abschnitten eine Gegenüberstellung der Prüfmethode sowie eine Zuordnung des Zeit- und Geräteaufwands vorgenommen.

3.3.3.1 Untersuchungen zur Genauigkeit der Messmethoden für die Ermittlung der Kornzusammensetzung im Feinkornbereich

In verschiedenen Literaturquellen wird das Atterberg-Verfahren als sehr genaues Verfahren beschrieben und für die Gewinnung hoch auflösender Messdaten empfohlen. [Engelhardt/Müller-1964] [Bussert-2004]. Diese Genauigkeit lässt sich durch geringe Substanzverluste oder geringe Schwankungsbreiten der Messwerte bei Folgemessungen belegen.

[Engelhardt/Müller - 1964] haben in Vergleichsmessungen Substanzverluste von nur 1 % bis 3 % festgestellt. Die hohe Genauigkeit des Atterberg-Verfahrens lässt sich vor allem darauf zurückführen, dass der Sedimentationsablauf im Vergleich zu anderen Verfahren wesentlich weniger gestört wird.

Ein Nachteil des Atterberg - Verfahrens liegt allerdings in dem vergleichsweise hohen Zeitaufwand, der für einzelne Messungen benötigt wird.

Atterberg-Methode

Beim Atterberg-Verfahren können Messungenauigkeiten durch Einflussfaktoren wie

- das Haften der Teilchen am Zylindergefäß,
- eine teilweise Neuvermischung durch Sogwirkung beim Öffnen des Quetschhahnes und
- eine falsche Einschätzung der Sedimentation

hervorgerufen werden. Wie eingangs beschrieben können dennoch die Ungenauigkeiten bei professioneller Messdurchführung auf 1 % bis 3 % begrenzt werden.

Die Atterberg-Methode ist eine Analysenmethode, deren Zeitaufwand in großer Abhängigkeit mit dem verwendeten Probenmaterial steht. Für die untersuchten Grubenlehme betrug der Zeitaufwand 4 bis 18 Wochen für die vollständige Trennung und Analyse der Kornfraktionen.

Die verhältnismäßig langen Versuchsdauern resultieren insbesondere aus der Anzahl der für die vollständige Trennung und Gewinnung der Feinstfraktion ($d < 0,002$ mm) benötigten Schlämmungen. Ein Schlämmvorgang im Atterberg-Zylinder benötigt in Abhängigkeit der Raumtemperatur annähernd 17 bis 22 Stunden. Im Rahmen der Versuche waren 10 bis 80 Schlämmungen für die Gewinnung der Feinstkornfraktion von Grubenlehm nötig.

Die Atterberg-Methode stellt ein Sedimentationsverfahren mit einem vergleichsweise geringem Geräteaufwand dar, da der Versuchsaufbau im Wesentlichen aus dem Atterberg-Zylinder, Präzisionswaage, Schüttler, Trocknungsofen, Messzubehör (Thermometer, Stoppuhr, u.a.) besteht.

Hier wird für die Entwicklung einer Untersuchungsstrategie die zeitaufwendige Atterberg-Methode als messtechnisches Referenzverfahren gewählt.

Die Messergebnisse der anderen Verfahren werden den Referenzwerten der Atterberg - Methode gegenübergestellt, und mit den jeweiligen prozentualen Abweichungen belegt.

Anhand der Schwankungsbreiten soll geprüft werden, in wie fern ein hoher Zeitaufwand für die Ermittlung der Korngrößenverteilung notwendig ist, oder durch andere Verfahren - mit geringerem Zeitaufwand – ebenfalls genügend genaue Ergebnisse erzielt werden können.

Dazu werden in den folgenden Abbildungen für die einzelnen Verfahren die prozentualen Abweichungen der Messergebnisse zu den Referenzwerten dargestellt. Die Messwerte des Referenzverfahrens werden durch die Nulllinie symbolisiert.

Die angegebenen Schwankungsbreiten entsprechen dabei den maximalen Abweichungen einer Messmethode unter Berücksichtigung sämtlicher Messreihen für die Grubenlehme GL-1 bis GL-5.

Aräometer-Methode

Die ermittelten Abweichungen des Aräometer-Verfahrens zu denen des Atterberg-Verfahrens sind in Abb. 26 für den jeweiligen Korndurchmesser dargestellt.

Die angegebenen Schwankungsbreiten entsprechen dabei den maximalen Abweichungen sämtlicher Messreihen für die Grubenlehme GL-1 bis GL-5.

Die größten relativen Abweichungen zu den Referenzwerten waren bei einer Korngröße von $d = 0,002$ mm feststellbar und lagen in einer Größenordnung von annähernd 20%. Die absoluten Abweichungen lagen in einer Größenordnung von maximal 6 M - % und im Mittel bei ca. 2 M - %.

Mit zunehmender Korngröße reduzieren sich die Messabweichungen. Die Korngrößen ab 0,063 mm werden in dem Diagramm nicht aufgeführt, da diese mittels Siebverfahren bestimmt wurden.

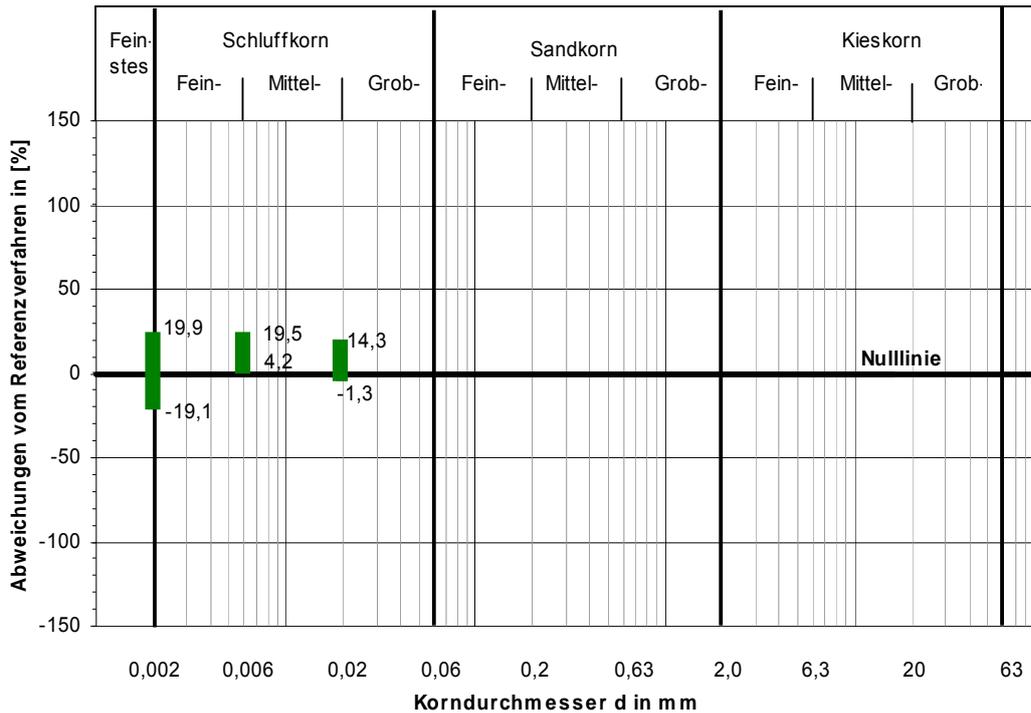


Abb. 26 Maximale Abweichungen der Messergebnisse der Aräometer-Methode zu den Prüferten des Referenzverfahrens in Prozent

Wie beim Atterberg-Verfahren entstehen bei der Aräometer-Methode Messungenauigkeiten, die z.B. durch

- Absetzen der Teilchen auf dem Aräometer
- Haften der Teilchen am Aräometer beim Herausnehmen
- Störung des Sedimentationsablaufes bei Eintauchen und Herausnehmen des Aräometers
- Ungenauigkeiten der Messgeräte
- fehlerhaftes Ablesen der Messwerte

hervorgerufen werden können. Gegenüber dem Atterberg-Verfahren nimmt die Anzahl der Einflussfaktoren auf das Messergebnis zu.

Ein wesentlicher Vorteil der Aräometer-Methode gegenüber der Atterberg-Methode ist die vergleichsweise kurze Versuchsdauer für eine Sedimentationsanalyse. Hier betrug die Versuchsdauer ca. 2 Tage. Dabei waren keine Abhängigkeiten zwischen der Zusammensetzung des Probenmaterials und der Versuchsdauer feststellbar.

Der Geräteaufwand zur Durchführung der Aräometer-Methode ist wie beim Atterberg-Verfahren als vergleichsweise gering einzuschätzen. Die Prüfapparatur besteht aus: Aräometer, Messzylinder, Präzisionswaage, Rührgerät, Trocknungsofen, Messzubehör nach DIN 18123.

Zentrifugen-Methode

Die ermittelten Abweichungen der Zentrifugen-Methode zum Atterberg-Verfahren sind in Abb. 27 für den jeweiligen Korndurchmesser dargestellt.

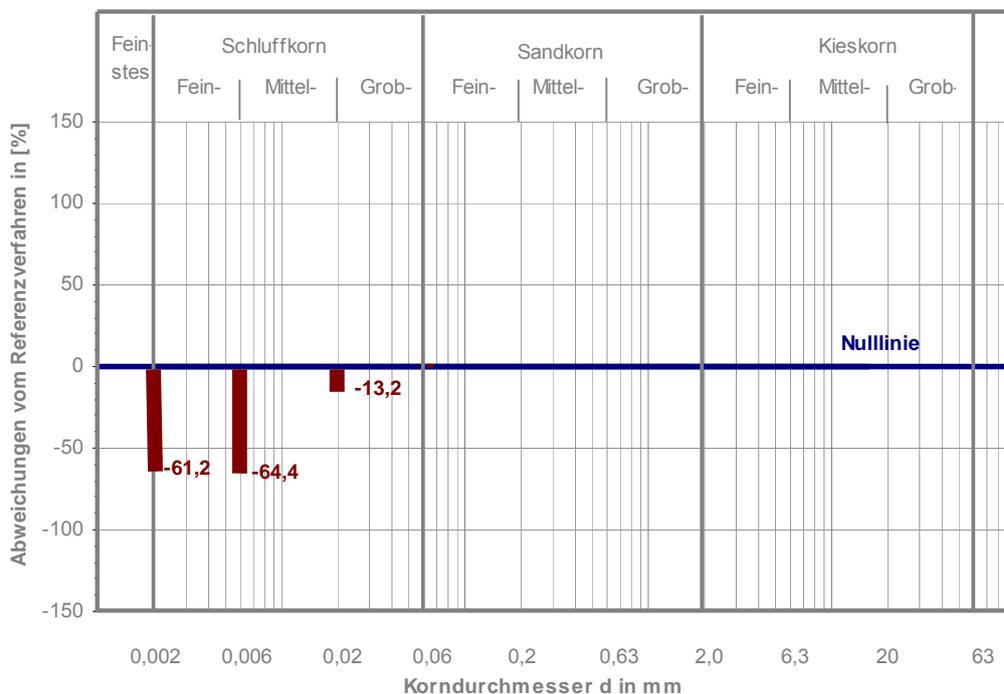


Abb. 27 Maximale Abweichungen der Messergebnisse der Zentrifugen-Methode zu den Prüfwerten des Referenzverfahrens in Prozent

Die angegebenen Schwankungsbreiten entsprechen dabei den maximalen Abweichungen der Messreihen für die Grubenlehme GL-2 und GL-3.

Die größten Abweichungen zu den Referenzwerten sind bei einer Korngröße von $d = 0,002$ mm und $d = 0,006$ mm feststellbar. Die Versuchsergebnisse weichen dabei um mehr als 60% von den Referenzwerten ab.

Mit zunehmender Korngröße reduzieren sich die Messabweichungen. Die Korngrößen ab 0,063 mm werden in dem Diagramm nicht aufgeführt, da diese mittels Siebverfahren bestimmt wurden.

Im Gegensatz zur Aräometer-Methode sind große Abweichungen von den Referenzwerten zu verzeichnen.

Messungenauigkeit der Zentrifugen-Methode können z.B. durch folgende Einflussfaktoren hervorgerufen werden:

- Am Zentrifugen-Gefäß gibt es keine Öffnung zum Ablassen der Suspension. Die Flüssigkeit über den sedimentierten Bestandteilen kann nur durch ein Kippen des gesamten Zentrifugengefäßes abgelassen werden. Dadurch kommt es zu einer zwangsweisen Neuvermischung der bereits sedimentierten Körner mit der darüber liegenden Flüssigkeit.

- Aufgrund der Abmessungen des Zentrifugengefäßes sind nur kurze Fallstrecken vorhanden, die zu einer Sogwirkung größerer Teilchen und damit zum vorzeitigen Absetzen kleinerer Partikel führen.

Es war eine Versuchsdauer von ca. 2-3 Tagen für die Trennung und Analyse der Feinkornfraktionen der Prüflehme mittels Zentrifugen-Methode feststellbar.

Der Geräteaufwand ist insbesondere durch den Kostenaufwand für die Zentrifuge als vergleichsweise hoch einzuschätzen. Für die Durchführung der Zentrifugen-Methode werden folgende Geräte benötigt: Zentrifuge, Präzisionswaage, Schüttler, Trocknungsofen, Messzubehör Thermometer, Stoppuhr, u.a.).

Laserdiffraktometrie

Die ermittelten Abweichungen der Laserdiffraktometrie zum Atterberg-Verfahren können der Abb. 28 in Abhängigkeit des jeweiligen Korndurchmessers entnommen werden.

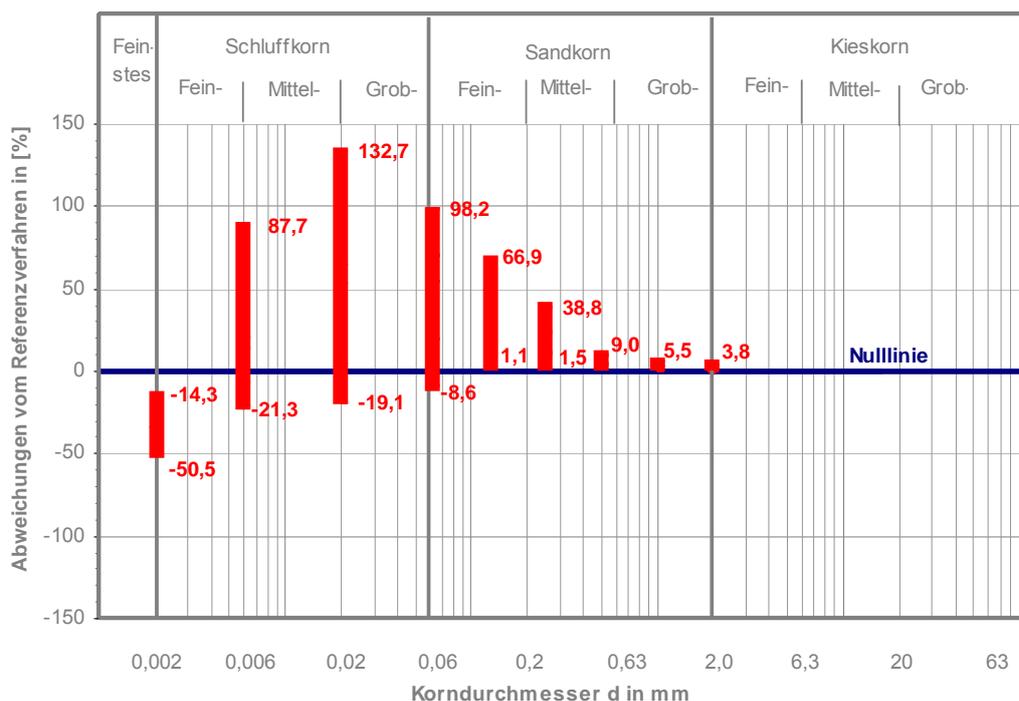


Abb. 28 Maximale Abweichungen der Messergebnisse der Laserdiffraktometrie zu den Prüfwerten des Referenzverfahrens in Prozent

Die angegebenen Schwankungsbreiten entsprechen dabei den maximalen Abweichungen sämtlicher Messreihen für die Grubenlehme GL-1 bis GL-5.

Bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse konnten Messabweichungen gegenüber dem Referenzverfahren von über 130% festgestellt werden. Ein Vergleich der Messwerte mit den Ergebnissen der Siebanalyse nach DIN 18123 ergab für Korngrößen $\geq 0,063$ mm Abweichungen von bis zu 98%.

Damit ist die Schwankungsbreite der Messwerte in einer Größenordnung, die dem Absolutwert des Massenanteils der Kornfraktion entspricht. Sowohl für die Feinkornanalyse als auch für die Grobkornanalyse bis zu einem Korndurchmesser von $d = 2 \text{ mm}$ ist dieses Verfahren nicht geeignet.

Ungenauigkeiten bei der Korngrößenbestimmung können z.B. folgende Parameter verursacht werden:

- aufgrund der uneinheitlichen Partikelmorphologie wird der Laserstrahl verschieden stark gestreut
- die Teilchen strömen vorzugsweise mit der größten Fläche am Laserstrahl vorbei; es wird ein größeres Korn simuliert
- sehr geringe Einwaagen sind möglich (können zu weniger repräsentativen Ergebnissen führen)
-

Die Versuchsdauer betrug ca. 2 Tage für sämtliche Lehmproben. Der Großteil der Versuchszeit wurde für Vorbereitungsmaßnahmen benötigt. Vor der Messung wurden dabei die vorbereiteten Materialproben in verschließbare Röllchen gefüllt und mittels Karussellschüttler für einen Zeitraum von ca. 12 Stunden geschüttelt.

Für die Ermittlung einer Korngrößenverteilung mittels Laserdiffraktometrie ist ein sehr hoher Geräteaufwand nötig, da hierfür ein Laserpartikelanalysator, ein Karussellschüttler, eine pulsierende Spüle, eine Präzisionswaage, Messzubehör, Hardware und Software vorgehalten werden muss.

Vergleichende Auswertung Messverfahren

Die gewählten Prüfverfahren zur Analyse von Grubenlehm im Feinkornbereich unterscheiden sich deutlich in ihrer Messmethodik. Je nach Verfahren konnten Schwankungen der ermittelten Messgenauigkeit, der notwendigen Versuchsdauer und des Geräteaufwandes festgestellt werden.

Im Hinblick auf die gewünschte spätere Praxistauglichkeit der Verfahren, die schnelle Entscheidungen ermöglichen soll, hat sich die Aräometer-Methode als Vorzugsvariante herausgestellt, da mit dieser mit einem geringen Zeit- und Materialaufwand gute Messwerte gewonnen werden können.

Eine detaillierte Darstellung der untersuchten Bewertungsparameter Messungenauigkeit sowie Zeit- und Geräteaufwand kann den nachstehenden Ausführungen entnommen werden.

Messungenauigkeiten

In der Fachliteratur wird das Atterberg-Verfahren als sehr genaues Sedimentationsverfahren mit einer Messgenauigkeit von 1 % bis 3 % beschrieben und wird deshalb innerhalb der Auswertungen als Referenzverfahren gewählt.

Im Vergleich zum gewählten Referenzverfahren, der Atterberg-Methode, konnten mit dem Zentrifugen- und Laserverfahren Mess-Abweichungen festgestellt werden, die im Bereich des absoluten Messwertes lagen.

Diese Verfahren werden deshalb für die Bestimmung der Korngrößenverteilung von Grubenlehm als ungeeignet angesehen.

Die Aräometer-Methode stellt ein normatives Messverfahren dar. Es konnte eine maximale Abweichung gegenüber dem Referenzverfahren von annähernd 20 % festgestellt werden.

Zeitaufwand

Der für die Messmethoden benötigte Gesamtzeitbedarf wurde unter Berücksichtigung der einzelnen Phasen *Vorbereitung*, *Versuchsdurchführung* und *Auswertung* ermittelt und wird im Folgenden unter dem Begriff Versuchsdauer geführt.

Die für die unterschiedlichen Verfahren ermittelten notwendigen Versuchsdauern sind in der Abb. 29 dargestellt. Der angegebene Zeitraum entspricht den im Rahmen des Messprogramms für die jeweilige Untersuchung erforderlichen Versuchsdauern.

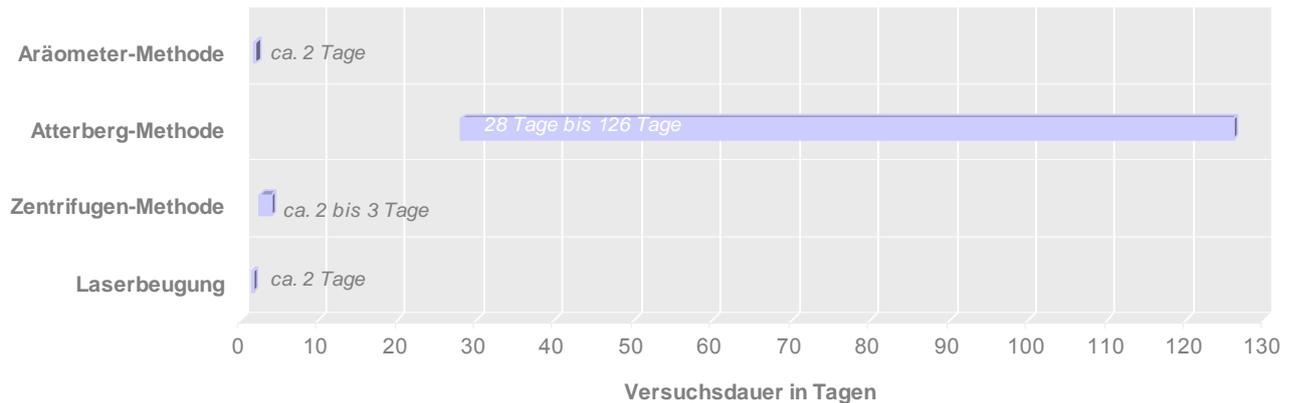


Abb. 29 Dauer für die Ermittlung der Korngrößenverteilung für das jeweilige Prüfverfahren

Die ermittelten Schwankungsbreiten in der Versuchsdauer für die Atterberg- und die Zentrifugen-Methode sind dabei hauptsächlich auf die unterschiedlichen Zusammensetzungen der untersuchten Grubenlehme zurückzuführen.

Geräteaufwand

Der Geräteaufwand wird anhand der für die Durchführung der Verfahren benötigten Messtechnik abgeschätzt. Eine Übersicht über die verwendeten Geräte und Materialien wird in Tab. 9 dargestellt.

	Messgeräte	Geräteaufwand
Atterberg-Methode	Atterberg-Zylinder, Präzisionswaage, Schüttler, Trocknungsofen, Messzubehör (Thermometer, Stoppuhr, u.a.)	gering
Aräometer-Methode	Aräometer, Messzylinder, Präzisionswaage, Rührgerät, Trocknungsofen, Messzubehör nach DIN 18123	gering
Zentrifugen-Methode	Zentrifuge, Präzisionswaage, Schüttler, Trocknungsofen, Messzubehör (Thermometer, Stoppuhr, u.a.)	hoch
Laserbeugung	Laserpartikelanalysator, Karussellschüttler, pulsierende Spüle, Präzisionswaage, Messzubehör, Hardware, Software	sehr hoch

Tab. 9 Übersicht über die verwendeten Geräte und Materialien

Wie aus Tab. 9 ersichtlich, können die *Aräometer-Methode* und die *Atterberg-Methode* ohne aufwendige Messtechnik durchgeführt werden. Die *Zentrifugen-Methode* und die *Laserbeugung* haben durch die Verwendung spezieller, kostenintensiver Labortechnik einen hohen Geräteaufwand. Eine Anwendung dieser Verfahren ist in der Regel nur in spezialisierten Instituten möglich.

3.3.4 Bestimmung des Mineralbestands

Mit den bisherigen Prüfverfahren wurde die Korngrößenverteilung von Grubenlehm bestimmt. Es konnten jedoch keine Aussagen über die Art und die Zusammensetzung der Minerale gewonnen werden. Spezielles Interesse gilt dabei der Ermittlung des Bindemittelgehaltes in den Grubenlehm – den Tonmineralen.

In der Fachliteratur zum Lehmabau wird der Korngrößenanteil mit einem Durchmesser kleiner 0,002 mm häufig als Ton bezeichnet. Dieser Begriff hat seinen Ursprung in der DIN 4022 Teil 1: *Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels* aus dem Jahr 1969. Diese Definition impliziert, dass der gesamte Anteil der Kornfraktion kleiner 0,002 mm den Bindemittelgehalt des Lehmgemisches darstellt, der für die bautechnisch wirksame Bindekraft des Lehms verantwortlich ist.

Bereits [Jasmund/Lagaly – 1993] haben veröffentlicht, dass Tonminerale zwar überwiegend kleiner als 0,002 mm sind, es jedoch auch Tonminerale mit Teilchenfeinheiten über 0,002 mm gibt. (siehe Abb. 30)

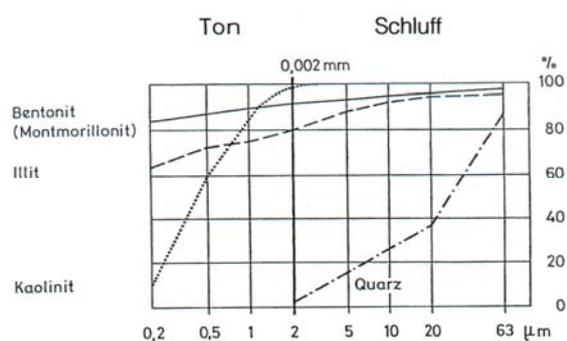


Abb. 30 Korngrößen von Tonmineralen [Jasmund/Lagaly – 1993]

Ferner können auch im Lehm Partikel mit einem Durchmesser kleiner 0,002 mm enthalten sein, auf welche die Eigenschaften, die den Tonmineralen zugeschrieben werden, nur bedingt zutreffen. [Huber et al – 1997] Diese feinsten Bestandteile haben keinen Einfluss auf die bautechnisch wirksame Bindekraft des Lehms.

Das bedeutet, dass Tonminerale nicht allein über die Korngröße definiert werden können und die bisher angesetzte Grenze von 0,002 mm allenfalls eine Annäherung an den tatsächlichen Bindemittelgehalt darstellt.

Da der Bindemittelgehalt jedoch maßgeblich die Materialeigenschaften des Lehmabbaustoffes Stampflehm, zu den z.B. das Schwindverhalten und die Druckfestigkeit gehören, beeinflusst, sind weitergehende Untersuchungen notwendig.

Um den Einfluss der Tonminerale auf den Baustoff Stampflehm quantifizieren zu können, erfolgt deshalb eine detaillierte Identifizierung und Quantifizierung der Tonminerale.

Dabei sollen im Einzelnen:

- die Art und Menge der in den Grubenlehmen GL-1 bis GL-5 enthaltenen Tonminerale
- die Größe der Tonminerale bzw. die Verteilung der Tonminerale in den Feinkornfraktionen sowie
- der Gesamtmineralbestand der Grubenlehme GL-1 bis GL-5

untersucht werden.

3.3.4.1 Identifizierung der Tonminerale

Zur Bestimmung von Art und Menge der im Grubenlehm enthaltenen Tonminerale wird die Methode der Röntgendiffraktometrie verwendet. Dieses Verfahren stellt ein in der Geologiewissenschaft übliches Verfahren für die Identifizierung feiner und feinsten Bestandteile im Boden dar.

Ziel der Untersuchungen ist die Identifizierung und Quantifizierung der Tonminerale sowie eine Einordnung in die Kornfraktionen gemäß DIN 18123.

Feinstes	$d < 0,002 \text{ mm}$
Fein-Schluffkorn	$0,002 - 0,006 \text{ mm}$
Mittel-Schluffkorn	$0,006 - 0,02 \text{ mm}$
Grob-Schluffkorn	$0,02 - 0,063 \text{ mm}$

Tab. 10 Zuordnung Kornfraktionen – Korngrößen gemäß DIN 18123

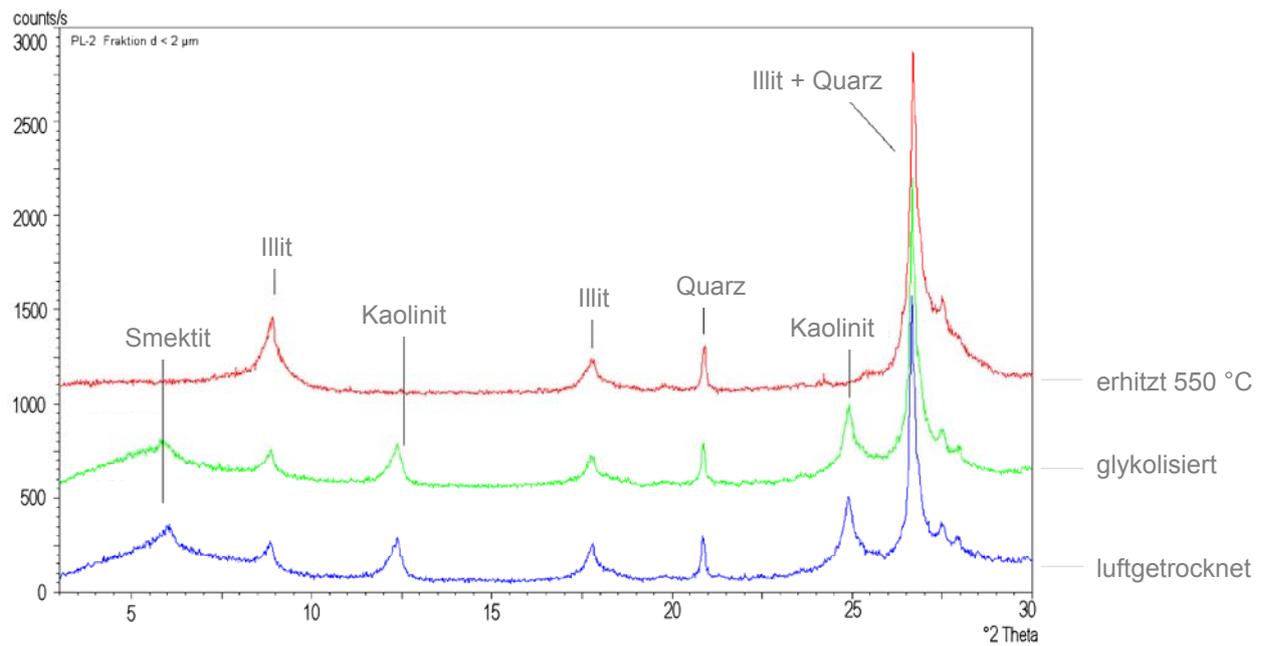
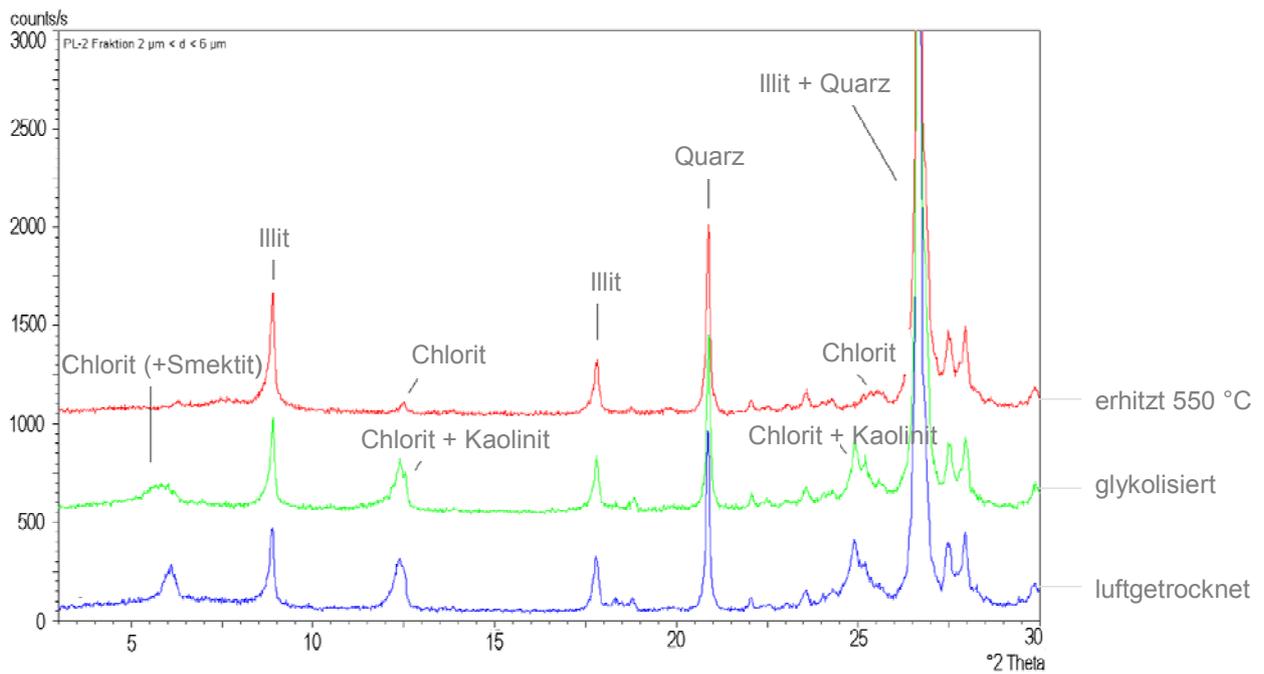
Dazu werden im Vorfeld der Röntgenuntersuchungen die Naturlehme zunächst mittels Siebung und Sedimentation in Korngruppen fraktioniert.

Durch Nass - Siebung können in einem ersten Schritt die Grob- von den Feinkornanteilen abgetrennt werden. Die Bestandteile mit einem Durchmesser kleiner $0,063 \text{ mm}$ werden mittels Atterberg - Methode in die einzelnen Kornfraktionen unterteilt.

Von dem so gewonnenen Probenmaterial werden anschließend Schmierproben angefertigt und im Röntgendiffraktometer untersucht.

In den nachstehenden Grafiken (Abb. 31 bis Abb. 34) sind exemplarisch die Röntgendiagramme für verschiedene Kornfraktionen des Naturlehms GL-2 dargestellt.

In den Tab. 11 bis Tab. 15 erfolgt für sämtliche Grubenlehme eine Darstellung des ermittelten Mineralbestands im Feinkornbereich, der nach der Mineralart und der zugehörigen Kornfraktion aufgeschlüsselt wird.

Abb. 31 Grubenlehm GL-2 Fraktion $d < 0,002 \text{ mm}$ Abb. 32 Grubenlehm GL-2 Fraktion $0,002 \text{ mm} < d < 0,006 \text{ mm}$

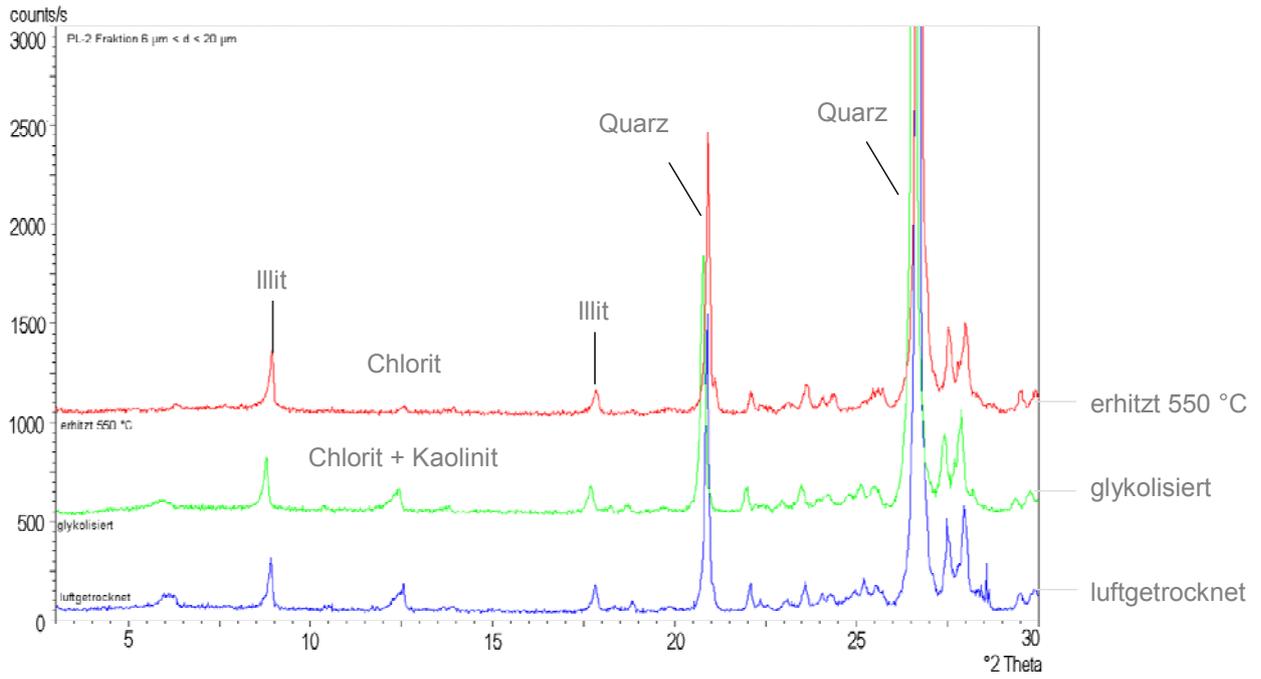


Abb. 33 Grubenlehm GL-2 Fraktion 0,006 mm < d < 0,02 mm

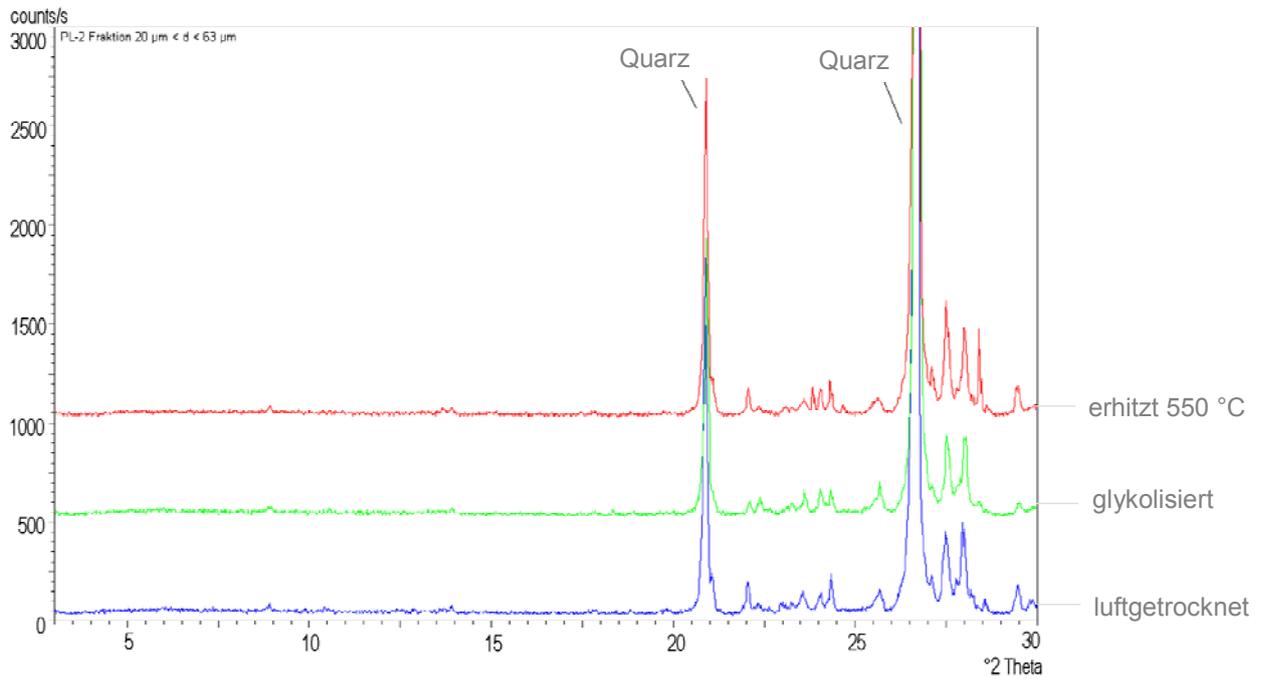


Abb. 34 Grubenlehm GL-2 Fraktion 0,06 mm < d < 0,063 mm

Anteil der Minerale in [Masse-%] je Kornfraktion

		< 0,002 mm	0,002 bis 0,006 mm	0,006 bis 0,02 mm	0,02 bis 0,063 mm
Mineralische Bestandteile	Kalzit	22	16	12	2
ohne bautechnisch	Quarz	47	37	44	38
wirksame Bindekraft	Muskovit	0	12	10	18
	Dolomit	5	9	12	7
	Albit	0	3	3	4
	Mikroclin	0	11	12	29
	Summe	74	87	93	98
Tonminerale	Chlorit	0	0	0	0
	Illit	7	0	0	0
	Montmorillonit	11	7	3	0
	Kaolinit	8	6	3	2
	Summe	26	13	7	2

Tab. 11 Mineralbestand GL-1 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion

Anteil der Minerale in [Masse-%] je Kornfraktion

		< 0,002 mm	0,002 bis 0,006 mm	0,006 bis 0,02 mm	0,02 bis 0,063 mm
Mineralische Bestandteile	Kalzit	0	0	0	0
ohne bautechnisch	Quarz	32	56	32	54
wirksame Bindekraft	Muskovit	0	13	29	5
	Dolomit	0	0	0	0
	Albit	5	5	5	7
	Mikroclin	18	18	26	34
	Summe	56	92	92	100
Tonminerale	Chlorit	0	3	3	0
	Illit	10	0	0	0
	Montmorillonit	24	0	0	0
	Kaolinit	10	5	5	0
	Summe	44	8	8	0

Tab. 12 Mineralbestand GL-2 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion

Anteil der Minerale in [Masse-%] je Kornfraktion

		< 0,002 mm	0,002 bis 0,006 mm	0,006 bis 0,02 mm	0,02 bis 0,063 mm
Mineralische Bestandteile	Kalzit	14	12	12	8
ohne bautechnisch	Quarz	28	43	52	68
wirksame Bindekraft	Muskovit	0	11	6	4
	Dolomit	2	7	8	4
	Albit	0	5	5	5
	Mikroclin	13	13	12	11
	Summe	57	90	95	100
Tonminerale	Chlorit	0	3	2	0
	Illit	10	0	0	0
	Montmorillonit	23	0	0	0
	Kaolinit	10	6	3	0
	Summe	43	10	5	0

Tab. 13 Mineralbestand GL-3 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion

Anteil der Minerale in [Masse-%] je Kornfraktion

		< 0,002 mm	0,002 bis 0,006 mm	0,006 bis 0,02 mm	0,02 bis 0,063 mm
Mineralische Bestandteile ohne bautechnisch wirksame Bindekraft	Kalzit	9	8	3	2
	Quarz	41	54	36	62
	Muskovit	0	8	19	2
	Dolomit	0	0	0	0
	Albit	5	7	7	4
	Mikroclin	21	18	28	30
	Summe	76	94	93	100
Tonminerale	Chlorit	0	2	3	0
	Illit	5	0	0	0
	Montmorillonit	15	0	0	0
	Kaolinit	4	4	5	0
	Summe	24	6	7	0

Tab. 14 Mineralbestand GL-4 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion

Anteil der Minerale in [Masse-%] je Kornfraktion

		< 0,002 mm	0,002 bis 0,006 mm	0,006 bis 0,02 mm	0,02 bis 0,063 mm
Mineralische Bestandteile ohne bautechnisch wirksame Bindekraft	Kalzit	12	17	8	6
	Quarz	26	37	25	58
	Muskovit	0	12	25	0
	Dolomit	2	5	7	5
	Albit	3	3	3	4
	Mikroclin	14	11	18	27
	Summe	58	85	86	100
Tonminerale	Chlorit	5	5	5	0
	Illit	11	0	0	0
	Montmorillonit	12	0	0	0
	Kaolinit	14	10	9	0
	Summe	42	15	14	0

Tab. 15 Mineralbestand GL-5 unterteilt in die jeweilige Kornfraktion

Die getrennte Analyse der Feinkornfraktionen führte zu folgenden Ergebnissen:

Kornfraktion $d < 0,002$ mm:

- Im Feinstkornbereich wurde erwartungsgemäß der größte Anteil an Tonmineralen nachgewiesen. Bei den Versuchslehmen wurde ein Gesamttonmineralgehalt von 24 % bis 44 % in der Kornfraktion $d < 0,002$ mm festgestellt. Gegenüber einer Annahme, dass der gesamte Feinstkorngesamtgehalt als bindiger Bestandteil zu betrachten ist, zeigen die Analyseergebnisse deutliche Abweichungen von 56 % bis 76 % auf.
- Das Smektit-Mineral Montmorillonit konnte in allen Prüflehmen nachgewiesen werden und stellte das anteilsmäßig am stärksten vertretene Tonmineral in der Feinstkornfraktion dar.
- Die Tonminerale Illit und Kaolinit wurden ebenfalls im Feinstkornbereich sämtlicher Naturlehme identifiziert.
- Das Feinstkorn setzt sich nicht nur aus Tonmineralen zusammen. Der überwiegende Anteil besteht aus Mineralen ohne bautechnisch wirksame Bindekraft, vorrangig Quarz mit einer Schwankungsbreite von 26 - 47 Masse-%.

Kornfraktion $0,002\text{ mm} \leq d < 0,006\text{ mm}$

- In dieser Kornfraktion konnten bei allen Grubenlehmen Tonminerale nachgewiesen werden. Die prozentualen Anteile waren jedoch deutlich geringer als in der Feinstkornfraktion. Der Gesamttonmineralgehalt schwankte in Größenordnungen von 6 – 15 Masse-%.
- Die Tonminerale Kaolinit und Chlorit waren am häufigsten vertreten.
- Nicht-tonmineralische Bestandteile wie Quarz, Feldspäte, Kalzit und Muskovit dominieren in ihren Anteilen.

Kornfraktion $0,006\text{ mm} \leq d < 0,02\text{ mm}$

In dieser Kornfraktion konnten ebenfalls bei allen Grubenlehmen Tonminerale nachgewiesen werden. Die prozentualen Anteile waren jedoch deutlich geringer. Der Gesamttonmineralgehalt schwankte in Größenordnungen von 5 – 14 Masse-%.

- Die Tonminerale Kaolinit und Chlorit waren am häufigsten vertreten.
- Das Tonmineral Montmorillonit wurde in einem Naturlehm (Grubenlehm GL-1) nachgewiesen.
- Nicht-tonmineralische Bestandteile wie Quarz, Feldspäte, Kalzit und Muskovit dominieren in ihren Anteilen.

Kornfraktion $0,02\text{ mm} - 0,063\text{ mm}$:

In der Kornfraktion $0,02\text{ mm} - 0,063\text{ mm}$ konnten bei nur einem Naturlehm (Grubenlehm GL-1) Spuren von Kaolinit nachgewiesen werden.

Anmerkung:

Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Kornfraktionen ist nicht zwingend erforderlich, um den Gesamtmineralbestand von Naturlehmen bestimmen zu können. Diese Untersuchungen wurden ergänzend durchgeführt. Zur Identifizierung der Tonminerale mittels Röntgendiffraktometrie ist es zweckmäßig, Anteile der Feinstkornfraktion zu gewinnen (z.B. mittels Zentrifugen-Verfahren), um Schmierproben erstellen und analysieren zu können. Der Gesamtmineralbestand lässt sich aufbauend durch röntgenografische Analyse der gemahlten Lehmprobe (Pulverpräparat) bestimmen.

3.3.4.2 Gesamtmineralbestand

Der für die untersuchten Grubenlehme, ermittelte Mineralbestand – im Feinkornbereich - ist in der Tab. 16 aufgeteilt nach den unterschiedlichen Mineralen dargestellt.

Anteil der Minerale in [Masse-%]

		GL-1	GL-2	GL-3	GL-4	GL-5
Mineralische Bestandteile	Kalzit	12	0	12	6	11
ohne bautechnisch wirksame Bindekraft	Quarz	42	41	44	47	33
	Muskovit	11	8	4	5	10
	Dolomit	9	0	4	–	5
	Albit	3	6	3	5	3
	Mikroclin	15	24	12	25	16
	Summe	91	79	79	88	78
Tonminerale	Chlorit	0	1	1	1	4
	Illit	1	4	4	2	4
	Montmorillonit	4	10	10	6	4
	Kaolinit	4	6	6	3	10
	Summe	9	21	21	12	22

Tab. 16 Übersicht des Gesamtmineralbestands für die untersuchten Grubenlehme

3.3.4.3 Zusammenfassung

Ausgehend von den Untersuchungen zum Mineralbestand im Feinkornbereich können folgende grundsätzliche Aussagen getroffen werden:

- Der Gesamt-Tonmineralbestand in den Kornfraktionen < 0,063 mm, also dem Anteil an Mineralen mit bautechnisch wirksamer Bindekraft, entspricht nicht dem Korngrößenanteil mit einem Durchmesser kleiner 0,002 mm. In Relation zum tatsächlich ermittelten Tonmineralbestand konnten zwischen beiden Größen Abweichungen von fast 50 % nachgewiesen werden.
- Eine Bestimmung des Bindemittelgehaltes kann nicht über eine Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgen, da sich die bindigen und nicht bindigen Minerale in dem gesamten Kornverteilungsbereich (< 0,002 mm bis < 0,063 mm) nachweisen lassen.
- In dem Bestand der Tonminerale sind große Unterschiede zwischen den untersuchten Grubenlehmen feststellbar. Große Schwankungen waren vor allem in dem Bestand an Montmorillonit und Kaolinit nachzuweisen. Da Montmorillonit, im Vergleich zu anderen Tonmineralen, eine große spezifische Oberfläche aufweist, kann dies ein späteres Kriterium für den erforderlichen Bindemittelgehalt im Stampflehmabbau darstellen.

3.4 Untersuchungsstrategie zur Analyse von Grubenlehm

In den vorherigen Abschnitten wurden unterschiedliche Verfahren für die Bestimmung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes beschrieben und auf deren Eignung für die Analyse von Grubenlehm untersucht.

Das Ergebnis dieser Betrachtungen wird in der nachstehenden Tabelle dargestellt.

Dazu werden dem jeweiligen Prüfparameter die untersuchten Prüfverfahren und beim Vorhandensein mehrerer Verfahren die Vorzugsvariante hervorgehoben.

Grundlage für die Empfehlung des günstigsten Weges zur Lösung der definierten Zielstellung – *Analyse von Grubenlehm* – waren dabei der erforderliche Zeit- und Geräteaufwand, die Messgenauigkeit und Praxistauglichkeit des Verfahrens.

Für die Prüfung der Korngrößenverteilung $d < 0,063$ mm wird deshalb die Aräometer-Methode als Vorzugsverfahren dargestellt, da dieses sich durch seine schnelle Versuchsdurchführung für die praktische Anwendung empfiehlt.

<i>Prüfparameter</i>		<i>Prüfverfahren</i>			
1	Vorhandensein organischer Substanzen	Riechversuch nach DIN 4022		Bestimmung der Farbe	
2	Korngrößenverteilung Korngrößen $d > 0,063$ mm	Siebverfahren nach DIN 18123			
3	Korngrößenverteilung Korngrößen $d < 0,063$ mm	Atterberg-Verfahren	Aräometer-Verfahren	Zentrifugen-Verfahren	Laserbeugung
4	Gewinnung Anteil der Feinstkornfraktion	Atterberg-Verfahren		Zentrifugen-Verfahren	
5	Identifizierung der Tonminerale	Röntgendiffraktometrie (an Schmierpräparaten)			
6	Bestimmung des Gesamtmineralbestands	Röntgendiffraktometrie (an Pulverpräparaten)			

Tab. 17 Übersicht der in Phase 1 - Prüfung und Analyse von Grubenlehm verwendeten Prüfverfahren

3.5 Zusammensetzung der Grubenlehme

3.5.1 Korngrößenverteilung

Im Abschnitt 3.3 wurde für die eingangs gewählten Grubenlehme die Ermittlung der Kornverteilungslinien mit verschiedenen Prüfverfahren dokumentiert.

Für die folgenden Untersuchungen ist es wichtig, möglichst genaue Daten zu verwenden. Für die Kornverteilung der Korngrößen mit $d < 0,63$ mm wird deshalb auf die Ergebnisse der Atterberg-Methode zurückgegriffen.

Mit diesen Randbedingungen konnten für die verschiedenen Naturlehme GL-1 bis GL-5 die in der Abb. 35 dargestellten Kornverteilungen ermittelt werden.

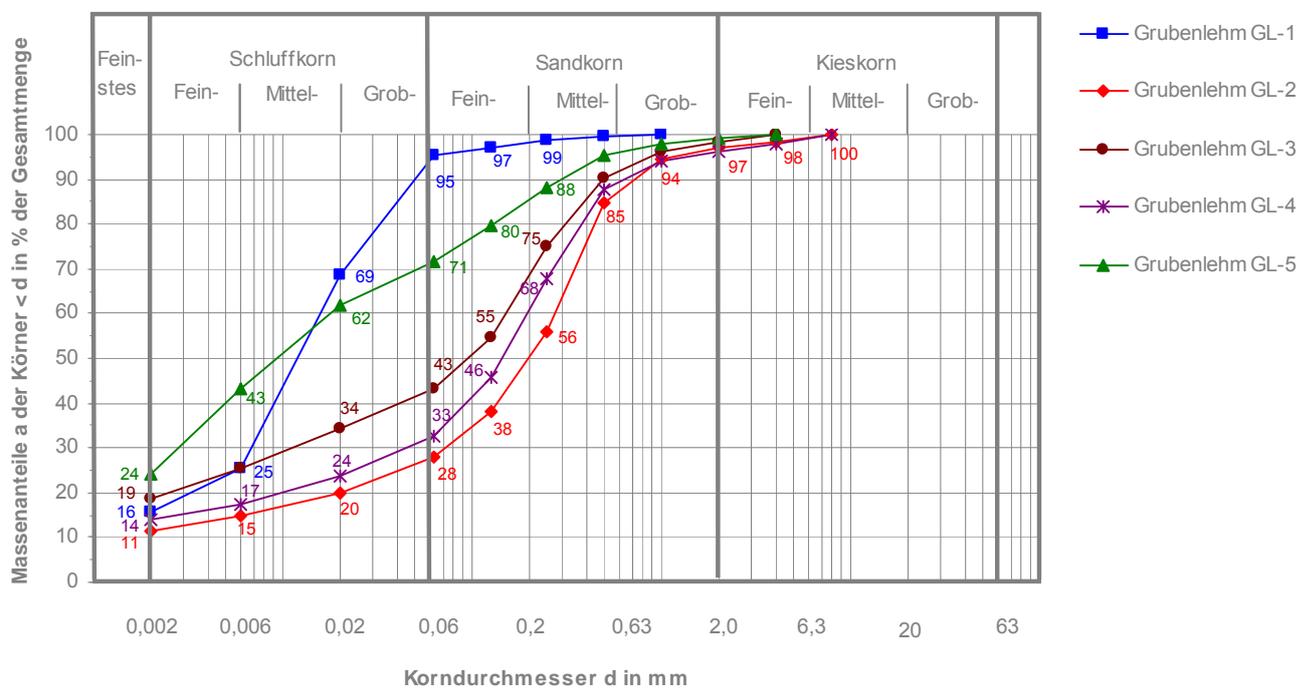


Abb. 35 Kornverteilungslinien der Grubenlehme GL-1 bis GL-5

Die Grubenlehme unterscheiden sich deutlich im Hinblick auf ihre Korngrößenzusammensetzung.

Nennenswerte Unterschiede sind vor allem im Schluff- und Sandkornbereich zu verzeichnen. Im Kieskornbereich (Korndurchmesser $d > 2$ mm) weisen sämtliche Lehme nur geringe Massenanteile ($a \leq 3$ %) auf.

Der Anteil des Feinstkorns ((Korndurchmesser $d < 0,002$ mm) schwankt zwischen einem Massenanteil von 11 % (GL-2) und 24 % (GL-5).

Gemäß DIN 4022 (Bodenansprache) werden die Grubenlehme GL-1 und GL-5 als *toniger Schluff* eingeordnet. Der Lehm GL 1 setzt sich zu ca. 95 % und der Lehm GL-5 zu 71% aus Schluff- und Feinstkorn zusammen.

Bei den Naturlehmen GL-2, GL-3 und GL-4 überwiegt der Sandkornanteil. Entsprechend der Bodenansprache nach DIN 4022 werden diese als *Mittelsande mit variierenden Ton-, Schluff- und Sandanteilen* bezeichnet.

3.5.2 Mineralbestand

Der Mineralbestand der Naturlehme unterscheidet sich deutlich. Das betrifft den Gesamttonmineralgehalt sowie die Zusammensetzung der einzelnen Tonminerale. Der Grubenlehm GL-5 verfügt mit 22 Masse-% über den größten Tonmineralgehalt.

Dominierend sind hierbei die Zweischicht-Tonminerale, das Kaolinit. Die Grubenlehme GL-2 und GL-3 heben sich aufgrund des vergleichsweise hohen Anteils an quellfähigen Tonmineralen (Montmorillonit) von den übrigen Versuchslehmen ab.

Anteil der Minerale in [Masse-%]		GL-1	GL-2	GL-3	GL-4	GL-5
Mineralische Bestandteile ohne bautechnisch wirksame Bindekraft	Kalzit	12	0	12	6	11
	Quarz	42	41	44	47	33
	Muskovit	11	8	4	5	10
	Dolomit	9	0	4	–	5
	Albit	3	6	3	5	3
	Mikroklin	15	24	12	25	16
	Summe	91	79	79	88	78
Tonminerale	Chlorit	0	1	1	1	4
	Illit	1	4	4	2	4
	Montmorillonit	4	10	10	6	4
	Kaolinit	4	6	6	3	10
	Summe	9	21	21	12	22

Tab. 18 Übersicht des Gesamtmineralbestands für die untersuchten Grubenlehme

Durch die Massenbilanzierung der einzelnen Kornfraktionen sind nunmehr Rückschlüsse auf den Gesamttonmineralgehalt - und damit dem tatsächlichen Bindemittelgehalt - der Naturlehme auf den erforderlichen Bindemittelgehalt im Stampflehmbau möglich (siehe Tab. 19)

Anteile in [Masse-%]

Kornfraktion	Feinstes und Schluff		Sandkorn 0,063 mm - 2 mm	Kieskorn > 2 mm
	d < 0,063 mm			
	Tonminerale*	übrige Minerale**		
Grubenlehm GL-1	8,8	86,6	4,5	0,1
Grubenlehm GL-2	5,8	22,2	69,1	3,0
Grubenlehm GL-3	9,1	34,1	55,1	1,7
Grubenlehm GL-4	4,0	28,6	63,7	3,6
Grubenlehm GL-5	15,6	55,8	27,5	1,0

* Minerale mit bautechnisch wirksamer Bindekraft

** Minerale ohne bautechnisch wirksamer Bindekraft

Tab. 19 Zusammensetzung der untersuchten Naturlehme, aufgeschlüsselt nach bindigen (Tonminerale) und nicht bindigen Bestandteilen

4 Phase 2 – Materialforschung Stampflehm

Die Grundlage für den Baustoff Stampflehm stellt natürlich vorkommender Lehm dar, der durch Zugabe von Zuschlagsstoffen materialtechnisch aufgewertet wird.

In Phase 1 wurden exemplarisch fünf Grubenlehme durch Voruntersuchungen ausgewählt und deren Zusammensetzung analysiert.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen werden in den folgenden Abschnitten, durch die Zugabe und Variation von mineralischen Zuschlagsstoffen und Wasser, die Eigenschaften der Naturlehme soweit verbessert, dass diese sich für den Einsatz im Stampflehmbau empfehlen. Beurteilungskriterien dafür stellen z.B. die Verarbeitbarkeit, das Schwind- und Tragverhalten dar.

Die gewählte Systematik der Untersuchungen beinhaltet eine gezielte Variation der Ausgangsstoffe sowie eine anschließende materialtechnische Prüfung, mit der Rückschlüsse auf den Einfluss einzelner Materialien gezogen werden können.

Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei folgende Zielstellungen:

- Gezieltes Design des Baustoffes Stampflehm mit dem die materialspezifischen Eigenschaften beeinflusst bzw. gesteuert werden können.
- Entwicklung von Methoden, mit denen der Lehmbaustoff in seinen Eigenschaften gleichförmiger herzustellen ist und damit die bisherigen großen Streuungen der Materialkennwerte verringert werden können

Überblick

Die Phase 2 wird wie folgt gegliedert:

- 4.1 Stampflehm - Wahl und Analyse der Ausgangsstoffe
- 4.2 Stampflehm - Prüfverfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften
- 4.3 Stampflehm - Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Zusammensetzung
- 4.4 Stampflehm - Entwicklung eines Baustoffes mit definierten Eigenschaften

In den einzelnen Kapiteln wird auf die nachstehenden Themengebiete eingegangen:

4.1 Stampflehm - Wahl und Analyse der Ausgangsstoffe

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist eine sorgfältige Auswahl und Analyse der Ausgangsstoffe. Die Stampflehmgemische werden aus verschiedenen Grubenlehmen (GL-1 bis GL-5) und mineralischen Zuschlägen gezielt zusammengesetzt. Die verwendeten Materialien werden dabei ausführlich dokumentiert.

4.2 Stampflehm - Prüfverfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften

In diesem Abschnitt werden Prüfverfahren gewählt und dokumentiert, die für die Ermittlung der Materialeigenschaften von Stampflehm angewendet werden. Grundlage der Materialprüfung sind die in den bestehenden Lehmbau Regeln beschriebenen Verfahren. Diese werden kritisch hinterfragt, bei fehlenden Vorgaben werden Prüfmethode gewählt und adaptiert, die für Baustoffe mit ähnlichem Materialverhalten gelten.

Ziel ist die Konzeption und Beschreibung von einheitlichen Prüfbedingungen und Prüfverfahren. Im Hinblick auf die zukünftige Erarbeitung einer Normvorschrift soll hiermit ein Beitrag geleistet werden.

4.3 Stampflehm - Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Zusammensetzung

Aus Versuchen an kleinformatischen Materialproben werden Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen der Stoffzusammensetzung und den Materialeigenschaften gezogen. Insbesondere wird der Einfluss *der Korngrößenverteilung, des Schluffgehalts, des Tonmineralgehalts und der Zusammensetzung der Tonminerale* auf baustofftechnologische Eigenschaften von Stampflehm untersucht. Die Untersuchungsergebnisse liefern einen Beitrag zur optimalen Zusammensetzung des Lehm-Baustoffes.

4.4 Stampflehm - Entwicklung eines Baustoffes mit definierten Eigenschaften

Die Eigenschaften von Stampflehm können durch eine gezielte Zusammensetzung des Baustoffes beeinflusst werden. Zur Frage, in wie fern sich Materialkennwerte durch definierte Anforderungen an die Materialzusammensetzung steuern lassen sollen Vergleichsmessungen durchgeführt werden. Bei der Auswertung der Untersuchungen gilt es herauszufinden, ob durch entsprechende Vorgabeparameter der Lehm-Baustoff in seinen Eigenschaften gleichförmig hergestellt werden kann und die großen Streuungen der Materialkennwerte verringert werden können.

4.1 Stampflehm - Wahl und Analyse der Ausgangsstoffe

4.1.1 Grubenlehme

Grundstoffe der Stampflehmgemische sind die Grubenlehme GL-1 bis GL-5, deren Korngrößenzusammensetzung und Mineralbestand ermittelt wurden. Die Naturlehme weisen wie in Abschnitt 3.5 dargestellt, folgende Zusammensetzungen auf:

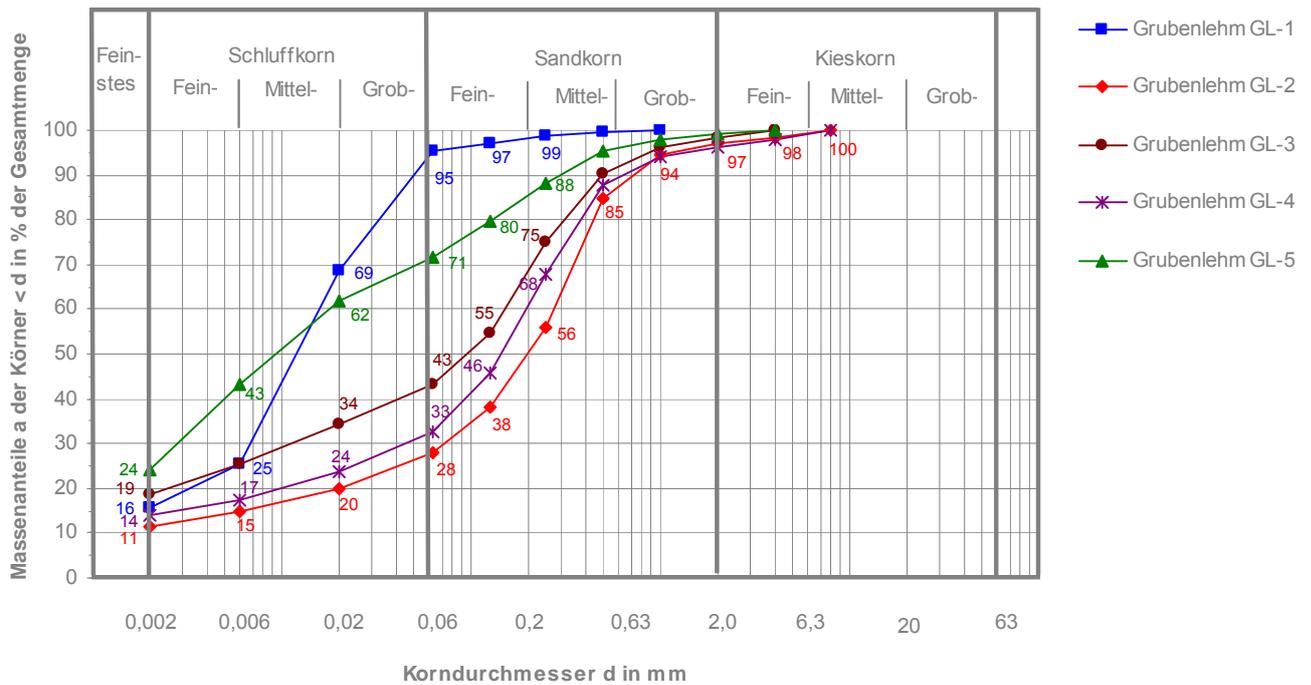


Abb. 36 Kornverteilungslinien der Grubenlehme GL-1 bis GL-5

Anteil der Minerale in [Masse-%]		GL-1	GL-2	GL-3	GL-4	GL-5
Mineralische Bestandteile ohne bautechnisch wirksame Bindekraft	Kalzit	12	0	12	6	11
	Quarz	42	41	44	47	33
	Muskovit	11	8	4	5	10
	Dolomit	9	0	4	–	5
	Albit	3	6	3	5	3
	Mikroklin	15	24	12	25	16
	Summe	91	79	79	88	78
Tonminerale	Chlorit	0	1	1	1	4
	Illit	1	4	4	2	4
	Montmorillonit	4	10	10	6	4
	Kaolinit	4	6	6	3	10
	Summe	9	21	21	12	22

Tab. 20 Übersicht des Gesamtmineralbestands für die untersuchten Grubenlehme

4.1.2 Gesteinskörnungen

Als Zuschlagstoffe werden ausschließlich mineralische Zuschläge verwendet. Es werden Gesteinskörnungen mit verschiedenen Korngruppen gewählt, mit denen sämtliche Sieblinienbereiche abgedeckt werden können.

Da bisherige Forschungen gezeigt haben, dass die Verwendung von scharfkantigen Materialien mit rauen Oberflächen zu höheren Festigkeiten führen [Dierks/Ziegert – 2002a] wurden für die Modifizierung der Naturlehme gebrochene Gesteinskörnungen verwendet.

Eigene Voruntersuchungen zu Misch- und Verarbeitungseigenschaften haben gezeigt, dass sich Stampflehme mit einem Größtkorn von 16 mm besonders gut verarbeiten lassen. Gemische mit höherem Größtkorn konnten nur schwer verarbeitet und verdichtet werden. Für die Lehmgemische wurde deshalb das Maximalkorn auf einen Durchmesser von 16 mm begrenzt.

Im Untersuchungsprogramm wurden die in der folgenden Tabelle aufgelisteten Gesteinskörnungen verwendet:

Gesteinskörnung		Lieferkorngruppe
Gebrochene Gesteinskörnung 1:	Edelbrechsand	0/2
Gebrochene Gesteinskörnung 2:	Edelsplitt	2/5
Gebrochene Gesteinskörnung 3:	Splitt	8/16

Tab. 21 Mineralische Zuschläge im Untersuchungsprogramm

Durchgang in Masse-% durch die Siebe in mm

	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Edelbrechsand 0/2	1,2	2,2	5,5	7,2	18,2	35,6	61,5	91,7	100	100	100	100
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0,13	2,4	55,7	100	100	100
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	96,5	100

Tab. 22 Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnungen

4.2 Stampflehm - Prüfverfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften

Ziel dieser Arbeit ist es, Zusammenhänge zwischen der Materialzusammensetzung und Materialeigenschaften zu erkennen und die jeweiligen Einflussgrößen zu identifizieren.

Dafür sind umfangreiche Prüfungen an kleinformatischen Probekörpern mit einer Variation der Stampflehmzusammensetzung erforderlich.

Eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messreihen ist nur durch die Definition einheitlicher Prüfbedingungen sowie einer standardisierten und dokumentierten Herstellung der Probekörper möglich.

Im folgenden Abschnitt werden daher zunächst die Herstellungsbedingungen und Prüfverfahren beschrieben und definiert, die den Prüfungen zugrunde gelegt werden.

4.2.1 Herstellungsbedingungen

Aufbereitung der Stampflehmgemische

Die Lehm- und Zuschlagsanteile wurden dosiert unter Zugabe von Wasser in einem Zwangsmischer gemischt. Für eine vollständige Homogenisierung der Lehmgemische wurde eine Mischdauer je Charge von 8 Minuten benötigt. Der Wassergehalt wurde bis zum Erreichen der optimalen Einbaufeuchte gesteigert. Nach der Aufbereitung wurde das Lehmgemisch abgedeckt und über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden stehen gelassen, d.h. „gemaukt“.

Einbauwassergehalt

Der Einbauwassergehalt ist der zum Erreichen der optimalen Einbaukonsistenz benötigte Wasseranteil. Die optimale Einbaufeuchte von Stampflehm lässt sich in guter Näherung anhand der Verdichtungseigenschaften ableiten. Zu trockenes Material führt oft zu schlechter Kornehüllung und ungleichmäßiger Verdichtung die zu Schwind- und Rissproblemen führen können. [Schneider et al – 1996]

Stampflehm sollte in einbaufähigem Zustand erdfeucht sein. Der erforderliche Feuchtegehalt wird haptisch durch Formung der Stampflehmproben kontrolliert. (siehe Abschnitt 4.2.2.6)

Einbau und Verdichtung

Zur Herstellung der Versuchskörper wurde das aufbereitete Lehmgemisch in eine mit Leinöl eingefettete, gusseiserne Schalungsform lagenweise mit einer Dicke von $d = 10$ bis 15 cm Dicke eingebaut. Die Verdichtung erfolgte mit einem manuellen Stampfer. Dabei wurden 50 Schläge auf den gesamten Querschnitt und vier weitere in den Eckbereichen aufgebracht.

Lagerung und Trocknung

Nach der Herstellung wurden die Stampflehmkörper auf Kanthölzern bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte gelagert. Bei annähernd konstanten standardisierten Trocknungsbedingungen (Trocknungstemperatur durchschnittlich 20 °C, relative Luftfeuchte von

39 % bis 46%) betrug die Lagerungsdauer ca. 6 bis 10 Wochen. Die Trocknung ist beendet, wenn keine Gewichtsabnahme mehr stattfindet.

4.2.2 Prüfverfahren

Für die Erfassung der materialtechnischen Kennwerte der Stampflehmgemische werden unterschiedliche Prüfverfahren angewendet und auf ihre Eignung überprüft.

Innerhalb der Untersuchungen werden folgende Materialparameter mit den zugehörigen Prüfmethode analysiert:

4.2.2.1 Druckfestigkeit

4.2.2.2 Statischer Elastizitätsmodul

4.2.2.3 Einbaufeuchte

4.2.2.4 Schwindmaß

4.2.2.5 Kriechverformung

4.2.2.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist die bestimmende Materialgröße im konstruktiven Ingenieurbau und stellt den Verhältniswert aus der Höchstlast, die ein Probekörper gerade noch zerstörungsfrei aufnehmen kann, zur Druckfläche dar.

Erst durch eine gesicherte Bestimmung der Druckfestigkeit mit reproduzierbaren Werten kann das Material berechenbar und damit für ingenieurtechnische Bemessungen nutzbar gemacht werden.

Gemäß den bestehenden Lehm-Regeln wird die Druckfestigkeit einer Stampflehm-Mischung anhand von drei Probewürfeln mit einer Kantenlänge von 20 cm bestimmt. Die maßgebliche Druckfestigkeit einer Versuchsserie ergibt sich aus dem kleinsten versuchs-technisch ermittelten Wert. Zusätzliche Vorgaben zum Prüfvorgang, z.B. zur Prüfgeschwindigkeit sind in den Lehm-Regeln nicht enthalten.

Es zeigten sich wie erwartet (s. z.B. DIN 1048 Teil 5) durchaus entscheidende Abhängigkeiten zwischen der Laststeigerung und der Druckfestigkeit.

Für die Versuche dieses Untersuchungsprogramms wird ebenfalls eine verbindliche Laststeigerungsgeschwindigkeit in Analogie zur Betonnorm vorgewählt. Die gegenüber der DIN 1048 Teil 5 geringen Laststeigerungen von 0,02 – 0,03 N/mm² je Sekunde resultieren aus den vergleichsweise niedrigen aufnehmbaren Spannungen der Stampflehmgemische.

Der Einfluss des Prüfkörpers auf die messtechnisch ermittelten Druckfestigkeiten und deren Streuungen wurde im Rahmen von Voruntersuchungen durch Variation von Größe und Form der Prüfkörper überprüft. Dazu wurden Probekörper mit folgenden Abmessungen untersucht:

- Probewürfel mit einer Kantenlänge von $d = 20$ cm

- Probewürfel mit einer Kantenlänge von $d = 10 \text{ cm}$
- Probezylinder mit einer Höhe $h = 30 \text{ cm}$, einem Durchmesser $d = 15 \text{ cm}$

Dabei konnte festgestellt werden, dass für die messtechnisch ermittelten Druckfestigkeiten, der Unterschied in den Schwankungsbreiten einer Messreihe vergleichbar und nahezu unabhängig von der gewählten Prüfkörperform waren (siehe Abb. 37, Abb. 38, Abb. 39)

Ausgeprägte Abhängigkeiten konnten zwischen der messtechnisch ermittelten Bruchdehnung und der Form des Prüfkörpers festgestellt werden.

Die Probewürfel mit einer Kantenlänge von $d = 20 \text{ cm}$ wiesen die geringsten Bruchdehnungen von maximal $0,6 \%$ mit den kleinsten Schwankungsbreiten von ca. $0,5 \%$ auf.

Im Vergleich dazu konnten für die Zylinder Bruchdehnungen von $1,3 - 2,1 \%$ und für den Würfel mit einer Kantenlänge von $d = 10 \text{ cm}$ Bruchdehnungen von $2,6 - 4,2 \%$ messtechnisch ermittelt werden.

Die weiteren Druckfestigkeitsuntersuchungen wurden an Probewürfeln mit einer Kantenlänge von $d = 20 \text{ cm}$ durchgeführt. Diese weisen hinsichtlich der ermittelten Druckfestigkeiten und Bruchdehnungen insgesamt die geringsten Schwankungsbreiten auf.

Diese sind auf das günstige Verhältnis der verwendeten Korngröße zur Druckaufstandsfläche (mit $A = 20 \times 20 \text{ cm}$) und die obere und untere Fixierung der Probekörper, mit dem damit verbundenen dreidimensionalen Spannungszustand zurückzuführen. Damit werden Unsicherheitsfaktoren, die durch die Inhomogenität der Materialmatrix entstehen können, minimiert.

Durch die Wahl größerer Probekörper kann außerdem eine Prüfung erfolgen, die sich - aufgrund von Einbau und Verdichtung der Stampflehmischung - den realen Verhältnissen auf der Baustelle am meisten annähert.

Mit den Voruntersuchungen konnten die Vorgaben der bestehenden Lehmbau Regeln bestätigt werden.

Für die einzelnen Probekörper und Messreihen gliedern sich die erzielten Ergebnisse wie folgt auf:

Stampflehm STL-1

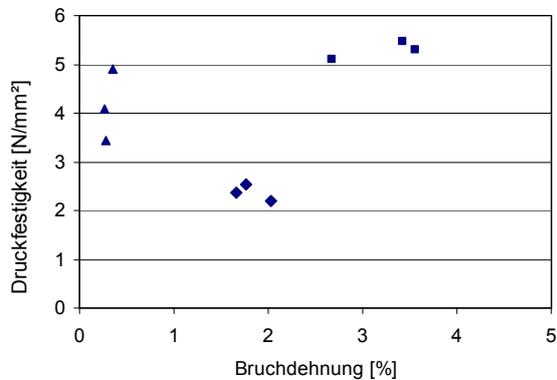


Abb. 37 Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung und der Prüfkörperform für STL-1

Probe	Nr.		Druckfestigkeit [N/mm²]	Bruchdehnung [%]
STL-1	Z1	Zylinder (d = 15 cm; h = 30 cm)	2,2	2,0
STL-1	Z2		2,4	1,7
STL-1	Z3		2,5	1,8
STL-1	W10-1	Würfel (Kantenlänge d = 10 cm)	5,3	3,6
STL-1	W10-2		5,1	2,7
STL-1	W10-3		5,5	3,4
STL-1	W20-1	Würfel (Kantenlänge d = 20 cm)	4,1	0,3
STL-1	W20-2		3,4	0,3
STL-1	W20-3		4,9	0,3

Stampflehm STL-2

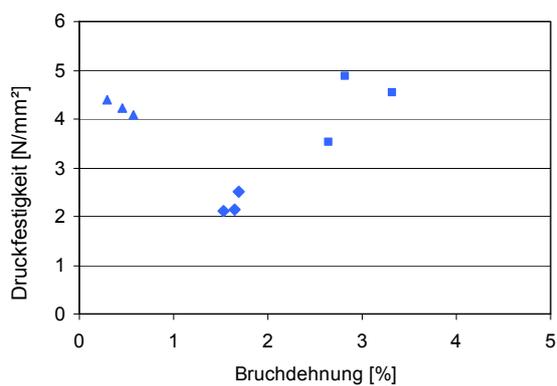
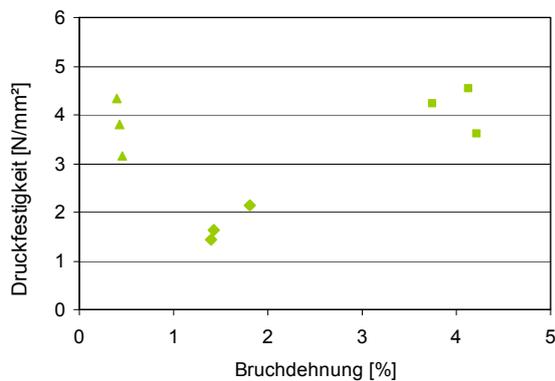


Abb. 38 Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung und der Prüfkörperform für STL-2

Probe	Nr.		Druckfestigkeit [N/mm²]	Bruchdehnung [%]
STL-2	Z1	Zylinder (d = 15 cm; h = 30 cm)	2,5	1,7
STL-2	Z2		2,1	1,5
STL-2	Z3		2,1	1,6
STL-2	W10-1	Würfel (Kantenlänge d = 10 cm)	3,5	2,7
STL-2	W10-2		4,5	3,3
STL-2	W10-3		4,9	2,8
STL-2	W20-1	Würfel (Kantenlänge d = 20 cm)	4,4	0,3
STL-2	W20-2		4,2	0,5
STL-2	W20-3		4,1	0,6

Stampflehm STL-3



Probe	Nr.		Druckfestigkeit [N/mm²]	Bruchdehnung [%]
STL-3	Z1	Zylinder (d = 15 cm; h = 30 cm)	2,2	1,8
STL-3	Z2		1,6	1,4
STL-3	Z3		1,4	1,4
STL-3	W10-1	Würfel (Kantenlänge d = 10 cm)	4,2	3,8
STL-3	W10-2		4,5	4,1
STL-3	W10-3		3,6	4,2
STL-3	W20-1	Würfel (Kantenlänge d = 20 cm)	4,3	0,4
STL-3	W20-2		3,2	0,5
STL-3	W20-3		3,8	0,4

Abb. 39 Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung und der Prüfkörperform für STL-3

Legende

- ◆ Zylinder (d = 15 cm, h = 30 cm)
- Würfel (10 cm Kantenlänge)
- ▲ Würfel (20 cm Kantenlänge)

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit wird der zwischen zwei Druckplatten einer Druckprüfmaschine gelagerte Prüfkörper bei stetiger Laststeigerung bis zum Bruch zusammengedrückt. Die Festigkeit ist dabei definiert, als die auf die wirksame Belastungsfläche bezogene Höchstlast (Bruchlast). Die Druckfestigkeit ergibt sich aus:

$$\beta_D = \frac{F}{A} \quad [4.1]$$

Dabei ist:

- β_D Druckfestigkeit in [N/mm²]
- F Höchstlast in [N]
- A Druckfläche in [mm²]



Abb. 40 Probewürfel mit $a = 20$ cm und Darstellung der Bruchfigur



Abb. 41 Probezylinder mit $d = 15$ cm und Darstellung der Bruchfigur



Abb. 42 Probewürfel mit $a = 10$ cm und Darstellung der Bruchfigur

4.2.2.2 Statischer Elastizitätsmodul

Mit Kenntnis des lastabhängigen Verformungsverhaltens von Stampflehm können Rückschlüsse auf das Kriechverhalten sowie die Gebrauchstauglichkeit gezogen werden. Der Elastizitätsmodul des Lehmbaustoffes wird bestimmt, um ihn hinsichtlich seines Materialverhaltens im Vergleich zu anderen Baustoffen einordnen zu können und berechenbar zu machen.

Derzeit werden in den Richtlinien bzw. Veröffentlichungen/Publicationen keine Angaben bzw. Empfehlungen für die Prüfung dieses lastabhängigen Verhaltens gemacht.

Hier erfolgt die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls von Stampflehm in Analogie zu bestehenden Richtlinien für strukturmechanisch ähnliche Baustoffe.

Die Untersuchungen wurden an zylindrischen Probekörpern mit einer Höhe von $h = 30$ cm und einem Durchmesser von $d = 15$ cm durchgeführt. Der Prüfaufbau lehnt sich an die Vorgaben der DIN 1048 Teil 5 (Prüfverfahren für Beton) an. Die maximal aufgebrachte Spannung (obere Prüfspannung σ_o) sollte dabei etwa ein Drittel der zu erwartenden Druckfestigkeit eines Probekörpers betragen. Diese wurde zuvor als Mittelwert der Festigkeit von drei Probekörpern gleicher Art und Maße ermittelt.

Die „entlastende“ untere Prüfspannung σ_u sollte nach DIN 1048 Teil 5 annähernd $0,5$ N/mm² betragen. Aufgrund der geringeren Festigkeit von Stampflehm wurde eine untere Prüfspannung σ_u von ungefähr 5 % der zu erwartenden Druckfestigkeit angesetzt.

Als statischer Elastizitätsmodul gilt der ermittelte Verhältniswert zwischen einer Druckspannungsdifferenz und der zugehörigen *elastischen* Verformung.

Grundlage der Ermittlung ist, dass plastische Verformungen ausgeschlossen werden können und möglichst nur noch elastische Verformungen vorhanden sind.



Abb. 43 Prüfaufbau für Elastizitätsmodul-Messung

Durch Vorversuche wurde festgestellt, dass bei Stampflehm ca. zehn Belastungszyklen erforderlich sind, bis die danach auftretenden plastischen Verformungen gegenüber den elastischen Verformungen vernachlässigbar sind. In dem Diagramm der Abb. 44 wird das Materialverhalten eines untersuchten Stampflehmes bei zyklischen Belastungen exemplarisch verdeutlicht.

Dazu wird die in wiederholten Belastungszyklen aufgebrachte Druckspannung über die messtechnisch ermittelte plastische Dehnung des Versuchskörpers aufgetragen.

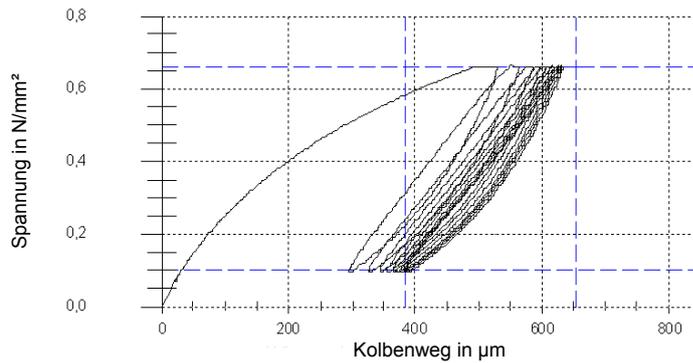


Abb. 44 Beispieldiagramm – Plastische Verformung einer Stampflehmprobe bei mehrmaligen Belastungswiederholungen

Zur Vermeidung von unregelmäßigen Setzungen innerhalb des Probekörpers, müssen die Druckflächen des Probezylinders eben und parallel zueinander sein. Unebene und schiefe Oberflächen der Versuchskörper werden deshalb nachträglich abgeschliffen. Die Dehnungsmessung erfolgt im mittleren Drittel der Zylinderprobe. Der Versuch wird kraftgesteuert mit einer Be- und Entlastungsgeschwindigkeit von $0,025 \text{ N/mm}^2$ je Sekunde durchgeführt. Das sich daraus ergebende Druckbelastungsdiagramm ist beispielhaft für einen Versuchskörper in Abb. 45 dargestellt.

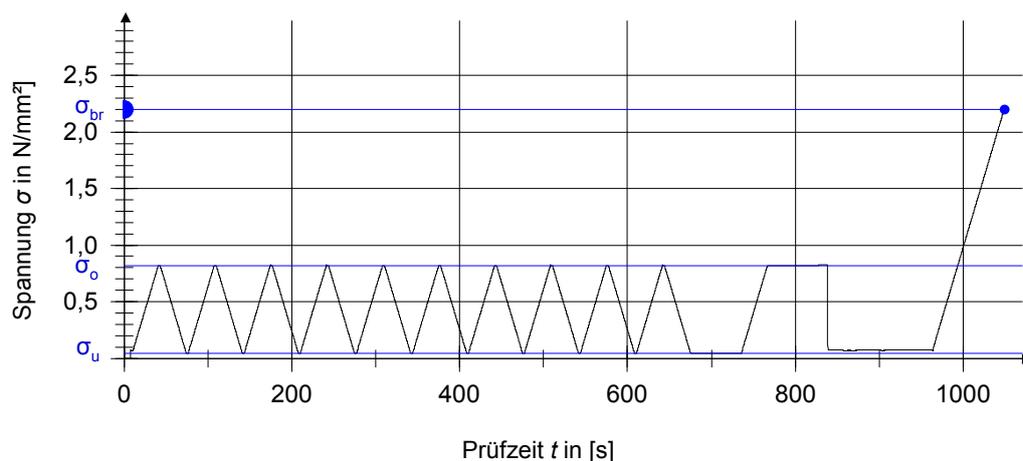


Abb. 45 Belastungs-Zeit-Diagramm für Elastizitätsmodul-Messung

Für die weiteren Untersuchungen wurde der 11. Belastungszyklus als „rein elastischer“ Verformungsvorgang angenommen.

Der bei dieser Belastung ermittelte Verhältniswert aus Druckspannungsdifferenz und zugehöriger Dehnungsdifferenz entspricht dem statischen Elastizitätsmodul.

Der Druck-Elastizitätsmodul E_D ergibt sich zu:

$$E_D = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\epsilon_o - \epsilon_u} \quad [4.2]$$

E_D	der Druck-Elastizitätsmodul in [N/mm ²]
σ_o	die obere Prüfspannung im letzten Belastungszyklus in [N/mm ²]
σ_u	die untere Prüfspannung vor dem letzten Belastungszyklus in [N/mm ²]
ε_o	die mittlere Stauchung unter der oberen Prüfspannung σ_o im letzten Belastungszyklus
ε_u	die mittlere Stauchung unter der unteren Prüfspannung σ_u vor dem letzten Belastungszyklus

4.2.2.3 Einbaufeuchte

Stampflehm weist aufgrund seiner Stoffzusammensetzung ausgeprägte Abhängigkeiten zwischen dem Wassergehalt und Eigenschaften wie Verarbeitbarkeit, Verdichtungsfähigkeit, Schwinden, Kriechen und Druckfestigkeit auf.

Im Hinblick auf eine gezielte Zusammensetzung des Lehmbaustoffes mit definierten Materialeigenschaften werden deshalb für sämtliche Probekörper bzw. Versuchsmischungen die Einbaufeuchten bestimmt.

Dazu eine Methode angewendet, bei der das Messgut so lange getrocknet wird, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt.

Dazu wird die Probe bei einer Temperatur von 40 °C² und einer relativen Luftfeuchte von 10 % auf ein sehr geringes Feuchtigkeitsniveau („Nullfeuchte“) gebracht. Der Trocknungsprozess ist beendet, wenn zwischen zeitlich verschiedenen Gewichtsmessungen der Probe keine Differenzen mehr feststellbar sind.

Aus dem Differenzgewicht der getrockneten und der unbehandelten Probe, das sich durch das Austreiben des Wassers ergibt, kann anschließend der Feuchtegehalt des unbehandelten Probenmaterials berechnet werden.

Der Feuchtegehalt ergibt sich aus:

$$\gamma = \frac{m_v - m_t}{m_t} \cdot 100\% \quad [4.3]$$

² Die Trocknungstemperatur sollte 40°C nicht übersteigen, um temperaturempfindliche quellfähige Tonminerale (die bereits bei Temperaturen von 50°C zu Teilen entwässert werden) nicht zu verändern und ein starkes Zusammenbacken der Proben zu verhindern. [Engelhardt/Müller - 1964]

Dabei ist:

γ Feuchtegehalt in [%]

m_v Masse bei Feuchtegehalt γ in [g]

m_t trockene Masse in [g]

Für die Bestimmung der Einbaufeuchte wird den aufbereiteten bzw. gezielt modifizierten Stampflehmgemischen vor der Verarbeitung zu Probekörpern eine kleinere, kennzeichnende Teilprobe von ca. 80 g – 100 g entnommen.

4.2.2.4 *Schwindmaß*

Stampflehm muss während des Bauprozesses über einen bestimmten Wassergehalt (i.d.R. durch Wasserzugabe) verfügen, damit günstige Bedingungen für die Verarbeitung und Verdichtung des Stampflehms geschaffen werden können. Nur bei Vorhandensein eines Mindestwassergehaltes kann die Bindekraft der Tonminerale aktiviert werden, was einen entscheidenden Einfluss auf die späteren Druckfestigkeiten des Materials hat.

Nach dem Verarbeiten und Einbringen des Baustoffes gibt das Stampflehmgemisch dieses Wasser wieder an die Außenumgebung ab, das Material strebt den Zustand der Ausgleichsfeuchte an. Infolgedessen verringert der Baustoff sein Volumen. In Abhängigkeit der Höhe der Wasserabgabe und der Bauteilform führt dies zu Zugspannungen im Material, die zu so genannten Schwindrissen führen können.

Diese Risse können nicht nur bei Lehmflächen, die dekorative Aufgaben erfüllen sollen, störend wirken, sie können ebenfalls die Standsicherheit von Lehmbauten gefährden. Zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit und im Hinblick auf ein gesichertes Tragverhalten, gilt es deshalb, das Schwindmaß, d.h. die Breite von Schwindrissen auf ein Minimum zu begrenzen. Nach [Ziegert – 2005] hat sich in der Praxis gezeigt, dass bei Stampflehmflächen sichtbare Risse in der Regel vermieden werden können, wenn das Schwindmaß auf 0,5 % beschränkt wird.

Die messtechnische Bestimmung des Schwindmaßes erfolgt an quaderförmigen Probekörpern mit den Abmaßen, Breite / Höhe / Länge: 150 mm/150 mm/700 mm.

Gemäß den Vorgaben der bestehenden Lehmbau - Regeln müssen diese Stampflehmkörper nach erfolgter Herstellung sofort ausgeschalt und auf einem glatten Untergrund gelagert werden. Das Schwindmaß der Probekörper wird nach dem Ausschalen durch zwei Messmarken – die Lehmoberfläche wird in einem Abstand von $d = 0,50$ m eingeritzt – überprüft. Anschließend werden die Probekörper bei einer Trocknungstemperatur von annähernd 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 39 % bis 46 % bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte gelagert, und das jeweilige Schwindmaß dokumentiert.

Nach Vorgabe der bestehenden Lehmbau Regeln ist das Schwindmaß bei Erreichen der Ausgleichsfeuchte - das so genannte Endschwindmaß – zu ermitteln. Ein Ziel der Untersuchungen bestand deshalb darin, die notwendige Versuchsdauer bis zum Erreichen des Endschwindmaßes bei üblichen Innenraumklimabedingungen zu ermitteln.

Dazu wurden Langzeitversuche (Zeitraum von 140 Tagen) an Stampflehmen unterschiedlicher Zusammensetzung (Korngerüst, Tonmineralgehalt) bei konstanten Klimabedingungen (Innenraumklima $\Theta_i = 20 \text{ °C}$; relative Luftfeuchte 39 % bis 46%) durchgeführt.

In der Abb. 46 werden beispielhaft, dokumentierte Schwindverläufe abgebildet, die einen Querschnitt über das gesamte Untersuchungsgebiet darstellen. Die Beispiellehme repräsentieren gemischtkörnige (Probe 1, Probe 2) und feinkörnige (Probe 3, Probe 4) Gefüge.

Bei gemischtkörnigen Gefügen mit einem verhältnismäßig geringen Tonmineralanteil (z.B. Probe 1) war der Schwindprozess bereits nach drei Tagen nach Herstellung zum Großteil abgeschlossen.

Bei Stampflehmen mit einem hohen Feinkornanteil sowie einem hohen Bindemittelgehalt (z.B. Probe 4) konnten Veränderungen im Schwindmaß bis zu einem Probenalter von 14 Tagen festgestellt werden.

Vergleichsmessungen an mehr als 20 Stampflehmkörpern zeigten, dass sich bei einem Probenalter von mehr als 14 Tagen keine sichtbaren Änderungen des Schwindmaßes auftraten.

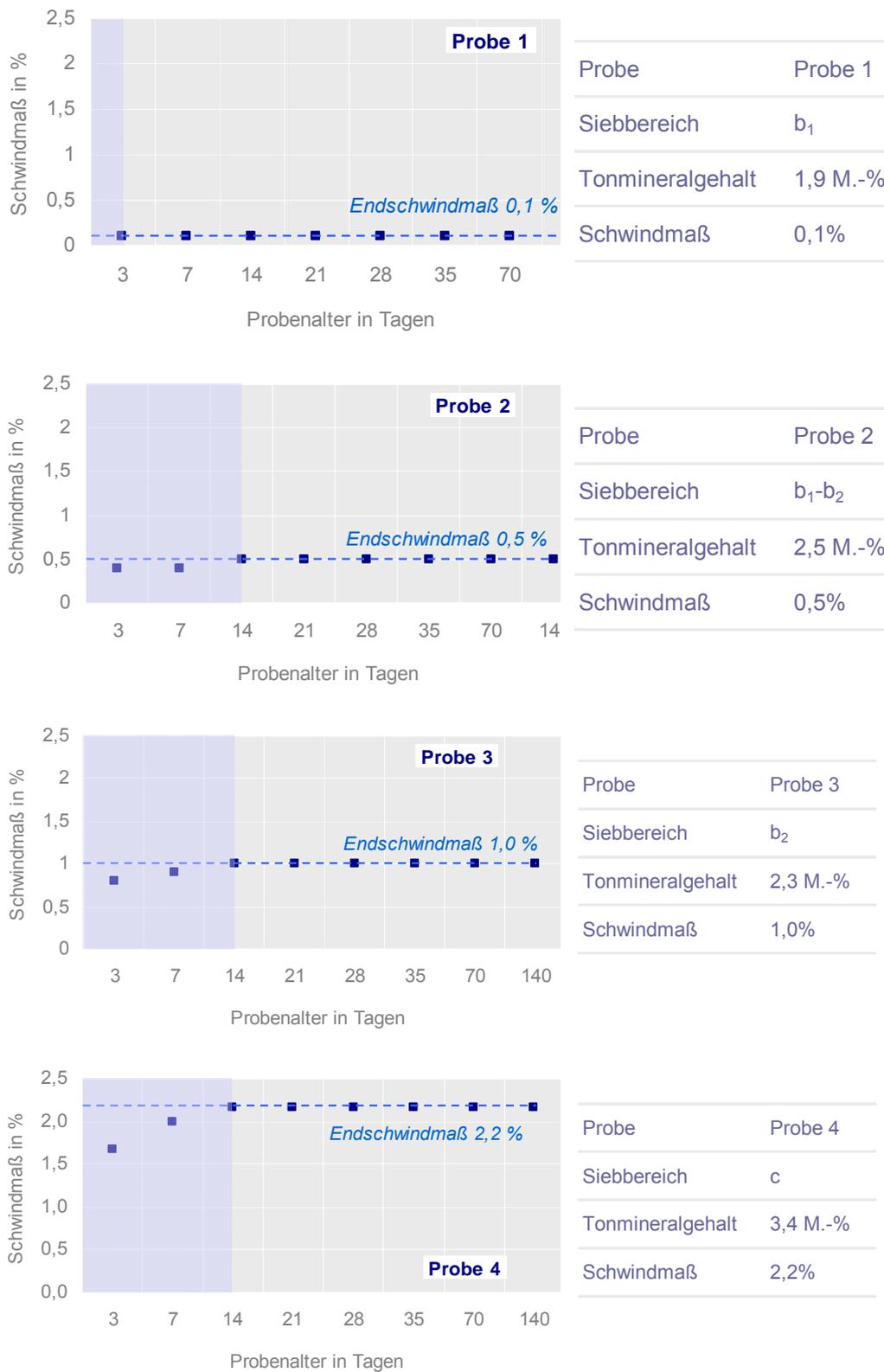


Abb. 46 Schwindverlauf von Stampflehmen mit unterschiedlicher Zusammensetzung

4.2.2.5 Kriechverformung

Mit dem Begriff *Kriechen* wird die zeitabhängige Verformungszunahme eines Materials unter einer konstanten Spannung definiert. Wie das Schwinden hat auch das Kriechen einen entscheidenden Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten von Baukonstruktionen. Kriechverformungen beginnen mit Fertigstellung und Belastung der Konstruktion und schreiten während der Nutzungsphase bei einer konstanten Belastung bis zum Erreichen eines Maximalwertes fort. Diese Verformungen können in Tragkonstruktionen, die sich aus Bauteilen mit unterschiedlichem Kriechverhalten zusammensetzen, zu Lastumlagerungen und damit zu einem zeitlich veränderten Tragverhalten führen. Eine Vernachlässigung des Kriecheinflusses für den Entwurf und die Bemessung einer Tragkonstruktion, kann erhebliche finanzielle und strukturelle Schäden verursachen. Für den Entwurf von Stampflehmbauten und deren Bestandteile kann es deshalb notwendig werden, das zeitabhängige Kriechverhalten des Lehmmaterials zu kennen. Damit kann beispielsweise die Gebrauchstauglichkeit von Einbauteilen wie z.B. Türen und Fenster dauerhaft während der Nutzungsphase gewährleistet werden.

In den bestehenden Lehmbau Regeln werden bisher keine Vorgaben zur Bestimmung der Kriechverformung für Stampflehm gemacht.

Zur Einschätzung, wie sich Stampflehm unter einer konstanten Spannung verhält und in welchen Größenordnungen Kriechverformungen zu erwarten sind, wurden deshalb Langzeitmessungen an kleinformatischen Materialproben vorgenommen.

Für die Untersuchungen des Kriechverhaltens wurden fünf Probewürfel der Kantenlänge 100 mm aus einem homogenisierten Stampflehmgemisch gefertigt und bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte gelagert.

Danach wurden drei Versuchskörper bis zur Bruchspannung belastet und der resultierende Mittelwert bestimmt. Die Ermittlung des Kriechverhaltens wurde an den verbleibenden zwei Probewürfeln durchgeführt, in dem diese dauerhaft mit $1/3$ bzw. $1/7$ der zu erwartenden Bruchspannung (dem Mittelwert) belastet wurden. Die Verformungen unter Dauerlast wurden anschließend mit Hilfe eines Setzungs-Dehnungsmessers in einem Messintervall von einem Tag ermittelt.

Die so dokumentierten zeitlich veränderlichen Gesamtverformungen werden für die unterschiedlichen Dauerlasten in dem nachfolgenden Diagramm (siehe Abb. 47) dargestellt.

Für die Berechnung der Kriechverformung wird die anfängliche elastische Verformung der Probekörper bestimmt und von der Gesamtverformung abgezogen. Charakteristisch für die ermittelten Verformungen ist ein starker Anstieg in den ersten Tagen der Versuchsdurchführung.

Bereits nach einer Woche wurden bei beiden Prüfkörpern ca. 50 % der endgültigen Kriechverformung verzeichnet.

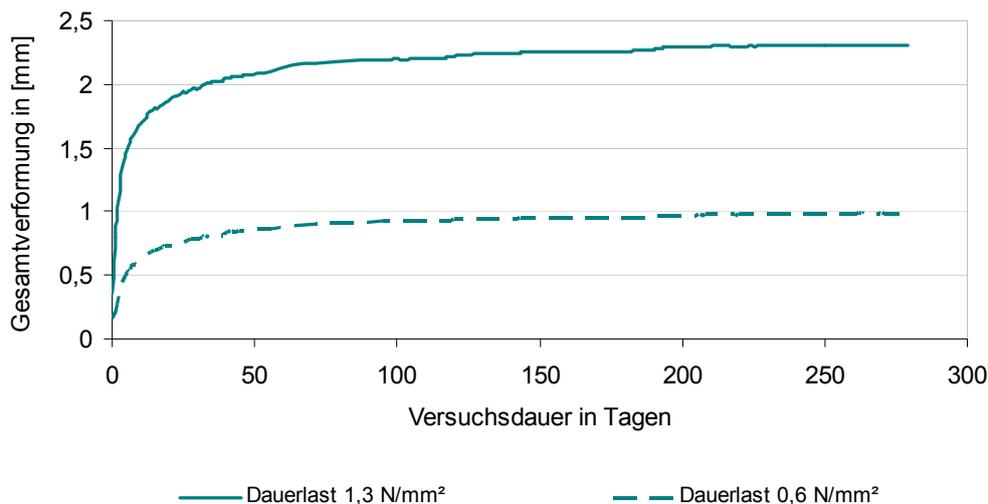


Abb. 47 Gesamtverformung einer Stampflehmprobe bei einer Dauerlast von 1/3 bzw. 1/7 der zu erwartenden Bruchspannung

Nach ca. 270 Tagen waren keine zusätzlichen Verformungen feststellbar, weshalb der Versuch beendet wurde. Für eine Dauerlast mit 1/3 der zu erwartenden Bruchspannung waren 95 % der Kriechverformungen bereits nach 118 Tagen erreicht. Für eine Dauerlast mit 1/7 der zu erwartenden Bruchspannung waren 95 % der Kriechverformungen nach 140 Tagen erreicht.

Für die untersuchten Probekörper entspricht das Verhältnis der ermittelten Endkriechmaße ε_k dem Verhältnis der aufgetragenen Dauerlasten. Hier konnte ein direkt proportionaler Zusammenhang festgestellt werden (siehe Tab. 23).

Die Kriechzahl des untersuchten Stampflehmgemisches wurde mit den gegebenen Randbedingungen (Belastungsalter – nach Erreichen des Endschwindmaßes) mit ca. 4,3 berechnet.

σ [N/mm ²]	σ_{Br} [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Δl [mm]	l [mm]	ε_{gesamt} [-]	ε_{el} [-]	ε_k [-]	$\varphi = \varepsilon_k / \varepsilon_{el}$ [-]
1,333	4,0	309,1	2,31	100	0,0231	0,0043	0,0188	4,36
0,571	4,0	309,1	0,99	100	0,0099	0,0018	0,0080	4,33

σ_1 : 1/3 der Bruchspannung

σ_2 : 1/7 der Bruchspannung

Tab. 23 Berechnung Kriechzahl



Abb. 48 Prüfaufbau Kriechverformungs-
messung



Abb. 49 Prüfkörper in der
Versuchseinrichtung

4.2.2.6 Knetprüfung

Die Knetprüfung stellt ein optisches und haptisches Verfahren für die Beurteilung der Bindigkeit von Stampflehm dar. Dazu wird nach der Aufbereitung des Lehmmaterials, eine Probe entnommen und in der Hand mehrmals geknetet. Danach wird das Material anhand vorgewählter Zustandsformen für die Knetprobe beurteilt.

In dieser Abhandlung wird zur Bewertung der Bindigkeit des Stampflehmgemisches zwischen *vier Zustandsformen* unterschieden, die sich durch folgende Eigenschaften definieren:

Zustand I

- Zuschlagsmaterial wird nicht durch bindige Bestandteile umhüllt
- Knetprobe hat keine homogene Oberfläche
- Zerfall der Probe nach der Knetprüfung in einzelne Bestandteile, bröckelige und krümelige Strukturen

Diese Mischungen sind für die Anwendung im Stampflehmbau nicht geeignet.

Zustand II

- Zuschlagsmaterial wird durch bindige Bestandteile umhüllt
- Knetprobe mit stark unebener Oberfläche und groben Einschlüssen
- Zerfall der Probe nach der Knetprüfung in kleinere Klumpen

Diese Mischungen sind für die Anwendung im Stampflehmbau geeignet, jedoch nicht für die Ausführung von Sichtbauteilen, an die hohe optische Qualitätsanforderungen gestellt werden.

Zustand III

- Zuschlagsmaterial wird vollständig durch bindige Bestandteile umhüllt
- Knetprobe mit leicht unebener Oberfläche
- Knetprobe ist gut formbar und bleibt nicht an der Handfläche haften
- Kein Zerfall der Probe nach der Knetprüfung

Diese Mischungen sind für die Anwendung im Stampflehmbau geeignet und zeichnen sich durch gute Verarbeitungseigenschaften aus.

Zustand IV

- Zuschlagsmaterial wird vollständig durch bindige Bestandteile umhüllt
- Knetprobe mit glatter, nass-toniger Oberfläche, die an der Handfläche haften bleibt

Diese Mischungen sind für die Anwendung im Stampflehmbau ungeeignet, da sie schwer verarbeitbar sind (Haften an den Verdichtungsgeräten, schwieriges Ausschalen). Die Oberflächen dieser Mischungen sind uneben und rissanfällig.

4.3 Stampflehm - Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Zusammensetzung

Basierend auf den bisherigen Voruntersuchungen und Definitionen erfolgt in diesem Abschnitt die Prüfung des Baustoffes Stampflehm. Dieser Teil stellt den Schwerpunkt und das Ziel der Grundlagenforschung dar.

Den folgenden Untersuchungen liegt die Fragestellung zu Grunde, inwieweit aus beliebigen Grubenlehmen ein Stampflehmgemisch mit gewünschten Materialkennwerten entwickelt werden kann. Sollte diese Möglichkeit bestehen, wäre dies ein erster Schritt für den Stampflehm bei seiner Entwicklung zu einem häufig eingesetzten Baustoff.

Voraussetzung dafür sind Kenntnisse über die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen der Zusammensetzung des Lehmbaustoffes, seinen Einbaubedingungen und den daraus resultierenden Eigenschaften.

Zielsetzung der Untersuchungen ist es, den Einfluss der **Korngrößenverteilung**, des **Schluffgehalts**, des **Tonmineralgehalts** sowie der **Art der Tonminerale** auf wichtige Stampflehmeigenschaften und –kennwerte zu erkennen. Dazu werden Vergleichsmessungen an gezielt zusammengesetzten Materialproben durchgeführt. Um Aussagen über die unterschiedlichen Einflussgrößen treffen zu können, wird im Rahmen der Messungen jeweils nur ein Stoff-Parameter verändert und anschließend sämtliche Materialeigenschaften messtechnisch überprüft und Veränderungen dokumentiert.

Ein Überblick der variierten Größen und der analysierten Materialeigenschaften kann der folgenden Darstellung entnommen werden:

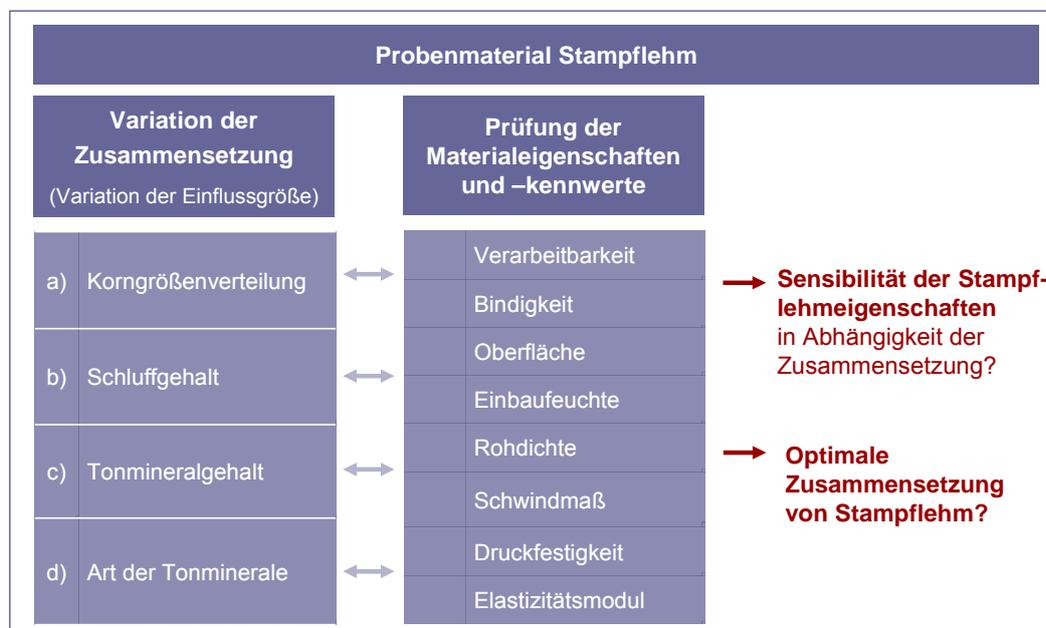


Abb. 50 Untersuchungsprogramm

Die Ergebnisse sollen neue Erkenntnisse über die Sensibilität der Baustoffeigenschaften in Abhängigkeit der Stoffzusammensetzung liefern und Schlussfolgerungen über die **optimale Zusammensetzung** von Stampflehm ermöglichen.

Dies soll die Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Entwicklung eines Stampflehms mit konstanten Stoffeigenschaften darstellen.

Anmerkung

Die nachfolgenden Untersuchungen sollen einen Beitrag zur Materialentwicklung des Baustoffes Stampflehm leisten. Durch die Zielsetzung, einen ersten Überblick zum Materialverhalten in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen zu gewinnen, wurde ein breites Untersuchungsfeld gewählt und dabei der Probenumfang aller Versuchsserien auf drei bis fünf Messkörper begrenzt. Dadurch war es möglich, Stampflehmeigenschaften in Abhängigkeit der Zusammensetzung zu charakterisieren und anhand von Bewertungskriterien Schlussfolgerungen über geeignete bzw. günstige Zusammensetzungen zu ziehen. Damit soll das Untersuchungsspektrum für weitergehende Betrachtungen eingegrenzt werden. Im Hinblick auf eine statistische Betrachtung, die eine Festlegung der Materialsicherheitsfaktoren ermöglicht, wären zusätzliche Untersuchungen mit einem höheren Probenaufwand durchzuführen.

4.3.1 Einflussgröße Korngrößenverteilung

Stampflehm besteht aus einem Traggerüst von Mineralen unterschiedlicher Korngröße und einem verhältnismäßig geringem Tonmineralanteil, der als Bindemittel wirkt. Zunächst wird der Einfluss der Korngrößenzusammensetzung, auf die Materialeigenschaften des Lehmbaustoffes, durch eine gezielte Variation der Zuschlagskörner untersucht und quantifiziert. Grundlage der systematischen Analyse sollen Ansätze aus dem Betonbau bilden.

4.3.1.1 Vorgehensweise

Zielstellung ist es, in Analogie zum Betonbau verschiedene Korngrößenbereiche zu definieren, mit denen sich Stoffgemische abbilden lassen, die günstige Materialeigenschaften aufweisen.

Dazu gilt es, verschiedene Korngrößenbereiche systematisch abzufahren und auf ihre Eignung im Stampflehmbau zu überprüfen. Zur Minimierung des dafür erforderlichen Prüfaufwandes wurden zunächst Voruntersuchungen durchgeführt, mit denen die für den Stampflehmbau relevanten Korngrößenbereiche eingegrenzt werden konnten.

Für die Begrenzung der relevanten Korngrößenbereiche werden die aus dem Betonbau bekannten Sieblinien verwendet und adaptiert. Diese Sieblinien stellen empirisch ermittelte Kornverteilungslinien für mineralische Zuschläge in einem Bereich größer 0,25 mm Korndurchmesser mit großer Packungsdichte dar (siehe Abb. 51)

Die Korngrößen mit einem Korndurchmesser $d < 0,25$ mm werden dabei dem Mehlkorngesamt zugeordnet.

Das eigentliche Bindemittel, der Zement, wird in den Regelsieblinien nicht erfasst. Bei der Betonherstellung wird dieser den Zuschlagstoffen separat beigelegt.

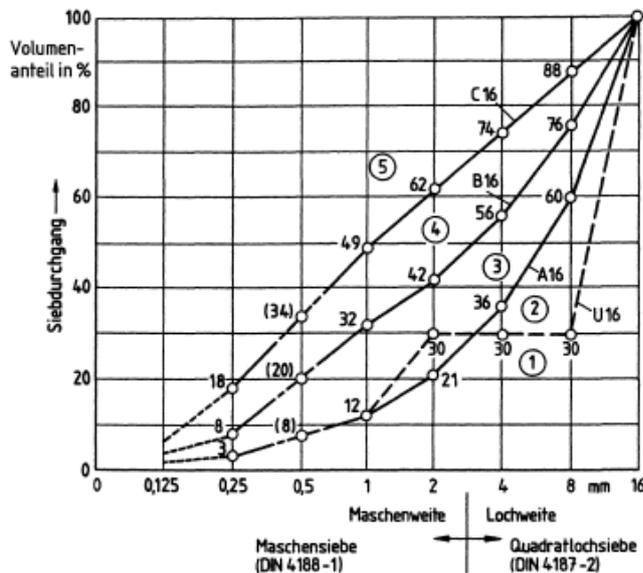


Abb. 51 Sieblinien gemäß DIN 1045 Teil 2 für ein Größtkorn von 16 mm

Die so genannten Regelsieblinien werden mit den Buchstaben A, B und C und dem zugehörigen Größtkorn (8 mm, 16 mm, 32 mm oder 64 mm) bezeichnet.

Eine derartig klare Trennung erscheint bei der Analyse von Stampflehmgemischen zunächst nicht möglich, da der Naturlehm, als Ausgangsstoff bereits Anteile des Bindemittels und der mineralischen Zuschlagstoffe enthält.

Basierend auf den Untersuchungen zur Kornverteilung der Grubenlehme (GL-1 bis GL-5) wird deshalb auch für die Darstellung der Stampflehmgemische der gesamte Kornverteilungsbereich mit Berücksichtigung des Feinst- und Schluffkornbereichs abgebildet.

Zur Findung der Grenzlinien für den Untersuchungsbereich müssen die Regelsieblinien so angepasst werden, dass der Massenanteil des Stampflehmgemisches kleiner 0,25 mm berücksichtigt wird.

Der unteren Grenzlinie des zu untersuchenden Kornverteilungsbereiches, wird die Regelsieblinie A16 gemäß DIN 1045-2 zugrunde gelegt.

Gegenüber dem Betonbau wird der Feinkornanteil $d < 0,25$ mm mit 15 % angesetzt.

Dieser Wert wurde durch Voruntersuchungen ermittelt und stellt den minimalen Feinkornanteil dar, der für die Herstellung von Stampflehm benötigt wurde. Lehmgemische mit einem Feinkornanteil kleiner 15 % waren für die Herstellung von Stampflehm aufgrund ihrer schlechten Verarbeitungs- und Verdichtungseigenschaften ungeeignet.

Die obere Grenze wird aus der Regelsieblinie C16 gemäß DIN 1045-2 abgeleitet. Der Feinkornanteil von 50 % stellt dabei den oberen Grenzwert für die Herstellbarkeit der Stampflehme dar.

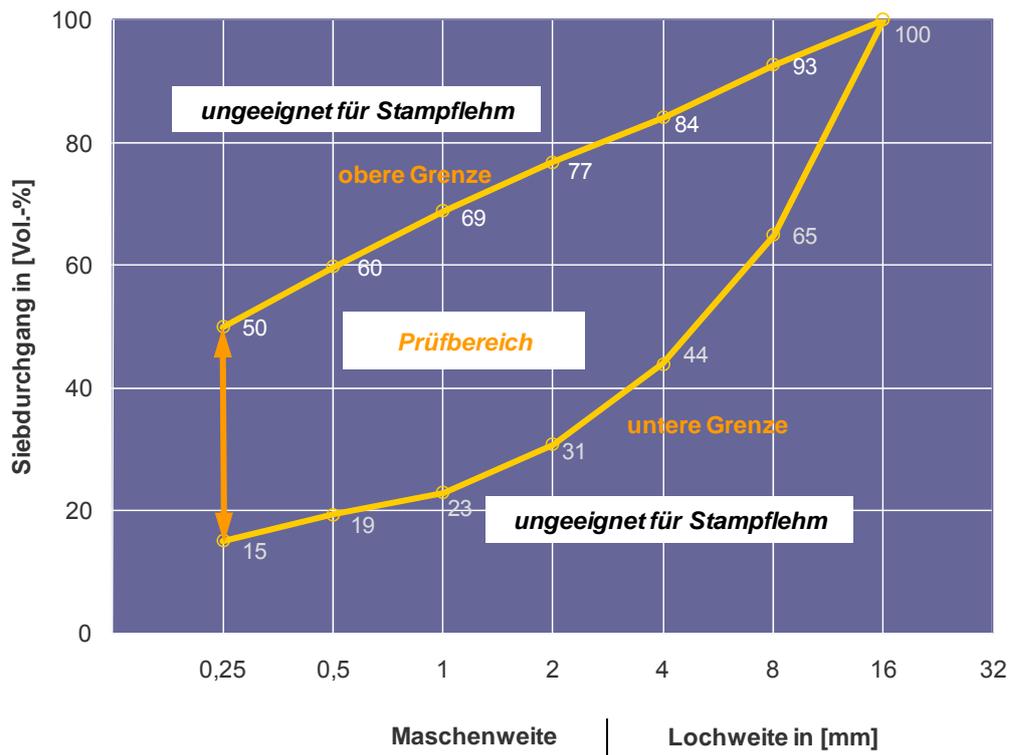


Abb. 52 Darstellung des Untersuchungsbereiches mit den definierten oberen und unteren Grenzl意思

Für den so definierten Prüfbereich erfolgt im Hinblick auf eine Klassifizierung der untersuchten Kornverteilungslinien und auf eine spätere Zuordnung der Ergebnisse eine weitere Unterteilung.

Da eine Fragestellung dieser Forschungsarbeit ist, inwieweit die Sieblinien aus dem Betonbau auf den Stampflehmabau übertragen werden können, wird dafür die Regelsieblinie B16 (siehe Abb. 51) verwendet und modifiziert.

Da für diese Sieblinie der zugehörige Feinkornanteil beim Stampflehm zunächst nicht bekannt ist, wird die Regelsieblinie B im Folgenden durch Verwendung der Fuller-Parabel nachgebildet, die eine rechnerische Darstellung eines Kornaufwerks mit stetigem Verlauf ermöglicht.

Die Fullerparabel

In der Betontechnik sind viele Versuche unternommen worden, „Idealsieblinien“ zu entwickeln, mit denen die größtmögliche Packungsdichte eines Kornaufwerks und damit ein minimaler Anspruch an Wasser und Zement (Zementleim), eine optimale Verarbeitbarkeit des Frischbetons und maximale Festigkeiten erzielt werden können.

Für kugelige Körner hat der amerikanische Ingenieur Richard Buckminster Fuller für ein trockenes Betongemisch aus Zuschlag und Zement eine Idealsieblinie ermittelt, die so genannte Fuller-Parabel, die sich wie folgt berechnet:

$$A = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (n = 0,5) \quad [4.4]$$

D Größtkorndurchmesser des Gemisches in mm

A Anteil in Vol.-% der Körner bis zu einem Durchmesser d in mm

Durch Variation des Exponenten n lässt sich die Packungsdichte zusammengesetzter Korngemische beeinflussen. Bei Zuschlag mit runder Kornform (z.B. natürliche Kiessande) wird die größte Packungsdichte meist für $n \approx 0,4$, bei gebrochenem Korn für $n \approx 0,3$ erreicht. [Backe/Hiese – 2004]

Für die rechnerische Annäherung der Regelsieblinie B wird die Fuller-Parabel modifiziert (siehe Gleichung [4.5]). Im Betonbau werden die Mengenanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm zusammen mit dem Zement dem Mehlkorn zugerechnet. Wird dieser Anteil außer Betracht gelassen, so ergibt sich folgende parabolische Kornverteilung:

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,125}{D} \right)^n} \left[\left(\frac{d}{D} \right)^n - \left(\frac{0,125}{D} \right)^n \right] \quad [4.5]$$

Die Sieblinie B16 ergibt sich annähernd mit einem Exponent $n = 0,25$.

Wird dieser Exponent in die unveränderte Fuller-Parabel eingesetzt (Gleichung [4.4]) ergibt sich die Kornverteilungslinie KVL II (siehe Abb. 53)

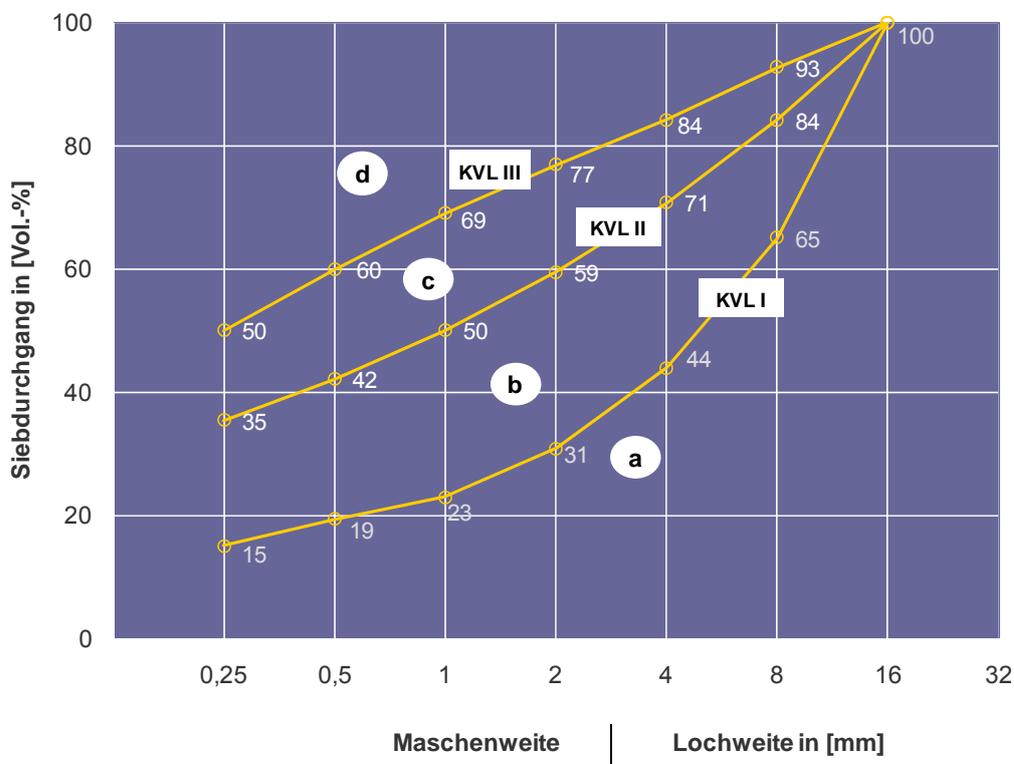


Abb. 53 Darstellung der definierten Prüfbereiche und der begrenzenden Kornverteilungslinien KVL I bis KVL III.

Mit den vorhandenen Grubenlehmen und unter Zugabe von Gesteinskörnungen werden Stampflehmgemische zusammengesetzt, die die Kornverteilungsbereiche abbilden.

Im Unterschied zu den Regelsieblinien im Betonbau wird der Feinkornanteil kleiner 0,25 mm ebenfalls berücksichtigt. Da Grubenlehme reine Naturprodukte darstellen, weisen sie stark abweichende Korngefüge auf. Sie können sowohl Feinkorn als auch Fraktionen im Grobkornbereich enthalten.

Für die Auswertung der Grobkornverteilung wird im Folgenden nur der relevante Bereich (Korngrößen $d \geq 0,25 \text{ mm} - 16 \text{ mm}$) dargestellt.

4.3.1.2 Materialproben

Für die Herstellung der Stampflehmproben wird ein homogenisierter Naturlehm verwendet, der durch Zugabe von Gesteinskörnungen in seiner Kornzusammensetzung verändert wird.

Es wird der Grubenlehm GL-1 gewählt. Dieser empfiehlt sich insbesondere als Ausgangsstoff für die Untersuchungen der Sieblinien, da er hauptsächlich aus Kornfraktionen im Feinst- und Schluffkornbereich besteht (Abschnitt 3.5).

Die Korngrößen im Sand- und Kieskornbereich der Stampflehmmischungen können durch beigemengte mineralische Zuschläge abgedeckt werden.

Das Verhältnis aus dem Anteil aus Naturlehm und den verschiedenen mineralischen Zuschlagstoffen wird so variiert, dass die im Abschnitt 4.3.1.1 definierten Prüfbereiche bzw. Kornverteilungsbereiche a bis d abgebildet werden können.

In Abb. 54 werden die Kornverteilungslinien für Prüfgemische dargestellt, die in den Bereichen b und c liegen.

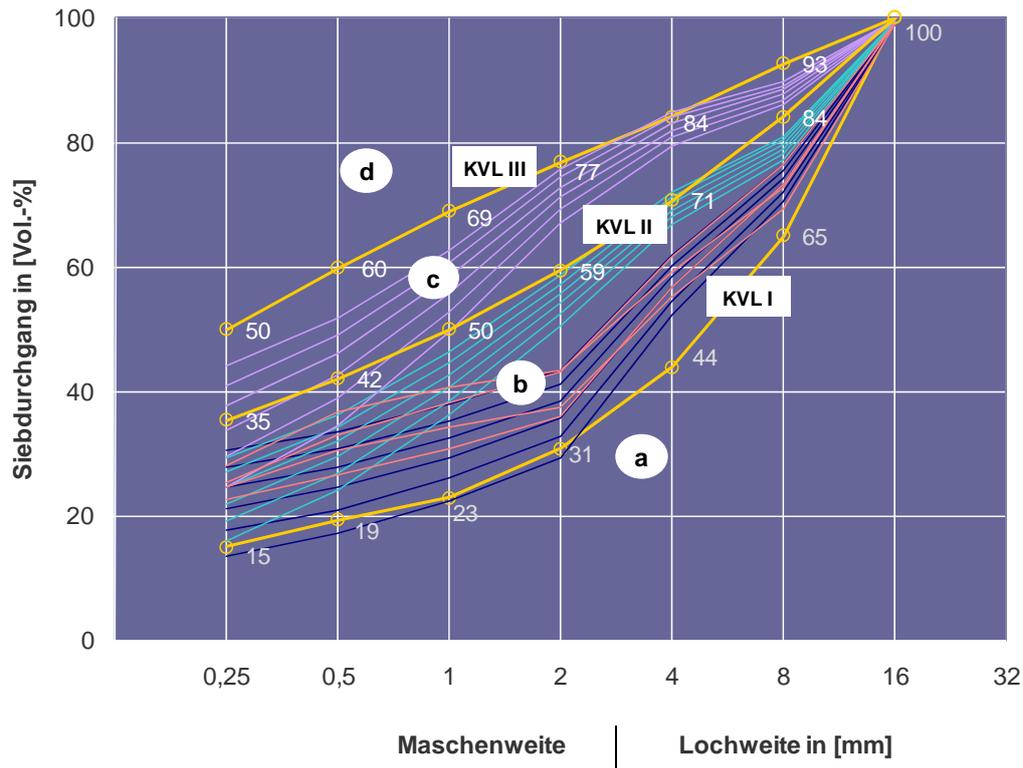


Abb. 54 Darstellung der definierten Prüfbereiche und Einordnung der Kornverteilungslinien der untersuchten Stampflehmgemische

Mit Verwendung eines homogenisierten Grubenlehms verfügen sämtliche Stampflehmproben über einen nahezu konstanten Mineralbestand (Tonminerale/Minerale). Die Materialproben unterscheiden sich ausschließlich in ihrer Korngrößenzusammensetzung. Die Versuchsreihen sind somit hinsichtlich der Stoffeigenschaften in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung vergleichbar.

4.3.1.3 Untersuchungsprogramm

Ziel der in diesem Abschnitt dargelegten Untersuchungen ist es, die Abhängigkeit des Materialverhaltens von Stampflehm infolge unterschiedlicher Korngrößenverteilungen zu bestimmen. Für die verschiedenen Korngrößenzusammensetzungen werden die in der nachfolgenden Grafik aufgeführten Materialeigenschaften und –kennwerte auf eventuelle Abhängigkeiten überprüft:

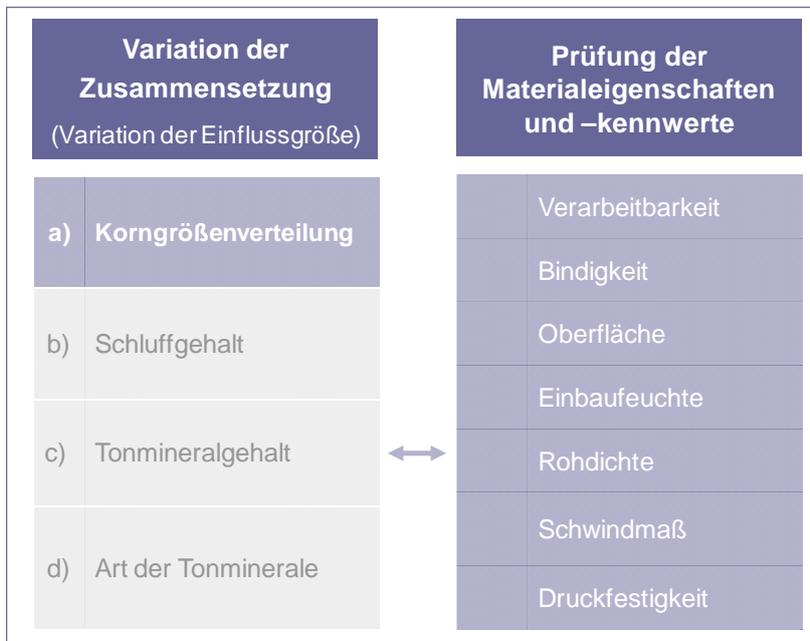


Abb. 55 Prüfprogramm für Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung

Bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse hat sich gezeigt, dass die eingangs gewählte Aufteilung - die auf Basis der Regelsieblinien gemäß DIN 1045-2 entwickelt wurde - für den Stampflehmbau zu grob war. Innerhalb des Prüfbereiches b konnten große Schwankungen in den Eigenschaften des Materials festgestellt werden.

Eine Einordnung der messtechnisch ermittelten Materialeigenschaften bzw. eine klare Zuordnung von Abhängigkeiten zwischen Prüfbereich und Material wären damit nicht möglich. Für die Auswertung und zur Darstellung der Ergebnisse wird deshalb eine weitere, mittige Unterteilung des Kornverteilungsbereiches b in die Teilbereiche b_1 und b_2 vorgenommen (siehe Abb. 56).

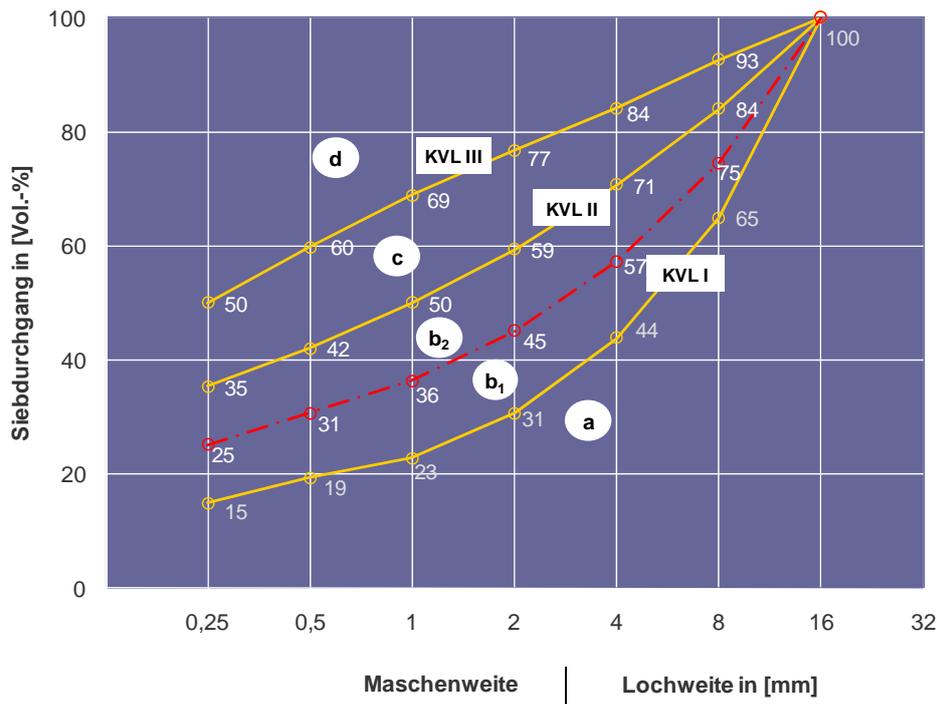


Abb. 56 Unterteilung des Prüfbereiches b in die Bereiche b_1 und b_2

4.3.1.4 Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung

Verarbeitbarkeit

Eine gute Verarbeitbarkeit von Stampflehmgemischen ist zunächst die Grundvoraussetzung für eine Verwendung als Baustoff. Die Verarbeitungseigenschaften eines Lehmgemisches stehen jedoch ebenfalls in einem unmittelbaren Zusammenhang mit dem späteren Materialverhalten, worauf in den weiteren Ausführungen näher eingegangen wird.

Zur Bewertung der Verarbeitbarkeit wird das Probenmaterial während der Aufbereitung der Lehmgemische und der Herstellung der Versuchskörper (Verarbeitungsphase) optisch und haptisch untersucht. Im Einzelnen wurden die Parameter *Wasseranspruch*, *Plastizität*, *Homogenisierbarkeit* und *Verdichtbarkeit* überprüft und dokumentiert.

Wasseranspruch

Bei der Aufbereitung der Materialproben wird der Wassergehalt allmählich bis zum Erreichen der optimalen Einbaufeuchte (Knetprüfung Zustand III, siehe Abschnitt 4.2.2.6) gesteigert. Unmittelbar vor der Verarbeitung wurde dem Stampflehmgemisch eine Teilprobe entnommen und die Einbaufeuchte gemäß Abschnitt 4.2.2.3 bestimmt.

Plastizität

Die Plastizität (Formbarkeit) des Probenmaterials wird mit Hilfe der Knetprüfung (siehe Abschnitt 4.2.2.6) abgeschätzt.

Homogenisierbarkeit Die Homogenisierbarkeit wird während der Aufbereitung der Lehmprobe untersucht und am fertigen Versuchskörper überprüft. Maßgebend für die abschätzende Bewertung sind die Aufbereitungsdauer, der Arbeitsaufwand sowie die Homogenität der aufbereiteten Materialprobe.

Verdichtbarkeit Das Verdichtungsverhalten des Probenmaterials wird bei der Anfertigung von Versuchskörpern durch Kriterien wie das Ausweichen des Materials unter dem Verdichtungsgerät, Haften des Lehms am Verdichtungsgerät bewertet. Die gefertigten Probekörper werden auf die Gleichmäßigkeit der Verdichtung (wie gleichmäßige Verzahnung der Stampfschichten, Hohlraumeinschlüsse) untersucht.

Es zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit zwischen den Verarbeitungseigenschaften und der Kornzusammensetzung der Lehmproben. Geringfügige Variationen der Zusammensetzung des Korngerüstes beeinflussten die Untersuchungsparameter und damit die Verarbeitbarkeit der Stampflehmgemische maßgeblich.

Günstige Verarbeitungseigenschaften stellten sich erwartungsgemäß bei gemischtkörnigen Gefügen ein. Diese Mischungen beanspruchten zur Erreichung plastischer Eigenschaften einen geringen Wasseranspruch, was sich begünstigend auf die Verdichtungseigenschaften sowie die Homogenisierbarkeit der Stoffgemische auswirkt.

Mit zunehmendem Feinkornanteil erhöhte sich der Wasserbedarf zur Entwicklung der Plastizität beträchtlich (Feinsand bindet größere Mengen Wasser zur Aufbereitung). Auch durch eine zeit- und arbeitsintensive Verarbeitung des Probenmaterials konnten Ungleichmäßigkeiten der Stampfschichten infolge ungünstiger Verdichtungseigenschaften nicht verhindert werden.

Anhand der Untersuchungsergebnisse lassen sich Rückschlüsse auf eine hohe Sensibilität der Verarbeitbarkeit infolge der Kornzusammensetzung von Stampflehm ziehen. In der nachstehenden Grafik werden für die untersuchten Stampflehmgemische, mit einer Zusammensetzung in den vorgegebenen Kornverteilungsbereichen a bis d, die festgestellten, qualitativen Verarbeitungseigenschaften dargestellt. In dem Diagramm werden die einzelne Siebbereiche qualitativ mit einer Bewertungsskala von 1 bis 5 Punkten (1 Punkt = schlecht; 5 Punkte = sehr günstig) bewertet. Zusätzlich wird der Bereich farblich gekennzeichnet, bei dem günstige Eigenschaften festgestellt werden konnten. Die Güte der Verarbeitbarkeit wird dabei aus den oben genannten Untersuchungsparametern abgeleitet.

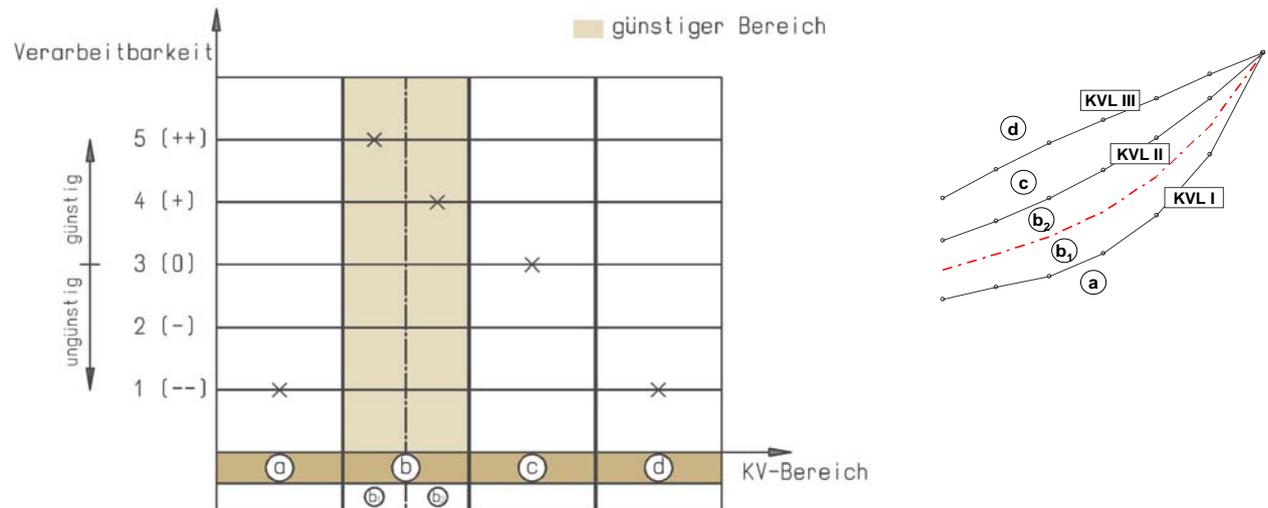


Abb. 57 Beurteilung der Verarbeitbarkeit für die Kornverteilungsbereiche a bis d

Die Untersuchungen ergaben für den Kornverteilungsbereich b sehr gute Eigenschaften hinsichtlich der Verarbeitbarkeit. Während der Bereich c noch brauchbare Eigenschaften aufwies, wurden die Gemische mit Kornverteilungen in den Bereichen a und d als ungeeignet eingestuft.

Die detaillierten Ergebnisse für die einzelnen Untersuchungskriterien (Wasseranspruch, Plastizität, Homogenisierbarkeit, Verdichtbarkeit) können der Tab. 24 entnommen werden. Dabei zeigte sich, dass zwischen den einzelnen Parametern ein unmittelbarer Zusammenhang besteht und sich Bereiche mit durchgängig gleich günstigen Verarbeitungseigenschaften ergeben.

Verarbeitbarkeit

Kornverteilungsbereich	a	b		c	d
		b ₁	b ₂		
Korngerüst	grobkornreich	gemischtkörnig		feinkornreich	sehr feinkornreich
Wasseranspruch	ca. 7 - 8 %	ca. 7 - 8 %	ca. 8 % - 9 %	ca. 11 - 12 %	>> 12 %
Plastizität		+++	++	+	
Homogenisierbarkeit		+++	++	+	
Verdichtbarkeit		+++	++	+	
Verarbeitbarkeit		+++	++	+	

- +++ sehr gut
- ++ gut
- + brauchbar
- / unbrauchbar

Tab. 24 Bewertungskriterien für die Einschätzung der Verarbeitbarkeit

Bindigkeit/Bindemittelanspruch

Die Tonminerale stellen das Bindemittel in dem Materialgemisch Stampflehm dar. Der Lehmbaustoff muss genügend Tonminerale enthalten, um die übrigen mineralischen Bestandteile (bei Vorhandensein von Wasser) vollständig zu binden. Ein zu hoher Tonmineralgehalt wirkt sich jedoch negativ auf die Verarbeitbarkeit und das Schwindmaß des Baustoffes aus. Für ein Stampflehmgemisch ist es somit erforderlich, den Bindemittelanspruch zu definieren, der günstige Materialeigenschaften bedingt.

Vorhergehende Sensibilitätsuntersuchungen zum Einfluss des Bindemittelgehalts (Anteil der Tonminerale) auf das Schwindverhalten von Stampflehm haben gezeigt, dass bereits geringe Modifizierungen des Tonmineralgehalts zu deutlichen Änderungen des Schwindmaßes führen können. Um das Schwindmaß zu begrenzen und dadurch Schwind- und Spannungsrisse möglichst zu vermeiden, sollte der Lehmbaustoff über eine hohe Bindekraft bei geringem Tonmineralanteil verfügen.

In diesem Zusammenhang ergab sich die Fragestellung, welchen Einfluss die Kornzusammensetzung auf den Bindemittelanspruch des Lehmbaustoffes hat und inwieweit durch gewählte Kornverteilungen Materialeigenschaften optimiert werden können.

Hierzu wird innerhalb der Untersuchungen für unterschiedliche, das Untersuchungsgebiet abdeckende, Kornverteilungslinien der Tonmineralgehalt der Materialproben schrittweise erhöht, bis genügend Bindekraft vorhanden ist, um die mineralischen Bestandteile vollständig zu binden. Das Erreichen dieses Zustandes wird mittels der *Knetprüfung* (siehe Abschnitt 4.2.2.6) eingeschätzt. Eine vollständige Bindung der Bestandteile ist erreicht, wenn die Knetprobe in den Zustand III gemäß Knetprüfung eingeordnet werden kann.

In der Tab. 25 werden für die in der Knetprüfung (Abschnitt 4.2.2.6) definierten Zustände exemplarische Abbildungen von Knetproben gezeigt und den üblicherweise zu erwartenden Materialeigenschaften gegenübergestellt.

Knetprüfung		Eigenschaften
Zustand I		<ul style="list-style-type: none"> nicht genügend Tonminerale vorhanden, um mineralische Bestandteile zu binden ungeeignet für Verarbeitung im Stampflehbau
Zustand II		<ul style="list-style-type: none"> Tonminerale vorhanden, um Bindekräfte aktivieren zu können geringe Plastizität, schlechte Formbarkeit des Materials ungünstige Verarbeitungs- und Verdichtungseigenschaften brauchbar für Verarbeitung im Stampflehbau
Zustand III		<ul style="list-style-type: none"> genügend Tonminerale vorhanden, um mineralische Bestandteile vollständig zu binden sehr gute plastische Eigenschaften günstige Verarbeitungs- und Verdichtungseigenschaften gut geeignet für Verarbeitung im Stampflehbau
Zustand IV		<ul style="list-style-type: none"> hoher Tonmineralgehalt erfordert hohen Wassergehalt ungünstige Verarbeitungs- und Verdichtungseigenschaften hohes Schwindmaß

Tab. 25 Übersicht Zustände I bis IV gemäß Definition Knetprüfung

Innerhalb der systematischen Untersuchungen werden Stampflehmgemische mit einer definierten Kornverteilung hergestellt, mit denen die definierten Kornverteilungsbereiche abgedeckt werden können und Mindest-Tonmineralgehalt erfasst werden kann. Diese Kornverteilungslinien KL werden vom Grob- zum Feinkornbereich mit der Zahl 1 beginnend, aufsteigend bezeichnet.

Für diese Kornverteilungslinien (KL-1, KL-2, usw.) wird dann der Bindemittelgehalt durch eine Erhöhung des Naturlehmanteils erhöht und der daraus resultierende Zustand gemäß Knetprüfung festgestellt. Die Dokumentation der schrittweisen Erhöhung des Tonmineralgehaltes erfolgt, indem die Materialproben den Namenszusatz a, b, c und fortlaufend erhalten. Als Ausgangsstoff für den Lehmanteil wurde der Grubenlehm GL-1 verwendet, da dieser fast vollständig aus Fraktionen im Fein- und Feinstkorn besteht.

In der nachstehenden Fotodokumentation Abb. 58 wird für die Kornverteilungslinie KL-1 die schrittweise Erhöhung durch eine mengenmäßige Darstellung der verwendeten Stoffanteile gezeigt.



Abb. 58 Darstellung der verwendeten Stoffanteile bzw. der schrittweisen Erhöhung des Naturlehmanteils für die Herstellung der Kornverteilungslinien KL-1a bis KL-1f

Die so hergestellten Stampflehmgemische werden anschließend mittels Knetprüfung untersucht. Eine Übersicht von angefertigten Knetprüfungen kann der Abb. 59 und Abb. 60 exemplarisch für die Kornverteilungslinien KL-1a bis KL-1f und KL-3a bis KL-3f entnommen werden. Für jede einzelne Knetprobe erfolgt dann eine Einordnung in die Zustände I bis IV gemäß Knetprüfung.



Abb. 59 Knetproben von KL-1a bis KL-1f für die qualitative Zuordnung

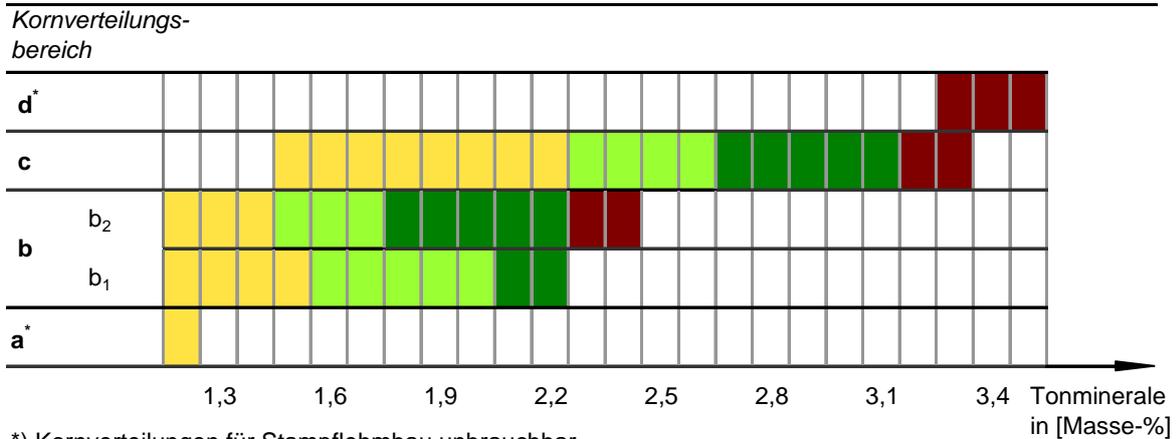


Abb. 60 Knetproben von KL-3a bis KL-3f für die qualitative Zuordnung

Eine Übersicht der dokumentierten Zustände kann der Abb. 61 entnommen werden.

In dieser Abbildung wird für die geprüften Stampflehmgemische, in Abhängigkeit des Tonmineralgehalts und der Kornzusammensetzung (qualitative Zuordnung zu einem Kornverteilungsbereich), der mit der Knetprüfung festgestellte Zustand (I bis IV) farblich dargestellt.

Knetprüfung



- Zustand I (unzureichende Bindekraft)
- Zustand II (geringe Bindekraft vorhanden)
- Zustand III (hohe Bindekraft)
- Zustand IV (ungünstig, Tonmineralgehalt beansprucht hohen Wassergehalt)

Abb. 61 Einordnung der untersuchten Stampflehmgemische in die Zustände I bis IV gemäß Knetprüfung

Die Auswertungen ergeben, dass in den *Kornverteilungsbereichen* b₁, b₂ (gemischtkörniges Gefüge) und dem *Kornverteilungsbereich* c (feinkörniges Gefüge), Bereiche des Tonmineralgehaltes vorhanden sind, in denen eine hohe Bindekraft festgestellt werden konnte.

Im Prüfbereich b_2 sind bereits ab einem Tonmineralgehalt von ca. 1,8 Masse - %, für einen relativ großen Bereich, günstige Materialeigenschaften zu verzeichnen.

Im Prüfbereich c ist für die Erreichung günstiger Bindekräfte der höchste Bindemittelanteil (ca. 2,7 Masse - %) notwendig. Im Hinblick auf die weiteren Untersuchungen ist für diesen Prüfbereich ein hoher Wasseranspruch zu vermuten, der zu ungünstigen Schwind-eigenschaften führen dürfte.

Stoffgemische in dem *Kornverteilungsbereich a* (grobkornreiches Gefüge) und dem *KVB d* (sehr feinkörnige Gefüge) konnten durch eine Veränderung des Bindemittelgehaltes nicht günstig beeinflusst werden. Lehmgemische, die in diese Bereiche eingeordnet werden, sind für die Verwendung im Stampflehmabau ungeeignet.

Oberfläche

Stampflehm kann mit derzeitigen Fertigungsmethoden nur unter hohem Arbeitsaufwand verarbeitet werden. Gegenüber Bauten aus Massenbaustoffen ist ein Stampflehmabau mit hohen Personalkosten verbunden, die dazu führen, dass z.B. Stampflehmwände überwiegend als repräsentative Sichtbauteile ausgeführt werden.

Bei einer derartigen Verwendung des Lehmbaustoffes werden an die Qualität der Oberfläche hohe Ansprüche gestellt. Diese sollte möglichst eben, rissfrei und weitgehend abriebfest sein.

Dazu ist es zweckmäßig, bereits durch eine gezielte Zusammensetzung des Lehmbaustoffes die gewünschten Oberflächeneigenschaften zu erreichen, um spätere aufwendige Nachbehandlungen der Oberfläche zu vermeiden.

Aus diesem Beweggrund heraus wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen Oberflächenqualität und Korngrößenverteilung von Stampflehm untersucht.

Für die Versuchsreihen werden Stoffgemische aus einem Naturlehm und Gesteinskörnungen so zusammengestellt, dass die Probemischungen repräsentativ für die gewählten *Kornverteilungsbereiche (Prüfbereiche) a bis d* sind.

Die aufbereiteten Proben werden mittels Knetprüfung zunächst auf ihre Bindigkeit untersucht und mit Erreichen des Zustands III (vgl. Abschnitt 4.2.2.6 - Knetprüfung) zu kleinformatischen Lehmkörpern verarbeitet.

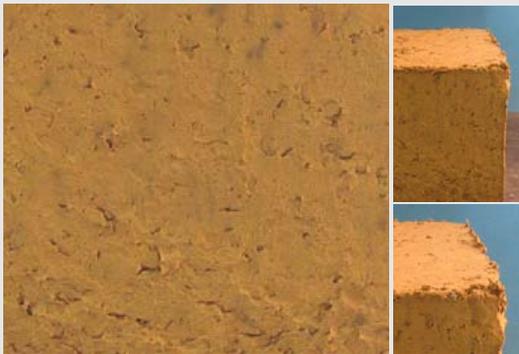
Die qualitative Abschätzung der Oberfläche erfolgt, indem die Stampflehmproben nach dem Erreichen der Ausgleichsfeuchte optisch und/oder haptisch auf folgende Parameter untersucht werden:

- *Abriebfestigkeit*
- *Ebenheit*
- *Homogenität*
- *Rissemphindlichkeit*

Wie die Oberflächenbeschaffenheit verschiedener Stampflehmgemische voneinander abweicht, kann der Abb. 62 entnommen werden, die beispielhaft den Unterschied zwischen Stampflehm aus grobkörniger und gemischtkörniger Gefügestruktur darstellt.

a) Stampflehm mit *grobkornreichem Gefüge*

Fotodarstellung

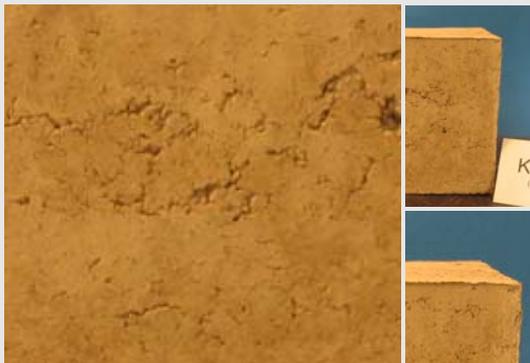


Beurteilung

- Oberfläche inhomogen, uneben
- Abplatzungen im Eckbereich, ausgebrochene Kanten
- geringe Abriebfestigkeit
- hohe Rissempfindlichkeit

b) Stampflehm mit *gemischtkörnigem Gefüge*

Fotodarstellung



Beurteilung

- Oberfläche homogen, eben, mit geringen Einschlüssen
- gerade, scharfe Kanten
- hohe Abriebfestigkeit
- geringe Rissempfindlichkeit

Abb. 62 Beispielhafte Prüfbeschreibung für die Oberflächenstruktur eines Probekörpers mit a) grobkörniger Zusammensetzung und b) gemischtkörniger Zusammensetzung

Entsprechend den eingangs angesprochenen Bewertungsschemen wird in den folgenden Diagrammen die vorgenommene qualitative Einschätzung für die untersuchten Materialeigenschaften dargestellt.

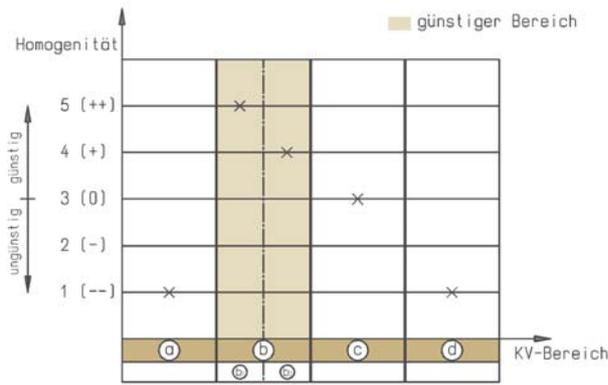


Abb. 63 Einschätzung der Homogenität für die untersuchten Probekörper

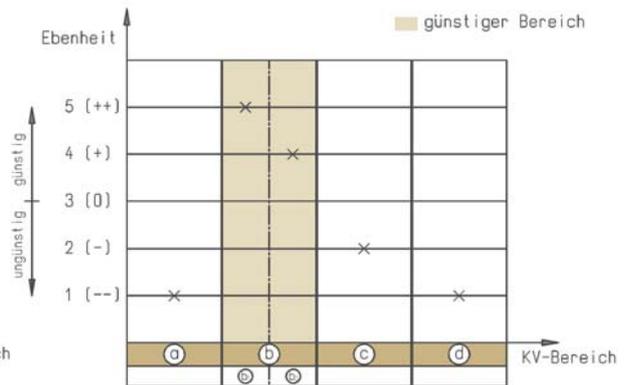


Abb. 64 Einschätzung der Ebenheit für die untersuchten Probekörper

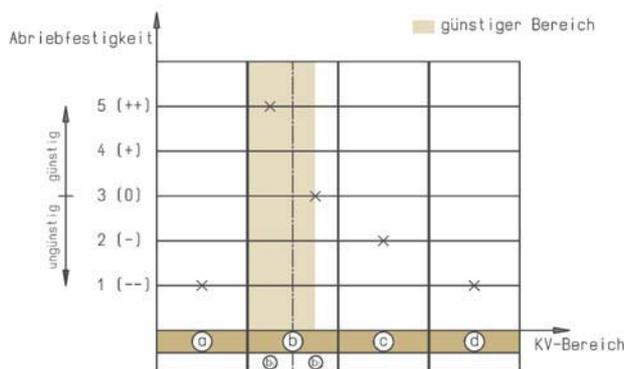


Abb. 65 Einschätzung der Abriebfestigkeit für die untersuchten Probekörper

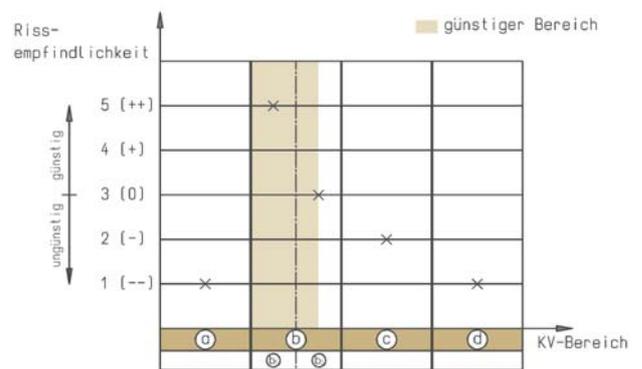


Abb. 66 Einschätzung der Rissempfindlichkeit für die untersuchten Probekörper

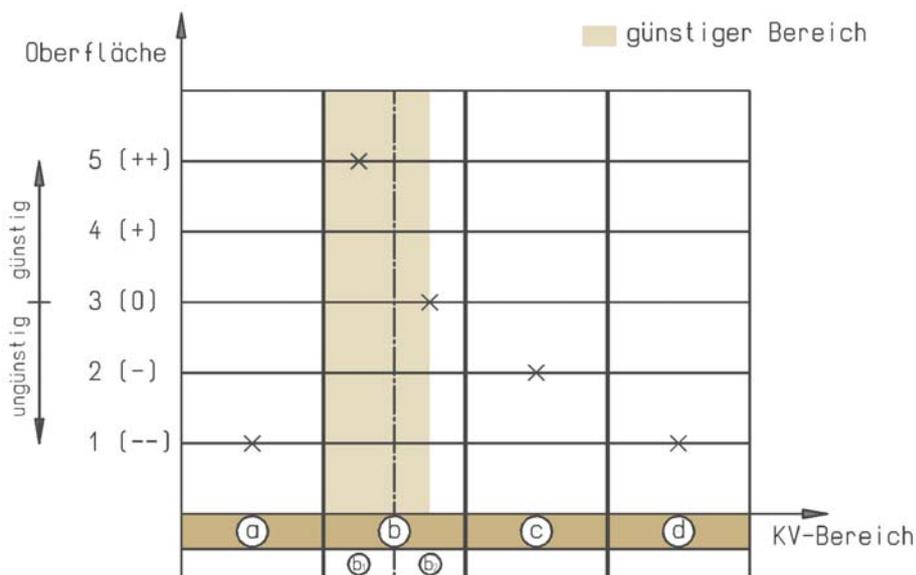


Abb. 67 Einschätzung der Oberflächenqualität beruhend auf den einzelnen Kriterien Homogenität, Rissempfindlichkeit, Abriebfestigkeit und Ebenheit für die untersuchten Probekörper

Die Untersuchung von Stoffgemischen mit einer variierenden Kornzusammensetzung in den *Bereichen a bis d* führten unter Berücksichtigung der Bewertungskriterien zu folgenden Ergebnissen, die nachstehend den jeweiligen Kornverteilungsbereichen zugeordnet, beschrieben werden:

Kornverteilungsbereich a – grobkornreiches Gefüge

Die Korngemische mit einem sehr hohen Grobkornanteil sind bereits aufgrund ihrer ungünstigen Verarbeitungseigenschaften für die Anwendung im Stampflehmbau **ungeeignet**. Von einer weiteren Betrachtung dieses Kornverteilungsbereiches im Untersuchungsprogramm wird deshalb abgesehen.

Kornverteilungsbereich $b_{1/2}$ – gemischtkörniges Gefüge

Stampflehme mit einer Kornverteilung in den Bereichen b_1 und b_2 können in Abhängigkeit der Stoffzusammensetzung sehr gute Verarbeitungseigenschaften aufweisen. Besonders gut sind diese im Grenzbereich zwischen b_1 und b_2 einzustufen.

Dies spiegelt sich in den ebenfalls guten Oberflächeneigenschaften wieder. Die Oberflächen der Probekörper weisen eine homogene, ebene Oberflächenstruktur, geringe Rissempfindlichkeiten sowie eine hohe Abriebfestigkeit auf.

Die Begrenzungen der Probekörper waren scharfkantig und es waren nach dem Ausschalen keine Abplatzungen im Eck- und Kantenbereich feststellbar.

Stampflehme mit einer Korngrößenverteilung im Bereich b_1 empfehlen sich besonders für die Herstellung von sichtbaren Oberflächen.

Kornverteilungsbereich c – feinkörniges Gefüge

Korngemische mit Sieblinien im Bereich c weisen einen sehr hohen Feinkorngehalt auf. Diese Stoffgemische verfügen über einen hohen Bindemittel- und Wasseranspruch, was sich ungünstig auf die Verarbeitungseigenschaften und damit auf die Oberflächenstruktur der Lehmkörper auswirkt. Typisch für die untersuchten Probekörper sind eine inhomogene, unebene Oberflächen mit einer geringen Abriebfestigkeit bzw. einer hohen Rissempfindlichkeit.

Kornverteilungsbereich d– sehr feinkörniges Gefüge

Diese Kornzusammensetzungen sind für die Herstellung von Stampflehmen gerade noch brauchbar, zur Ausführung von Sichtbauteilen jedoch **ungeeignet**.

Korngemische mit einer Korngrößenverteilung im Bereich d sind aufgrund sehr schlechter Verarbeitungseigenschaften für die Anwendung im Stampflehmbau **ungeeignet**.

Deshalb wird in den weiteren Betrachtungen von einer eingehenden Untersuchung des Bereiches abgesehen.

Rohdichte

Als Rohdichte eines Körpers wird dessen Trockenmasse bezogen auf das Volumen bezeichnet. Angaben zur Rohdichte von Stampflehm werden im Rahmen von Lastannahmen für statische Dimensionierungen benötigt und erlauben Rückschlüsse auf die bauphysikalischen Eigenschaften des Lehmstoffes.

Ziel der Untersuchungen ist es, die Rohdichte von Stampflehm in Abhängigkeit der Korngrößenzusammensetzung zu bestimmen, die Messwerte mit den Angaben der bestehenden Lehmbau Regeln zu vergleichen und im Zuge weiterer Untersuchungen Zusammenhänge zwischen der Rohdichte und dem Materialverhalten abzuleiten.

Ausgehend von den Verarbeitungseigenschaften konnte festgestellt werden, dass für die Herstellung von Stampflehm lediglich Gemische mit einer Korngrößenverteilung in den vorgegebenen Siebbereichen b und c geeignet sind. Kornzusammensetzungen im Bereich a und d sind für die Anwendung im Stampflehmabau ungeeignet und werden deshalb im weiteren Untersuchungsprogramm nicht berücksichtigt.

Für die Untersuchungen wird ein Grubenlehm (GL-1) durch Zugabe von Gesteinskörnungen (Edelbrechsand, Edelsplitt und Splitt) so modifiziert, dass die resultierenden Sieblinien innerhalb der Prüfbereiche b und c liegen. Für die Versuchsmischungen ergeben sich die im nachstehenden Diagramm gezeigten Rohdichten, die jeweils die Mindestwerte einer Versuchsreihe darstellen. (Versuchsprotokolle: Anhang 4)

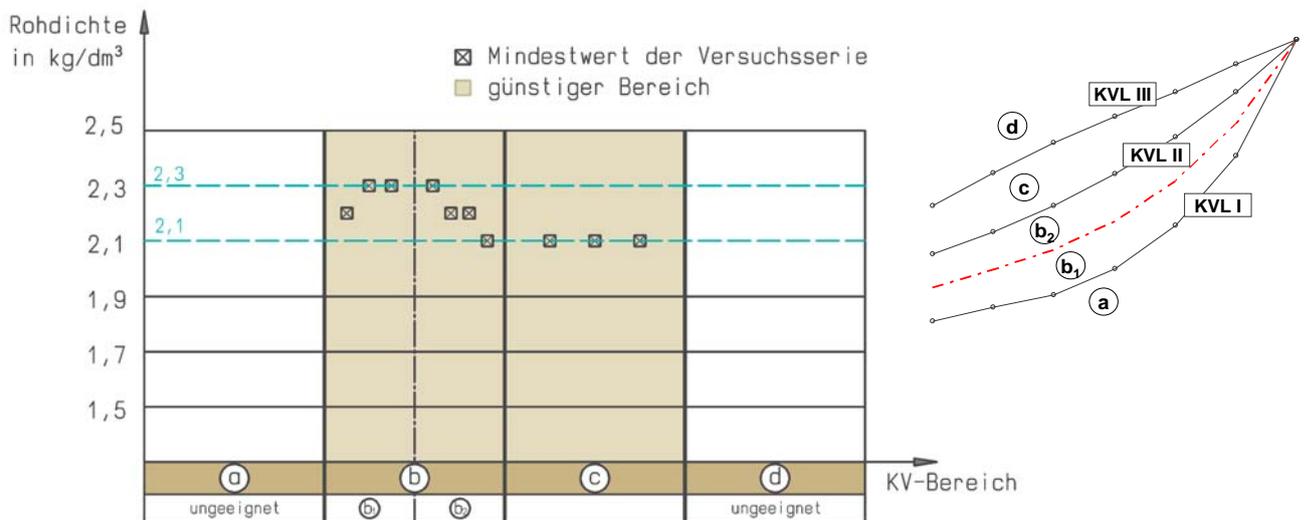


Abb. 68 Mindestwerte der ermittelten Rohdichten einer Versuchsreihe

Auswertung

Maximale Rohdichten konnten mit Kornverteilungen in den Siebbereichen b_1 und b_2 erreicht werden. Mit zunehmendem Fein- und Sandkorngesamtgehalt reduzierte sich die Rohdichte geringfügig. Stampflehme mit einer Kornzusammensetzung im Siebbereich c erreichten die vergleichsweise geringsten Rohdichten mit $\rho = 2,1 \text{ kg/dm}^3$.

In den bestehenden Lehm- und Tonbau Regeln wird für Neubauten empfohlen, Stampflehme mit einer Rohdichte von $1700 - 2400 \text{ kg/m}^3$ ($= 1,7 \text{ kg/dm}^3 - 2,4 \text{ kg/dm}^3$) zu verwenden. Der empfohlene Mindestwert von $1,7 \text{ kg/dm}^3$ konnte mit sämtlichen Korngemischen erreicht werden.

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit stellt für einen Baustoff, der tragende Funktionen erfüllen soll, eine entscheidende Dimensionierungsgröße dar.

Dass sich durch eine Optimierung der Kornzusammensetzung die Druckfestigkeit von Stampflehm steigern lässt, wird bereits in verschiedenen Literaturquellen erwähnt z.B. [Minke – 2004]; [Schneider et al – 1996] In diesen Veröffentlichungen wird auf die Fullerparabel bzw. auf eine Modifizierung derselben, als Orientierung für bestmögliche Lehmischungen verwiesen. Eine Einteilung in Kornbereiche, mit einer Zuordnung der zu erwartenden Eigenschaften fand bisher nicht statt. Vielmehr wird angenommen, dass eine Annäherung an die Fullerparabel bestmögliche Ergebnisse liefern wird. Systematische Untersuchungen dazu stehen bisher noch aus.

Hier sollen die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen der Korngrößenverteilung von Stampflehm und der Druckfestigkeit des Lehmbaustoffes anhand eines Beispiellehms festgestellt und dimensioniert werden.

Geprüft werden die eingangs definierten Kornbereiche b_1 , b_2 und c . Dazu wurde wie bisher ausschließlich der Naturlehm (Grubenlehm GL-1) als Ausgangsstoff verwendet, der durch Beimengung von Gesteinskörnungen ($>0,25$ mm) modifiziert wurde.

Die Verarbeitung der Lehmgemische erfolgte mit einer einheitlichen Konsistenz, die gemäß Knetprüfung (siehe 4.2.2.6) in den Zustand III eingeordnet wird. Die Versuche wurden gemäß Abschnitt 4.2.2.1 durchgeführt. Das Ergebnis dieser Untersuchungen kann den nachstehenden Abbildungen entnommen werden.

Dazu werden in den Abb. 69 und Abb. 70 für die untersuchten Stampflehmgemische mit einer Korngrößenverteilung in den Bereichen b_1 , b_2 und c die messtechnisch ermittelten Druckfestigkeiten angegeben. Die Messwerte in Abb. 69 stellen die in den Versuchsserien erreichten Mindestwerte dar. Die Versuchsprotokolle sind in Anhang 4 beigefügt.

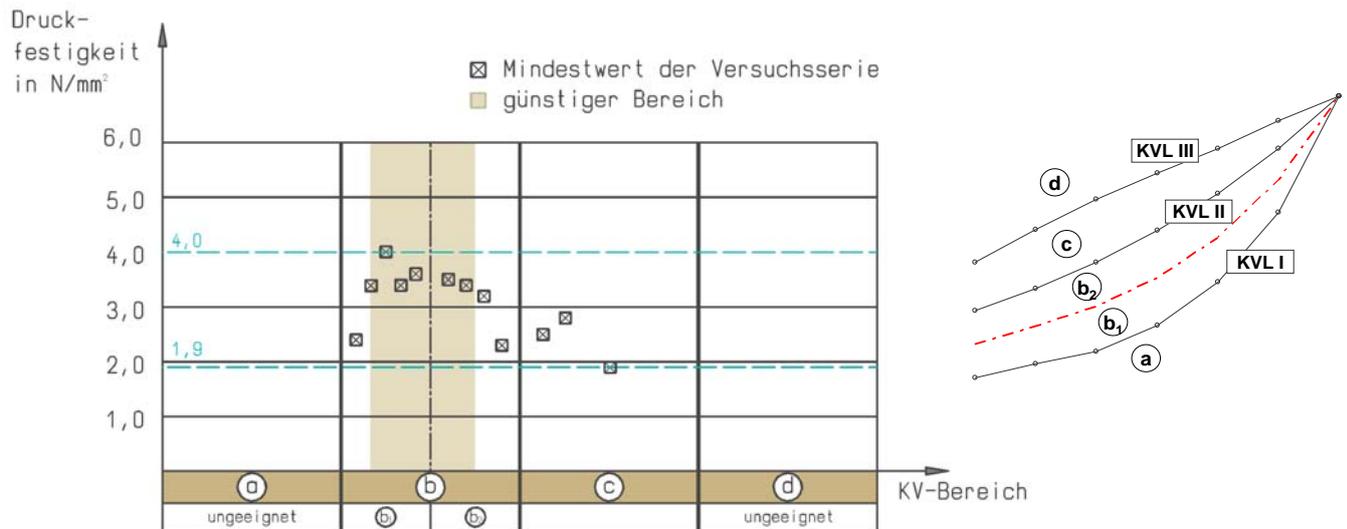


Abb. 69 Druckfestigkeiten von Stampflehmgemischen mit einer Kornverteilung in den Siebbereichen b_1 , b_2 und c – Darstellung der kleinsten Einzelwerte der Versuchsserien

Im Rahmen der Vergleichsmessungen wurden Mindest-Druckfestigkeiten von $1,9 \text{ N/mm}^2$ bis $4,0 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.

Das Maximum der Mindest-Druckfestigkeiten konnte für Kornverteilungen im Siebbereich b nahe der Grenzlinie zwischen b_1 und b_2 festgestellt werden, deren Festigkeiten nicht den Wert von 3 N/mm^2 unterschritten.

Lehmgemische mit einer Kornverteilung im Siebbereich c verfügen über einen hohen Fein- und Sandkornanteil. Diese Kornzusammensetzungen führten zu vergleichsweise geringen Festigkeiten. Es wurden Druckfestigkeiten von $1,9$ bis $2,8 \text{ N/mm}^2$ erreicht.

Diese Ergebnisse werden durch eine Auswertung der maximalen ermittelten Druckfestigkeiten einer Versuchsreihe gestützt, die in der Abb. 70 dargestellt werden.

Die maximalen Druckfestigkeiten weisen einen ähnlichen Verlauf wie die Mindestwerte auf und konnten im Grenzbereich zwischen b_1 und b_2 Werte von annähernd 5 N/mm^2 erreichen.

In den bestehenden Lehmbau Regeln werden für Stampflehme keine Mindestdruckfestigkeiten gefordert. Jedoch werden für Stampflehmgemische mit Kies Druckfestigkeiten angegeben, die aus Erfahrungswerten abgeleitet wurden und in einem Bereich von 3 – 5 N/mm^2 liegen.

Mit den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass Kornverteilungslinien (Ausgangsstoffe Naturlehm GL - 1 und Gesteinskörnungen), die sich in den Grenzbereich von b_1 und b_2 einordnen, Mindestdruckfestigkeiten größer 3 N/mm^2 erreichten.

Die Empfehlungen der Lehmbau Regeln konnten damit eingehalten werden.

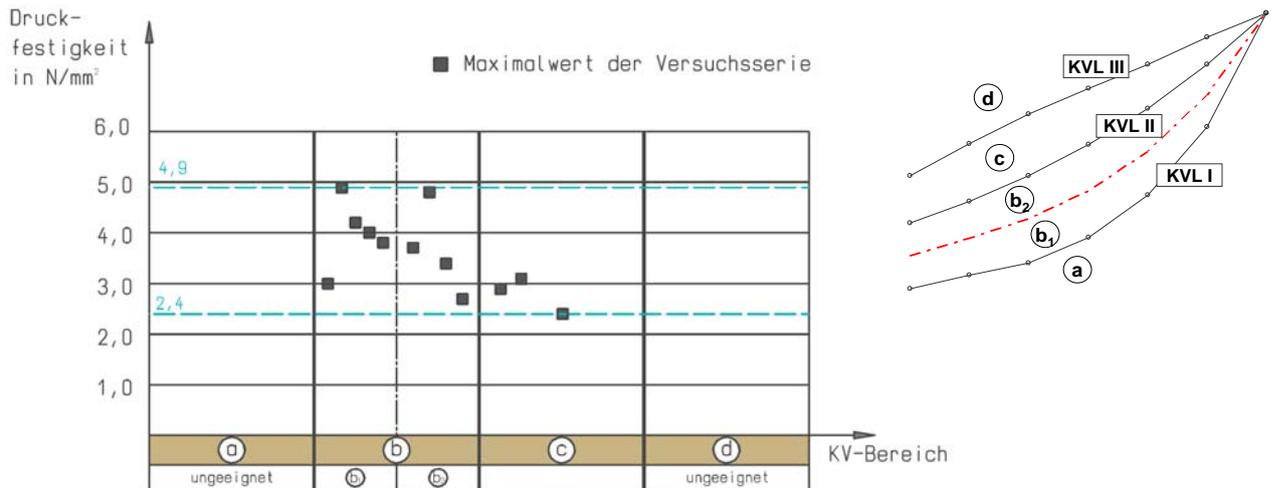


Abb. 70 Druckfestigkeiten von Stampflehmgermischen mit einer Kornverteilung in den Siebbereichen b_1 , b_2 und c - Darstellung der größten Einzelwerte der Versuchsserien

Abgleich Ergebnisse mit der Fuller-Parabel

Weiterhin wird geprüft inwieweit die gefundenen günstigen Kornverteilungsbereiche mit den eingangs zitierten Literaturangaben übereinstimmen.

Dazu werden die günstigen Kornverteilungslinien, der Fuller-Parabel und einer modifizierten Fuller-Parabel nach Boemanns [Minke-2004] gegenüber gestellt. Boemanns (1989) wies bereits daraufhin, dass die Fullerparabel nicht direkt auf den Lehmabbau anwendbar ist, da die Fullerparabel lediglich einen Tongehalt von 2 – 3 % abbilden würde. Boemanns empfiehlt deshalb einen Mindest-Feinstkornanteil ($d < 0,002 \text{ mm}$) von beispielsweise 10 % anzusetzen und die darüber liegende Kornverteilungsbereich mit einer modifizierten Fuller-Parabel durch nachstehender Formel zu berechnen:

$$a_{10} = 90 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} + 10 \quad [4.6]$$

Dabei ist

- a – Gewichtsanteil aller Körner deren Durchmesser kleiner als d ist
- D – Größtkorn
- d – betrachteter Korndurchmesser

Eine Einordnung der Fullerparabel und der modifizierten Parabel nach Boemanns in die definierten Kornverteilungsbereiche kann der Abb. 71 entnommen werden.

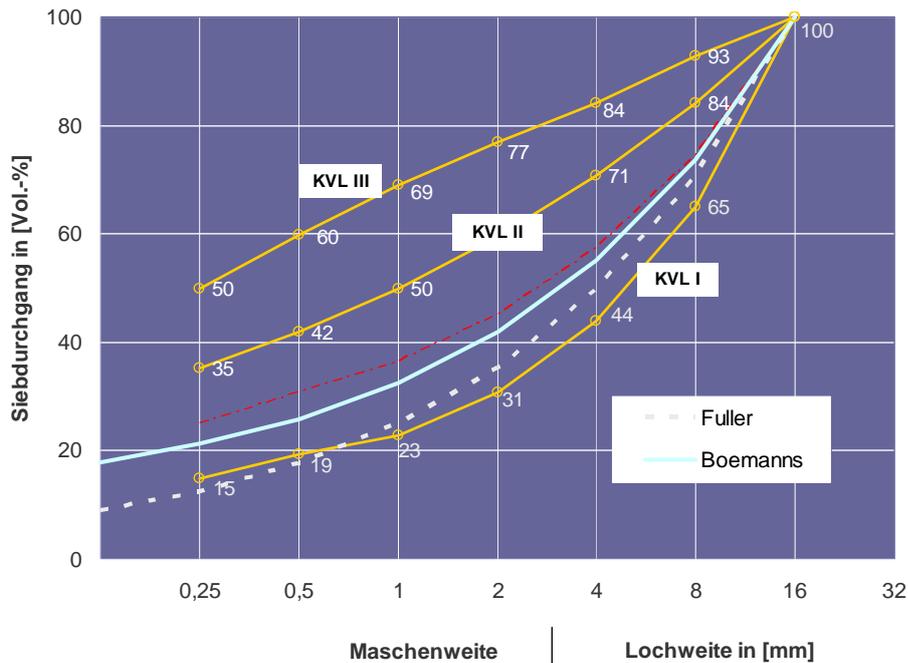


Abb. 71 Einordnung Fuller-Parabel und Parabel nach Boemanns in die definierten Kornverteilungsbereiche

Wie aus der Abbildung ersichtlich, verläuft die Fuller-Parabel in Teilbereichen außerhalb der definierten Kornverteilungsbereiche, in denen eine Herstellung von Stampflehmgemischen nur möglich war. Untersuchte Kornverteilungslinien, die im Nahbereich der Fuller-Parabel verliefen, wiesen fast durchgängig Materialeigenschaften auf, die sich nicht für den Einsatz im Stampflehmbau empfehlen.

Die Kornverteilungslinie nach Boemanns ordnet sich in den Bereich ein, in dem durchgängig hohe Druckfestigkeiten festgestellt werden konnten. Der Ansatz von Boemanns fügt sich somit in die vorliegenden Ergebnisse ein.

Die Untersuchungen zeigen jedoch auch, dass die gefundenen, günstigen Kornverteilungslinien (Mindestdruckfestigkeit größer $3,0 \text{ N/mm}^2$), nur unzureichend durch eine Parabelgleichung rechnerisch beschrieben werden können. Vielmehr kann auf Basis der Untersuchungsergebnisse ein Kornverteilungsbereich mit guten Druckfestigkeiten (siehe Abb. 72 schraffierter Bereich) definiert werden.

Die nach Boemanns vorgeschlagene Parabel stellt dabei in guter Näherung die untere Grenze dieses Bereiches dar.

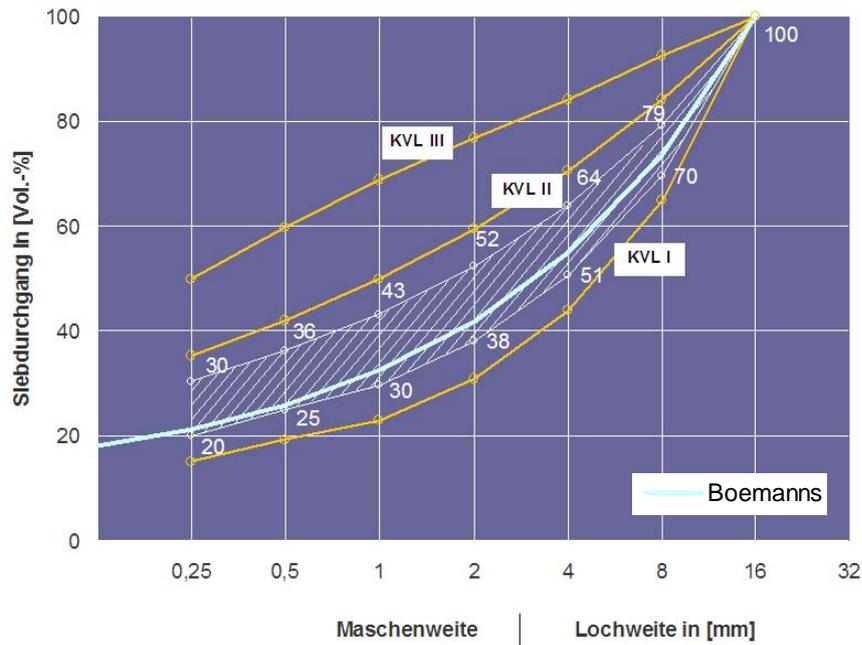


Abb. 72 Darstellung der Kornverteilungsbereiche b und c und Einordnung der Parabel nach Boemanns und dem gefundenen Bereich für günstige Druckfestigkeiten

Schwindmaß

Das Schwindmaß zählt neben der Druckfestigkeit zu den wichtigsten Prüfgrößen im Stampflehmbau. Um in Lehmbauteilen Risse zu vermeiden, die sich gefährdend auf die Tragfähigkeit auswirken können, muss das Schwindmaß festgestellt und begrenzt werden.

Ziel der Untersuchungen ist es, den Einfluss der Korngrößenzusammensetzung von Stampflehm auf das Schwindmaß zu überprüfen und festzustellen, ob und ggf. inwieweit durch eine Optimierung der Kornverteilung das Schwindmaß maßgeblich begrenzt werden kann.

Gemäß dem in Abschnitt 4.2.2.4 beschriebenen Prüfverfahren werden Probekörper mit einer Kornverteilung in den definierten Kornbereichen b_1 , b_2 und c untersucht. Als Ausgangsstoff dafür dient, wie in den vorhergehenden Untersuchungen, der Naturlehm GL-1, der durch Beimengung von Gesteinskörnungen (>0,25 mm) modifiziert wird.

Maßgebend für die Versuche war die Auswertung des Endschwindmaßes, das sich mit Erreichen der Ausgleichsfeuchte einstellt.

In Abb. 73 werden die messtechnisch ermittelten Endschwindmaße der Versuchsreihen, den jeweiligen Kornbereichen zugeordnet, dargestellt. Die aufgeführten Werte entsprechen dem gemessenen Maximalwert einer Versuchsreihe. (Versuchsprotokolle: Anhang 4)

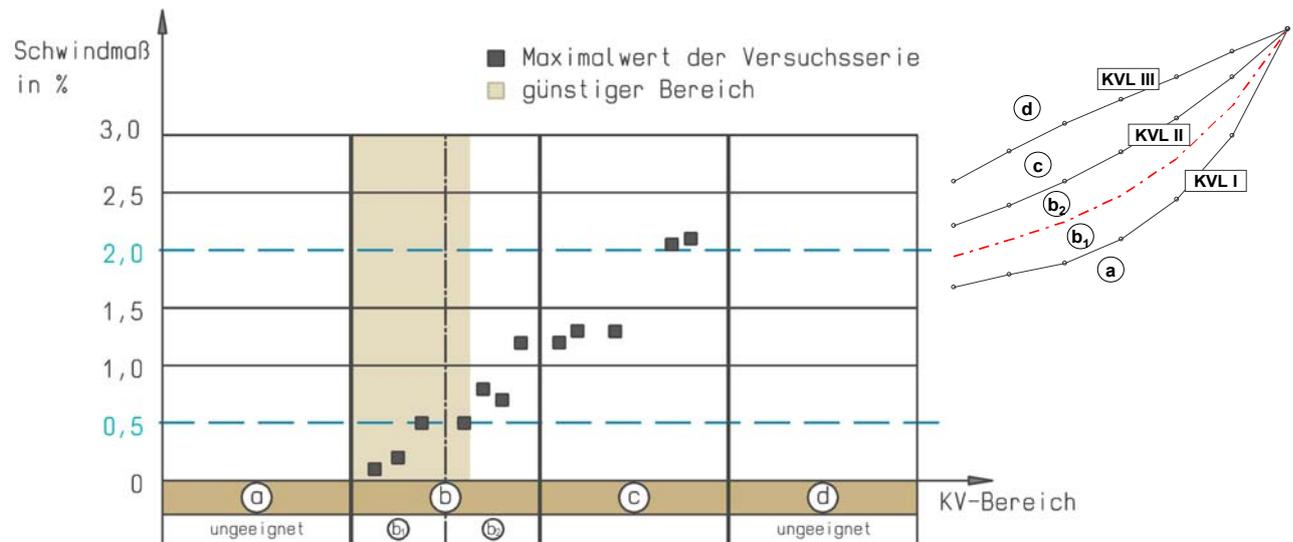


Abb. 73 Schwindmaß von Stampflehmgemischen mit einer Kornverteilung in den Siebbereichen b_1 , b_2 und c

Nach [Ziegert – 2005] hat sich in der Praxis gezeigt, dass bei Stampflehmoberflächen sichtbare Risse in der Regel vermieden werden konnten, wenn das Schwindmaß auf 0,5 % beschränkt wurde.

Ein Endschwindmaß von $\leq 0,5$ % konnte mit Stoffgemischen mit einer Kornverteilung im Bereich b_1 sowie im Grenzbereich $b_1 - b_2$ eingehalten werden. Diese Korngemische würden sich gemäß [Ziegert – 2005] besonders für die Ausführung von Sichtbauteilen empfehlen.

Stampflehme mit einer Kornverteilung im Siebbereich b_2 sowie im Grenzbereich $b_2 - c$ wiesen Schwindmaße in einer Größenordnung von 0,8 % bis 1,3 % auf. Damit wären sichtbare Risse in der Stampflehmoberfläche nicht auszuschließen. Aufgrund möglicher aufwendiger Nachbehandlungen wären diese Stoffgemische nicht für die Ausführung von Sichtbauteilen geeignet.

Die Gefüge mit einer Kornverteilung im Bereich c verfügen über einen großen Feinkornanteil mit einem hohen Wasseranspruch und weisen deshalb ausgeprägte Schwindeigenschaften auf.

Für diesen Kornverteilungsbereich konnten Endschwindmaße über 2 % festgestellt.

Damit wären die Anforderungen der Lehmbau Regeln nicht erfüllt, die für Stampflehmteile, ohne repräsentativen Charakter, ein Endschwindmaß von maximal 2 % zulassen.

Elastizitätsmodul

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.2.2.2 - *Statischer Elastizitätsmodul*, beschriebenen Versuchsdurchführung wurde exemplarisch für die definierten Kornbereiche Stampflehmgemische hergestellt und der elastische statische Elastizitätsmodul bestimmt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abb. 74 dargestellt. (Versuchsprotokolle: Anhang 4)

Ein vergleichsweise hoher Elastizitätsmodul konnte mit Stampflehmgemischen erreicht werden, die gemäß ihrer Kornzusammensetzung dem Grenzbereich b_1/b_2 zugeordnet werden. Der maximal erreichte Elastizitätsmodul betrug 427 N/mm^2 .

Zwischen dem Elastizitätsmodul und der Druckfestigkeit konnte ein qualitativer Zusammenhang festgestellt werden. Bereiche bzw. Stampflehmgemische mit hohen Druckfestigkeiten wiesen ebenfalls einen verhältnismäßig hohen Elastizitätsmodul auf. Mit der begrenzten Stichprobenanzahl können jedoch keine quantitativen Aussagen getroffen werden. Hierzu wären umfangreiche weitere Prüfungen erforderlich.

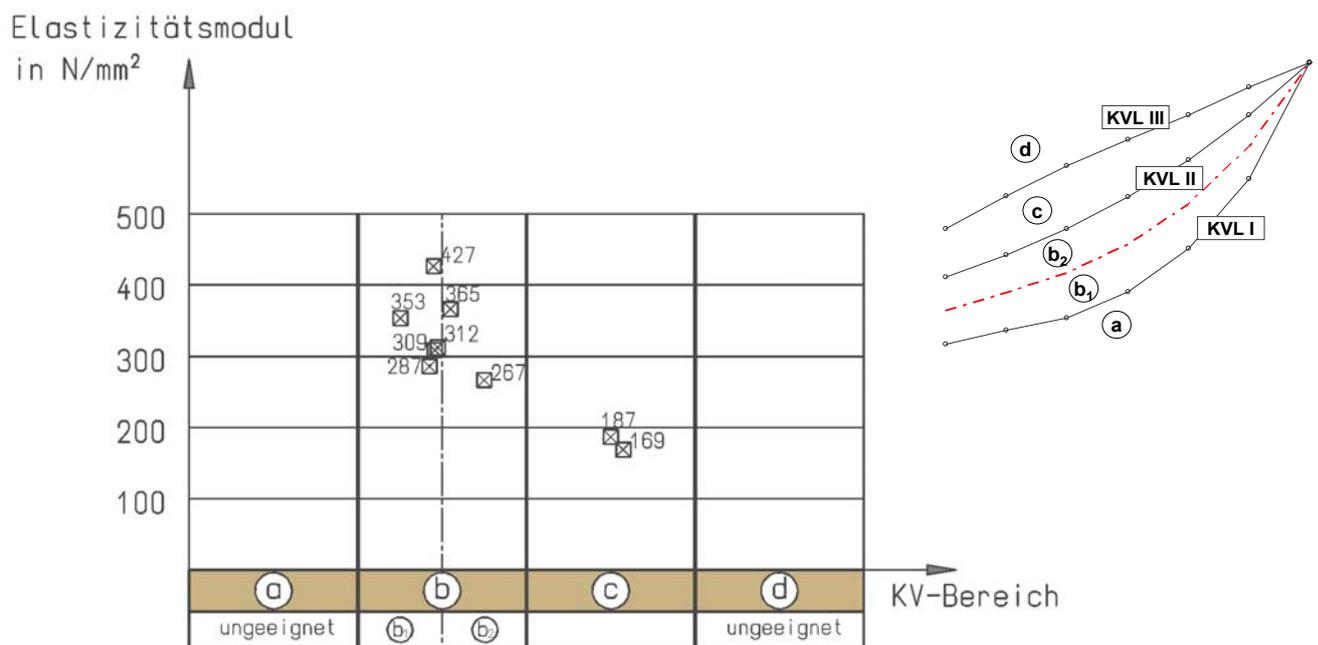


Abb. 74 Elastizitätsmodul von Stampflehmgemischen mit einer Kornverteilung in den Siebbereichen b_1 , b_2 und c

Zusammenfassung

Mit den in diesem Abschnitt dargelegten Untersuchungen konnten grundlegende Kenntnisse über die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen der Kornzusammensetzung und den Materialeigenschaften des Lehmbaustoffes gewonnen werden.

Dazu wurden Vergleichsmessungen an Stampflehmgemischen mit unterschiedlicher Kornverteilung durchgeführt.

Die Zusammensetzung der Prüfgemische wurde so gewählt, dass damit die Kornverteilungsbereiche a bis d (siehe Abb. 75) in ihrer Gesamtheit abgebildet werden konnten. Durch das Abfahren der einzelnen Bereiche wurde der Einfluss der Kornverteilung auf die Stampflehmeigenschaften systematisch überprüft und Rückschlüsse auf die optimale Kornzusammensetzung von Stampflehm gezogen.

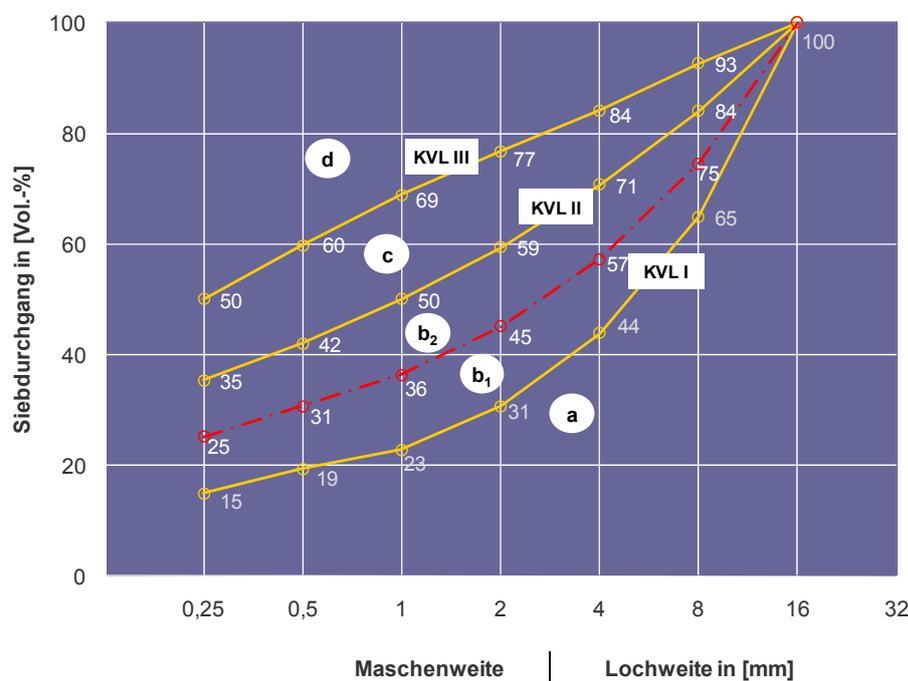


Abb. 75 Darstellung der definierten Kornverteilungsbereiche

Dabei wurde festgestellt, dass das Korngefüge mit einer Siebverteilung in den Bereichen a und d aufgrund der ungünstigen Verarbeitungseigenschaften für die Anwendung im Stampflehmbau nicht geeignet sind. Im Rahmen der weiteren Betrachtungen wurde deshalb von näheren Untersuchungen sehr grob- bzw. sehr feinkörniger Gefügestrukturen abgesehen. Das Untersuchungsprogramm konzentrierte sich somit auf Lehmgemische mit einer Kornverteilung in den Bereichen b_1 , b_2 und c.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass in Abhängigkeit des Kornverteilungsbereiches bereits geringfügige Variationen in der Korngrößenverteilung des Stoffgemisches die Materialeigenschaften von Stampflehm maßgeblich beeinflussen können. Insbesondere Stoffeigenschaften wie die Druckfestigkeit und das Schwindmaß sowie die Oberfläche des

Lehmkörper weisen in Teilbereichen eine hohe Sensibilität gegenüber Änderungen des Korngefüges auf.

Eine qualitative Zuordnung der festgestellten Materialeigenschaften zu den untersuchten Kornverteilungsbereichen a bis d kann der nachstehenden Abb. 76 entnommen werden, in der die Materialeigenschaften in die Bewertungskategorien **günstig**, **brauchbar** und **nicht brauchbar** eingeordnet werden. Die Zuordnung der messtechnisch ermittelten Materialeigenschaften erfolgte nach dem in Tab. 26 dargestellten Bewertungsschlüssel. Als **optimal** wird der Bereich bezeichnet, in dem sämtliche Stoffeigenschaften übereinstimmend als günstig eingestuft werden.

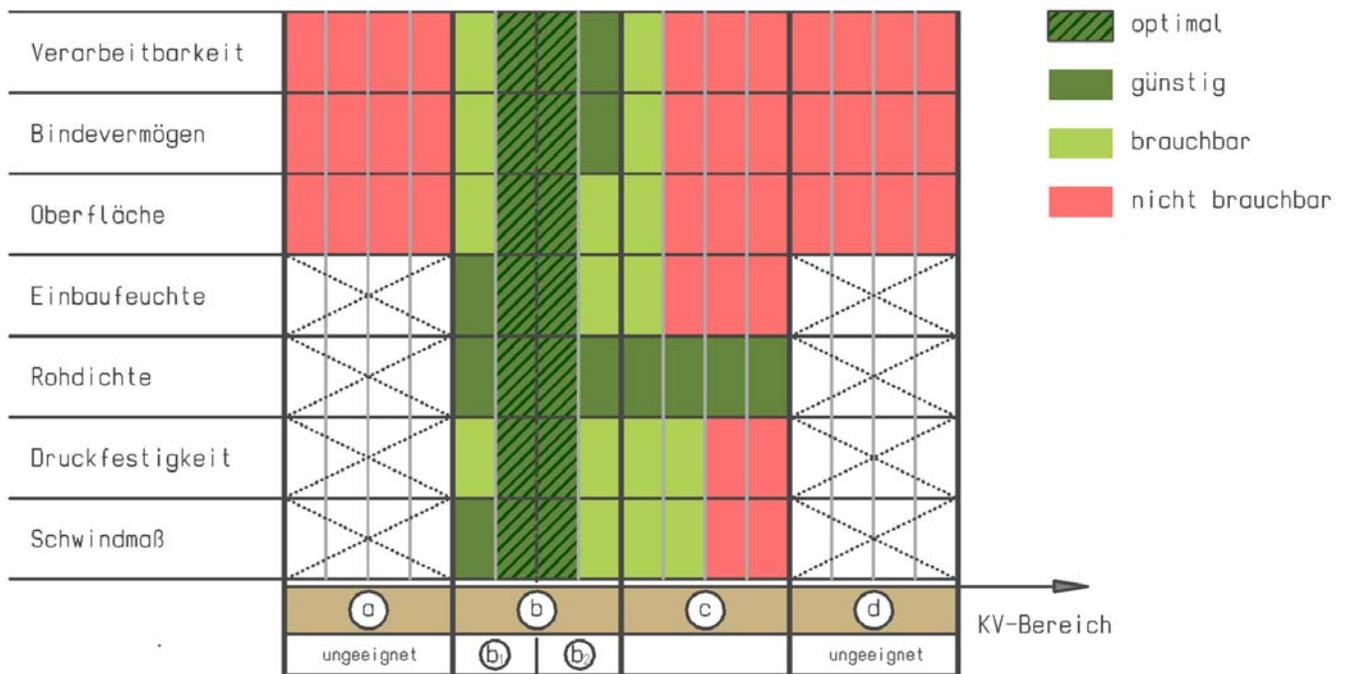


Abb. 76 Qualitative Bewertung der Stoffeigenschaften in Abhängigkeit der Kornzusammensetzung (Kornverteilungsbereich a-d)

Tab. 26 Bewertungsschlüssel für Abb. 76

	nicht brauchbar	brauchbar	günstig
Verarbeitbarkeit	nicht verarbeitbar	verarbeitbar	gute Verarbeitbarkeit
Bindevermögen	Knetprüfung Zustand I o. IV	Knetprüfung Zustand II	Knetprüfung Zustand III
Oberfläche	Oberfläche inhomogen, uneben und nicht abriebfest	mindestens ein Kriterium wie eine homogene, ebene oder abriebfeste Oberfläche war nicht erfüllt	Oberfläche homogen, eben und abriebfest
Einbaufeuchte	sehr hoher Wasseranspruch zum Erreichen Zustand III (im Versuchsprogramm Einbaufeuchte > 12 %)	hoher Wasseranspruch zum Erreichen Zustand III (im Versuchsprogramm Einbaufeuchte 10 - 12 %)	geringer Wasseranspruch zum Erreichen Zustand III (im Versuchsprogramm Einbaufeuchte 7-9 %)
Rohdichte	< 1,7 kg/dm ³	> 1,7 kg/dm ³	> 1,7 kg/dm ³
Druckfestigkeit	< 2,0 N/mm ²	> 2,0 N/mm ² < 3,0 N/mm ²	> 3,0 N/mm ²
Schwindmaß	> 2,0 %	> 0,5 % < 2,0 %	< 0,5 % für Sichtbauteile < 2,0 % für andere Bauteile

Die farbliche Darstellung unterstreicht die hohe Sensibilität der Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Kornzusammensetzung.

Günstige Verarbeitungs- und Materialeigenschaften konnten bei Stampflehmen mit einer Kornverteilung in den Bereichen b_1 und b_2 festgestellt werden. Im Übergangsbereich zwischen b_1 und b_2 konnte eine Übereinstimmung aller günstigen Bewertungskriterien erreicht werden. Basierend auf den Ergebnissen der Vergleichsmessungen stellt dieser Bereich die optimale Kornzusammensetzung für Stampflehmgemische dar. Angesichts der günstigen Eigenschaften sind Lehmgemische mit einer Kornzusammensetzung im Grenzbereich b_1 - b_2 besonders für Sichtbauteile geeignet, an welche hohe Anforderungen an die optische Qualität und die Einhaltung eines geringen Schwindmaßes gestellt werden.

Kornverteilungslinien im Siebbereich c sind größtenteils ungünstig für die Anwendung im Stampflehmbau, da mit zunehmendem Feinkorngehalt ebenfalls der Wasseranspruch steigt, um das Gemisch aufbereiten und verarbeiten zu können.

Das Ergebnis der Untersuchungen ist die Eingrenzung eines Bereiches, in dem Stampflehmgemische mit günstigen Materialeigenschaften liegen. Dieser Bereich wird in der nachstehenden Grafik schraffiert dargestellt.

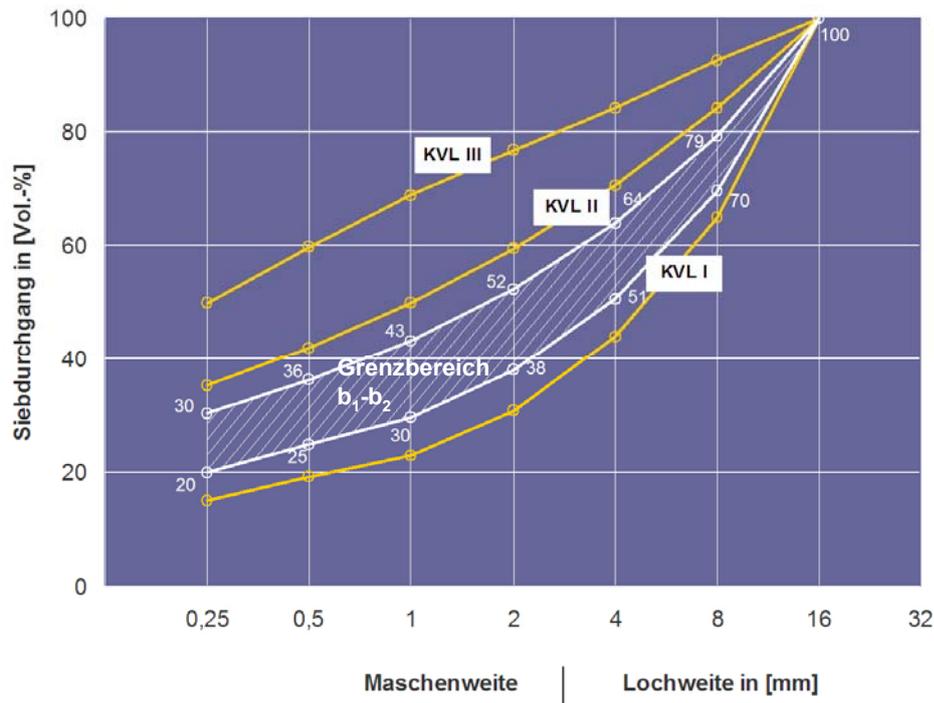


Abb. 77 Darstellung Kornverteilungsbereich mit optimalen Materialeigenschaften

Vergleich mit den Sieblinien nach DIN 1045-2

Für Stampflehmgemische wurden geeignete Kornverteilungsbereiche gefunden, die zu günstigen Stoffeigenschaften führen.

Eine Rückführung der Kornverteilungslinien von Stampflehmgemischen in Sieblinien von Gesteinskörnungen wie die Regelsieblinien nach DIN 1045-2 ist rechnerisch nicht eindeutig durchführbar. Dies liegt darin begründet, dass in Grubenlehm bereits Anteile des Bindemittels und der mineralischen Zuschlagstoffe enthalten sind.

Um dennoch Aussagen zur Anwendbarkeit der Regelsieblinien nach DIN 1045-2 zu ermöglichen wurde aus allen Lehmgemischen der Gehalt an Korngrößen kleiner 0,25 mm herausgerechnet und der übliche Anteil für das Mehlkorn aus der Gesteinskörnung rechnerisch berücksichtigt.

In Abb. 78 wurde beispielhaft für Lehmgemische mit optimalen Baustoffeigenschaften der Verlauf der Kornverteilungslinien in dem Schaubild nach DIN 1045-2 (für ein Größtkorn von 16 mm) dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass Stampflehmmischungen mit optimalen Materialeigenschaften einen Sieblinienverlauf der Gesteinskörnungen aufweisen, der zwischen den Regelsieblinien A16 und B16 liegt.

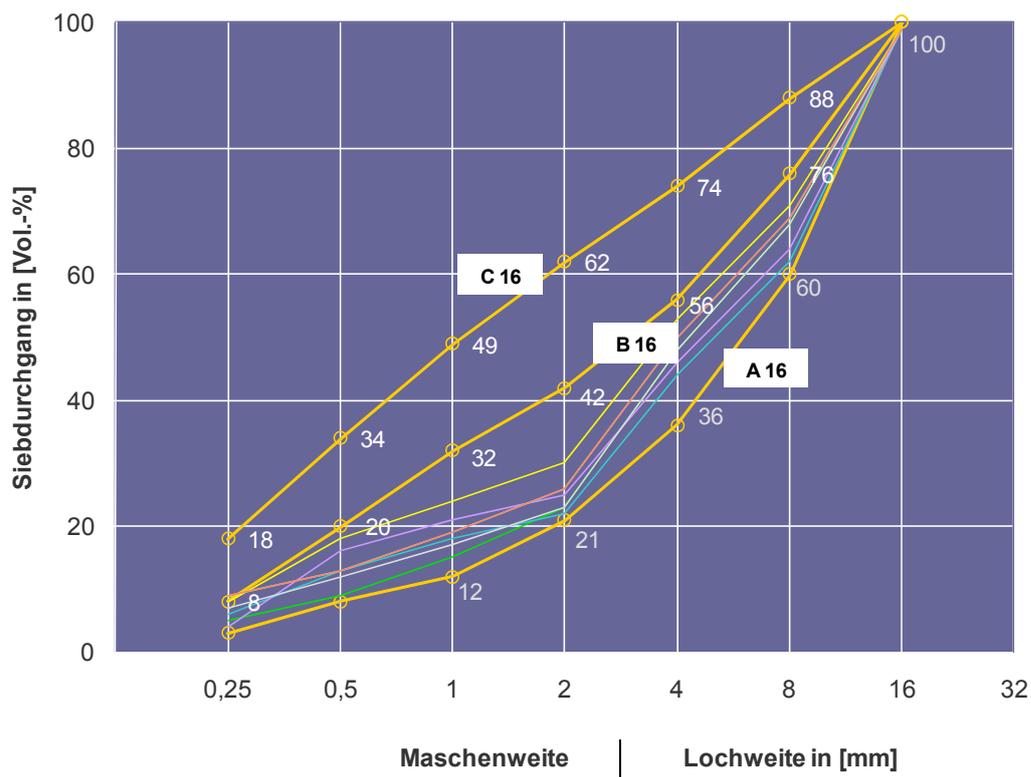


Abb. 78 Darstellung von Sieblinienvläufen für Gesteinskörnungen von Stampflehmgemischen im Schaubild nach DIN 1045-2 (Größtkorn 16 mm)

4.3.2 Feinkornanteil – Einfluss und Zusammensetzung

Gemäß DIN 18123 – *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Bestimmung der Korngrößenverteilung* – werden im Allgemeinen als Feinkorn Körner mit einem Durchmesser kleiner 0,063 mm bezeichnet und speziell in die Fraktionen Feinstes ($d < 0,002$ mm) und Schluff ($0,002$ mm $< d < 0,063$ mm) aufgeteilt.

Die Tonminerale – als Gesteinspartikel - sind dabei hauptsächlich Bestandteil der Feinstkornfraktion, können aber auch aufgrund ihrer Partikelgröße der Schlufffraktion zugeordnet werden. Dies zeigen bereits die in Abschnitt 3.3.4 dargestellten Ergebnisse, bei denen ein wesentlicher Anteil der Tonminerale der Schlufffraktion zugeordnet werden kann.

Die bisherigen Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass für Stampflehmgemische Grenzwerte für den Gesamtfeinkornanteil einzuhalten sind, um eine Verarbeitbarkeit zu gewährleisten.

Durch weitere Analysen von Stampflehmgemischen und deren Eigenschaften sollen nunmehr diese Aussagen durch die Beantwortung folgender Fragestellungen präzisiert werden:

- Ist es für den Stampflehmbau ausreichend, einen Gesamtanteil an Korngrößen $d < 0,25$ mm zu definieren, und wenn ja, wie hoch muss dieser sein?
- Ist für Stampflehmgemische ein Mindest-Schluffgehalt erforderlich?
- Gibt es signifikante Grenzen für das erforderliche Verhältnis zwischen bindigen und nichtbindigen Bestandteilen?
- Ist im Feinkornbereich ein gleichförmiger Verlauf der Kornverteilung notwendig?
- Beeinflusst die Zusammensetzung der bindigen Bestandteile (Art der Tonminerale) die Materialeigenschaften?

Dazu wurden auf Basis der eingangs analysierten Grubenlehme, Versuchsmischungen, unter Zugabe von Gesteinskörnungen und Wasser, hergestellt und auf ihre Verarbeitungseigenschaften überprüft.

Als Zielvorgabe wird dabei das Erreichen des Zustandes III gemäß Knetprüfung (siehe Abschnitt 4.2.2.6) gesetzt. Die Verarbeitbarkeit wird als Bewertungskriterium herangezogen, da durch die bisherigen Untersuchungen belegt werden konnte, dass Stampflehmgemische mit sehr guten Verarbeitungseigenschaften ebenfalls günstige Materialeigenschaften aufweisen.

Frage: Ist es für den Stampflehmbau ausreichend, einen Gesamtanteil an Korngrößen $d < 0,25$ mm zu definieren, und wenn ja, wie hoch muss dieser sein?

In dem Diagramm Abb. 79 wird für die untersuchten Versuchsmischungen in Abhängigkeit des Tonmineralgehaltes der Gesamtanteil an Mineralen mit $d < 0,25$ mm dargestellt.

Stampflehmgemische mit optimalen Verarbeitungseigenschaften werden dabei durch einen Kreis gekennzeichnet.

Optimale Verarbeitungseigenschaften konnten in Abhängigkeit des gewählten Grubenlehmes - als Ausgangsstoff - erreicht werden, wenn der Kornanteil mit $d < 0,25$ mm zwischen 21,0 und 28,6 M - % lag.

Diese Feststellung deckt sich mit dem in Abschnitt 0 definierten optimalen Kornverteilungsbereich, der für Körner $d < 0,25$ mm einen Gesamtanteil von 20 M - % bis 30 M - % definiert.

Insofern sollte für Stampflehmgemische der Gesamtanteil $d < 0,25$ mm möglichst im Bereich von 20 M - % bis 30 M - % liegen, um optimale Materialeigenschaften zu erzielen.

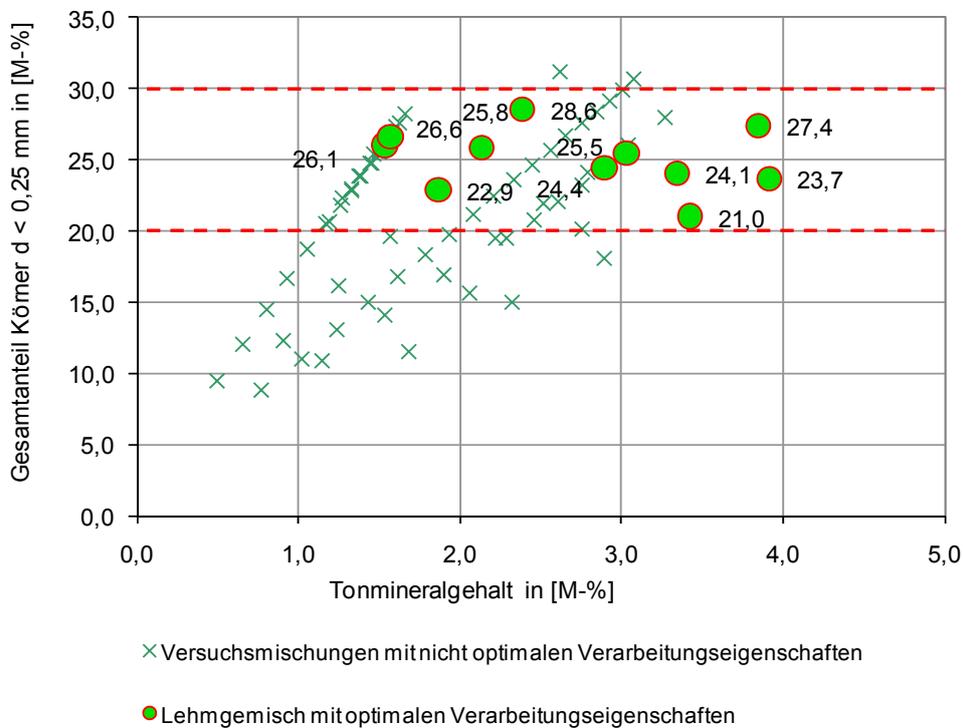


Abb. 79 Zusammenhang Tonmineralgehalt zum Gesamtanteil der Körner mit $d < 0,25$ mm

Frage: Ist für Stampflehmgemische ein Mindest-Schluffgehalt erforderlich?

In dem Diagramm (Abb. 80) wird für die untersuchten Prüfmischungen in Abhängigkeit des Tonmineralgehaltes der Schluffgehalt dargestellt. Dabei wird deutlich, dass für die Herstellung von Stampflehmgemischen mit optimalen Verarbeitungseigenschaften ein Mindest-Schluffgehalt von ca. 10 M - % erforderlich war.

Der Großteil der Versuchsmischungen mit sehr guten Verarbeitungseigenschaften befand sich in diesem Nahbereich von 10 M - %.

Stampflehme, mit dem Ausgangslehm GL-1, der sich durch einen sehr hohen Schluffgehalt auszeichnet, wiesen bei sehr guten Verarbeitungseigenschaften einen Schluffgehalt bis zu 23,6 M - % auf. Dieser hohe Schluffanteil wurde durch geringe Kornanteile in den darüber liegenden Bereichen kompensiert, so dass insgesamt ein Anteil an Korngrößen $d < 0,25 \text{ mm}$ kleiner 30 M - % zu verzeichnen war.

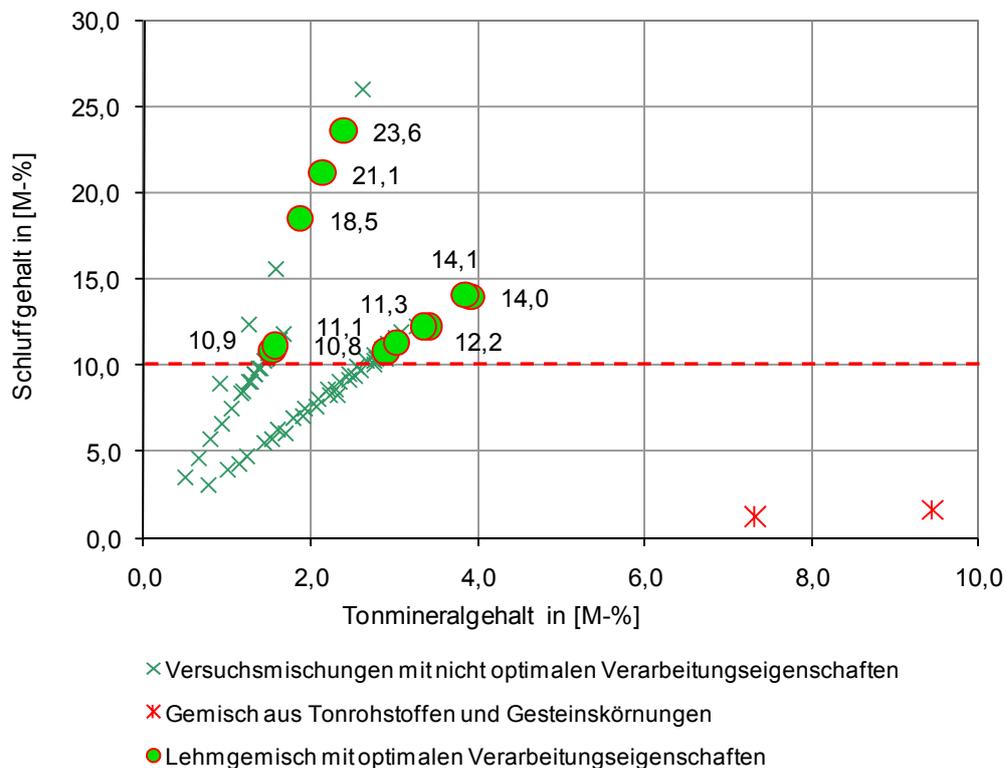


Abb. 80 Zusammenhang Tonmineralgehalt zum Schluffgehalt (Körner $0,002 < d < 0,063 \text{ mm}$)

Frage: Gibt es signifikante Grenzen für das erforderliche Verhältnis zwischen bindigen und nichtbindigen Bestandteilen?

In dem Diagramm (Abb. 81) ist für die untersuchten Prüfmischungen das Verhältnis von nichtbindigen Bestandteilen ($d < 0,25$ mm) zu bindigen Bestandteilen in Abhängigkeit des Tonmineralgehaltes dargestellt. Lehmgemische mit optimalen Verarbeitungseigenschaften wiesen einen Verhältniswert von 5,1 bis 16,0 auf. Hierbei konnten keine rechnerischen Gesetzmäßigkeiten zwischen den Massenanteilen des Tonmineralgehaltes und dem Verhältnis zwischen dem Anteil nichtbindiger Bestandteile ($d < 0,25$ mm) und bindiger Bestandteile festgestellt werden.

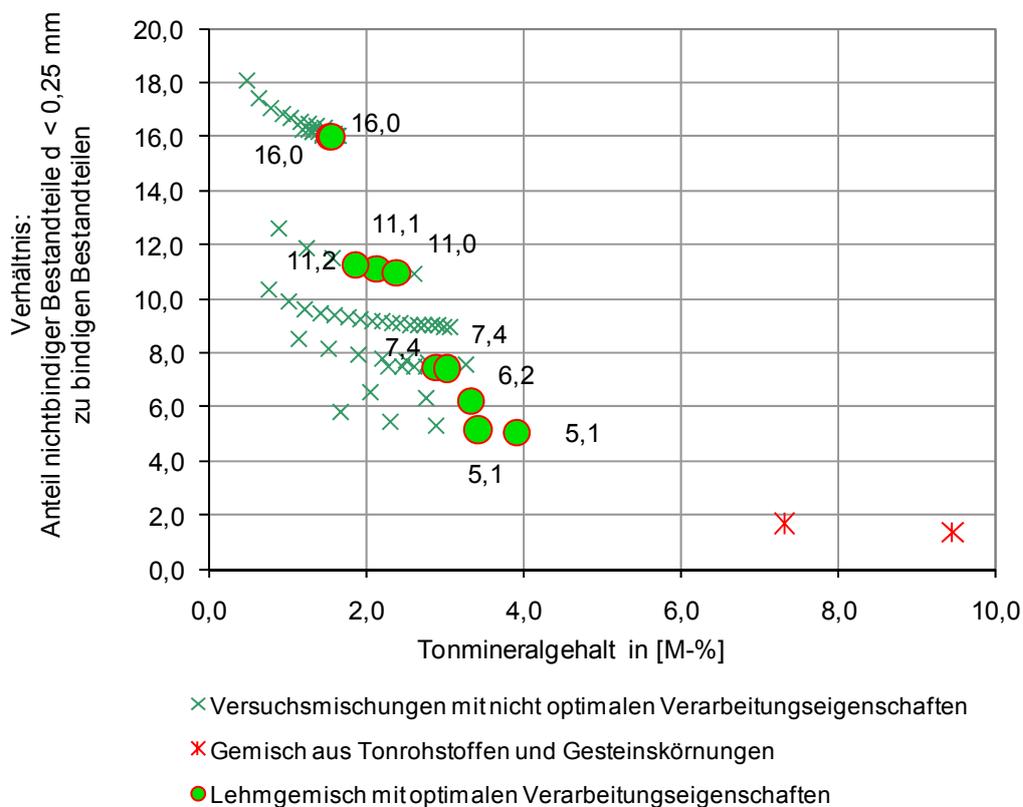


Abb. 81 Verhältnis Anteil nichtbindiger Bestandteile $d < 0,25$ mm zu bindigen Bestandteilen in Abhängigkeit des Tonmineralgehaltes (bindige Bestandteile)

Frage: *Ist im Feinkornbereich ein gleichförmiger Verlauf der Kornverteilung notwendig?*

In der nachfolgenden Grafik (Abb. 82) ist beispielhaft für fünf Stampflehmgemische (STL 1 bis STL 5) die Zusammensetzung im Feinkornbereich aufgeschlüsselt, in die Kornbereiche $d < 0,002$ mm, 0,002 - 0,006 mm, 0,006 - 0,02 mm, 0,02 - 0,063 mm und 0,063 - 0,25 mm, dargestellt.

Obwohl die Prüfmischungen voneinander abweichende Mengenanteile in den betrachteten Kornfraktionen aufweisen, konnten mit allen Stampflehmen optimale Materialeigenschaften erreicht werden.

Dies lässt den Rückschluss zu, dass innerhalb des Feinkornbereichs kein vorgegebener Verlauf eingehalten werden muss, wie er sich bei der modifizierten Fuller-Parabel ergeben würde. Vielmehr sind innerhalb der einzelnen Kornfraktionen Schwankungen zulässig.

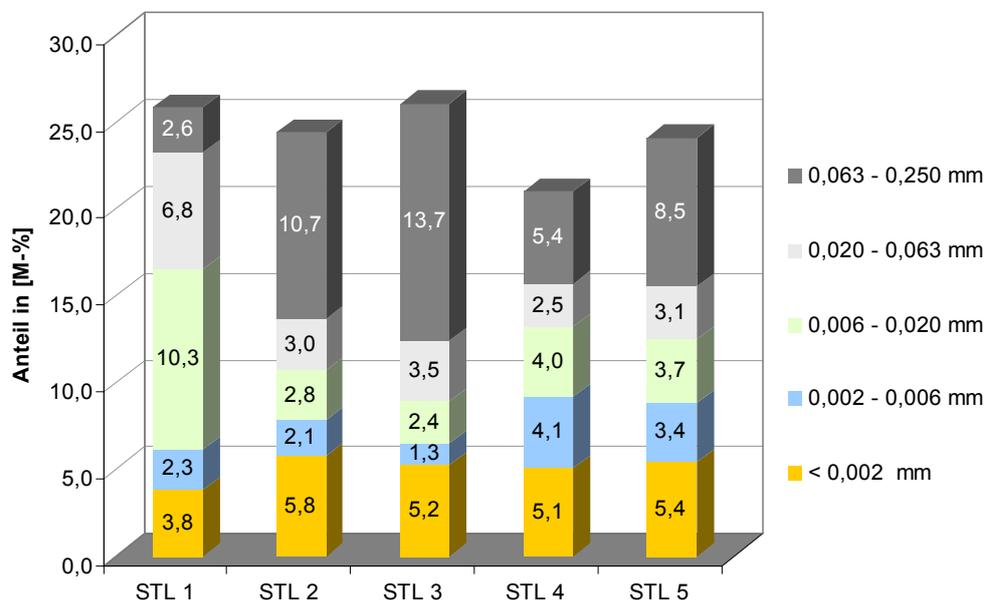


Abb. 82 Zusammensetzung von Stampflehmgemischen mit optimalen Materialeigenschaften im Feinkornbereich (Korngrößen $d < 0,25$ mm)

Frage: Beeinflusst die Zusammensetzung der bindigen Bestandteile (Art der Tonminerale) die Materialeigenschaften?

Aufbauend auf den Untersuchungen in Abschnitt 3.3.4 wird in Abb. 83 der Mineralbestand an bindigen Bestandteilen für Stampflehmmischungen mit optimalen Materialeigenschaften aufgeschlüsselt.

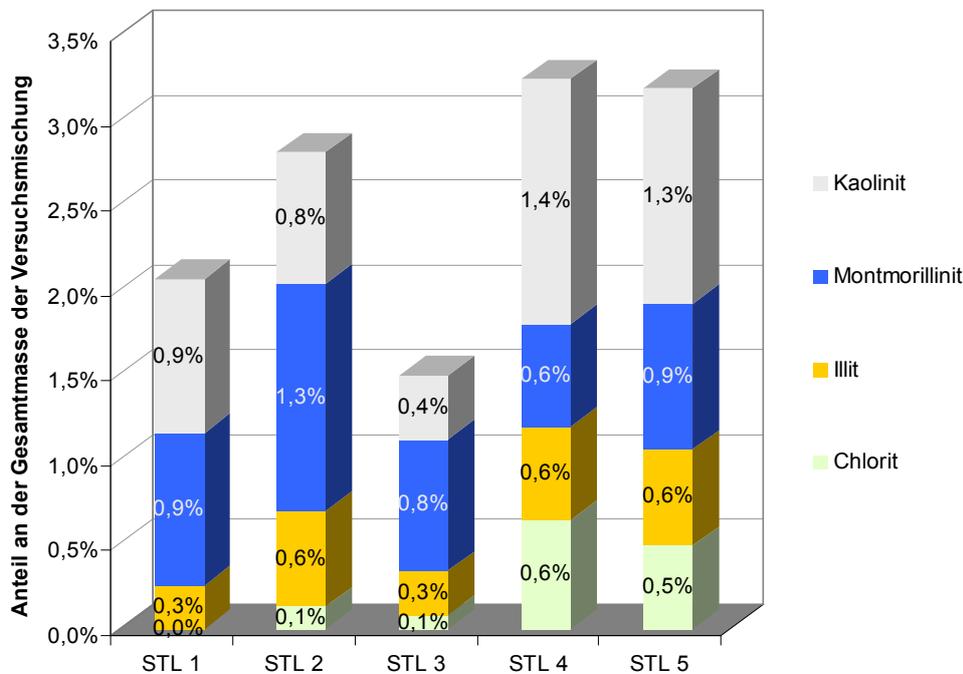


Abb. 83 Zusammensetzung der bindigen Bestandteile (Tonminerale) von Stampflehmmischungen mit optimalen Materialeigenschaften

Die Stampflehmmischungen weisen einen großen Unterschied in ihrem Tonmineralgehalt auf (1,5 M - % bis 3,4 M - %). Ausgehend von dieser Feststellung können keine direkten Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Tonmineralgehalt und optimalen Materialeigenschaften gezogen werden.

Für die Auswertung der Ergebnisse wurde deshalb ein neues Bewertungskriterium - die spezifische Oberfläche - herangezogen.

In Tab. 27 wird für die in den Grubenlehm enthaltenen verschiedenen Tonminerale die spezifische Oberfläche angegeben. Schwankungsbreiten innerhalb der spezifischen Oberfläche sind im Wesentlichen auf unterschiedliche Korngrößen der Tonminerale zurückzuführen. Im Allgemeinen gilt, je kleiner die Korngröße, desto größer ist die spezifische Oberfläche. [Bussert – 2004]

	Spezifische Oberfläche in [m ² /g]	Mittelwert der spezifischen Oberfläche* in [m ² /g]
Kaolin-Minerale	1 – 40	20
Illit, abh. von der Korngröße und Aufweitung	50 - 200	125
Chlorit	< 200	100
Smektit	600 - 800	700

*Annahme für weitere Untersuchungen

Tab. 27 Spezifische Oberflächen von Tonmineralen [Bussert – 2004]

Ausgehend von den ermittelten Massenanteilen der einzelnen Tonmineralarten und den angenommenen spezifischen Oberflächen ergeben sich für die Stampflehmischungen STL 1 bis STL 5 die Abb. 84 in dargestellten spezifischen Oberflächen der Gesamttonminerale je Kilogramm Stampflehm.

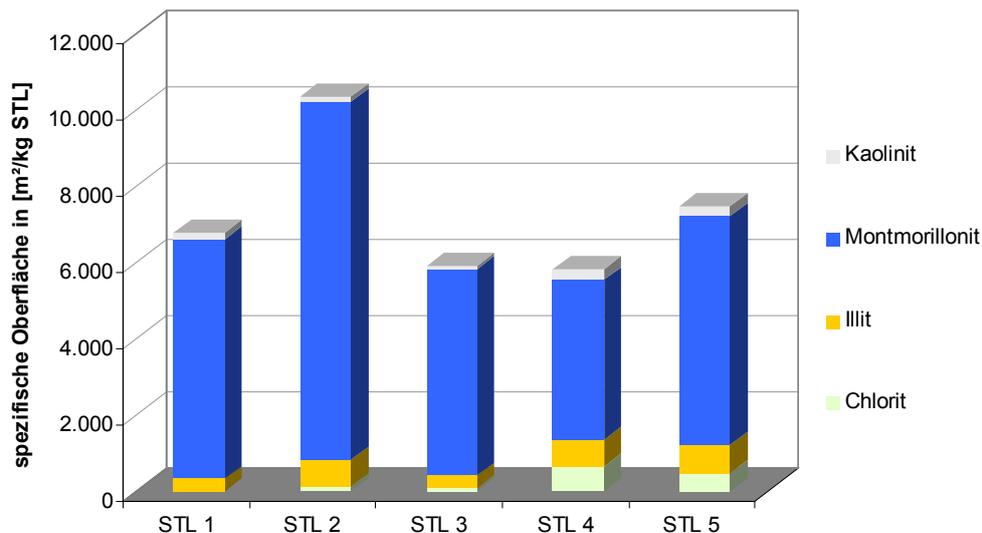


Abb. 84 Spezifische Oberflächen der Tonminerale in Stampflehmischen mit optimalen Materialeigenschaften

Die Auswertung zeigt, dass das Stampflehmgemisch STL 3 mit dem geringsten Tonmineralgehalt von 1,5 M - %, eine spezifische Oberfläche der bindigen Bestandteile aufweist, die mit den anderen Stampflehmen vergleichbar ist.

Damit zeigt sich, dass der Gesamt-Tonmineralgehalt nicht als Kriterium für die Zusammensetzung von Stampflehmischen mit optimalen Materialeigenschaften herangezogen werden kann. Vielmehr ist die Art der Tonminerale mit deren unterschiedlichen Eigenschaften entscheidend.

4.4 Stampflehm - Entwicklung eines Baustoffes mit definierten Eigenschaften

Im folgenden Abschnitt wird überprüft, inwieweit die bisherigen Erkenntnisse auf beliebige Stampflehmmischungen übertragen werden können und die Annäherung an einen Baustoff mit kontrollierbaren Stoffeigenschaften möglich wird.

Als Ausgangsmaterial werden die fünf analysierten Grubenlehme verwendet, die durch Zugabe von mineralischen Zuschlägen (Gesteinskörnungen) und Wasser modifiziert werden.

In Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen und definierten Analysen wird aus jedem Grubenlehm eine Mischung hergestellt, die den definierten Anforderungen an ein Stampflehmgemisch mit optimalen Materialeigenschaften entspricht und anschließend im Hinblick auf folgende Kennwerte geprüft:

- Verarbeitbarkeit
- Bindevermögen
- Rohdichte
- Druckfestigkeit
- Schwindmaß

Die Mischungen sind so zusammengesetzt, dass der in Abschnitt 4.3.1 definierte Kornverteilungsbereich werden kann. Die Einbaufeuchte und der Tonmineralgehalt sind so aufeinander abgestimmt, dass mit der Knetprüfung der Zustand III erreicht wird.

Mit den vorhandenen Gesteinskörnungen konnten Gemische mit dem Ausgangsstoff Grubenlehm GL-2 nicht so modifiziert werden, dass sich diese in den optimalen Kornverteilungsbereich einordnen. Auch in anderen Kornverteilungsbereichen konnten keine günstigen Verarbeitungseigenschaften erreicht werden.

Der Grubenlehm GL-2 verfügt über einen hohen Anteil an Sandkorn. Im Vergleich zu den übrigen Grubenlehmen wies dieser Naturlehm mit 28 M - % den geringsten Anteil an Feinst- und Schluffkorn auf. (s. Abs. 3.5.1).

Es konnte somit kein Gemisch hergestellt werden, das die Vorgabekriterien für zu erzielende optimale Materialeigenschaften erfüllt.

Obwohl damit keine gewünschten Materialeigenschaften möglich erscheinen, wird im Rahmen der weiteren Untersuchungen dennoch das Gemisch betrachtet, das den Vorgabekriterien am nächsten kommt und den anderen Stampflehmgemischen gegenübergestellt. Die Stampflehmmischung wird im Folgenden mit SLM-6 bezeichnet.

Für die Untersuchung optimaler Stoffmischungen wird der schluffarme Grubenlehm GL-2 durch Zugabe von Raumanteilen des schluffreichen Grubenlehms GL-5 modifiziert. Das so zusammengesetzte Stampflehmgemisch wird als SLM-5 benannt. Mit dieser Vorgehensweise ergeben sich die in der nachstehenden Grafik dargestellten Kornverteilungslinien:

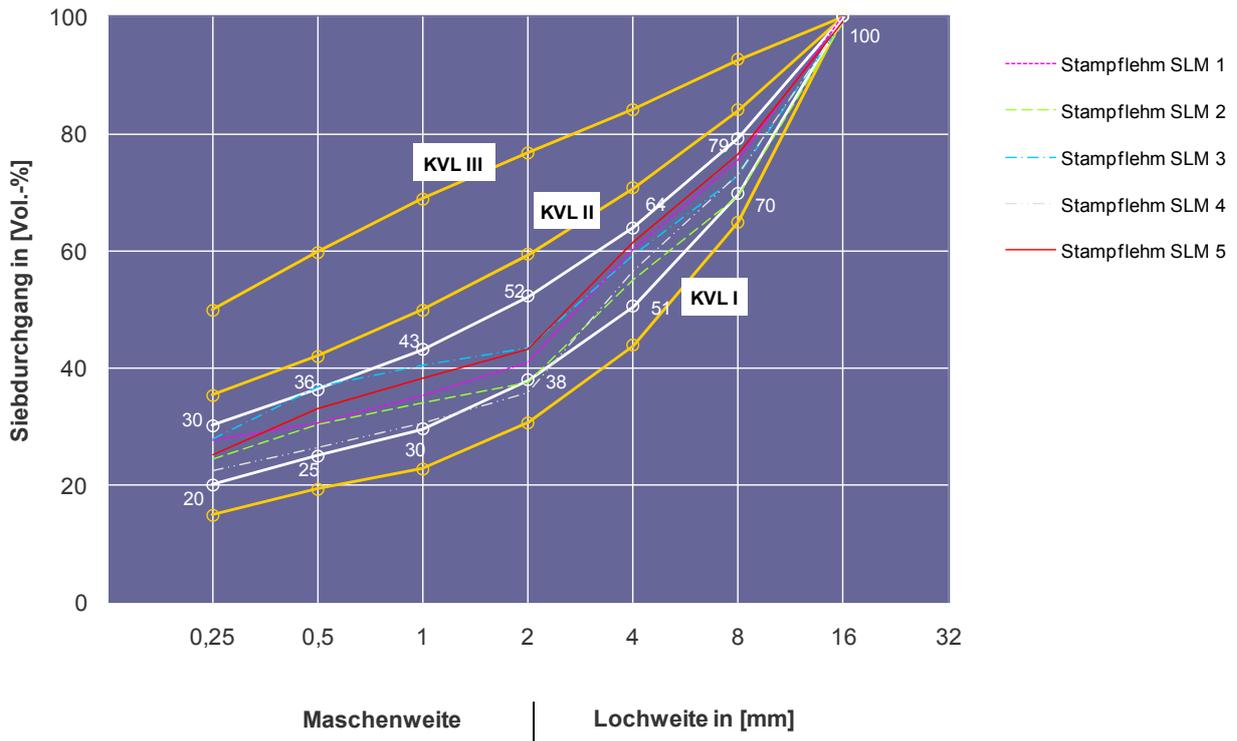


Abb. 85 Kornverteilungslinien der Stampflehmmischungen

Die Zusammensetzung der dargestellten Stampflehgmische SLM 1 bis SLM 5 kann der Tab. 28 entnommen werden, in der den einzelnen Komponenten die jeweiligen Raumteile zugeordnet sind.

Stampflehm- mischung		Ausgangs- stoffe					
		SLM 1	SLM 2	SLM 3	SLM 4	SLM 5	SLM 6
Grubenlehm GL-1	[RT]	3	-	-	-	-	-
Grubenlehm GL-2	[RT]	-	-	-	-	2	9,5
Grubenlehm GL-3	[RT]	-	7	-	-	-	-
Grubenlehm GL-4	[RT]	-	-	13	-	-	-
Grubenlehm GL-5	[RT]	-	-	-	2,5	2	-
Edelbrechsand 0/2	[RT]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Edelsplitt 2/5	[RT]	4	7	9	4	4	4
Splitt 8/16	[RT]	3	7	9	3	3	3

Tab. 28 Zusammensetzung der Stampflehgmische (Angabe in Raumteilen RT)

Die Materialprüfungen ergeben für die Stampflehgmische, die den optimalen Vorgabekriterien entsprechen, die in den nachstehenden Diagrammen dargestellten Ergebnisse.

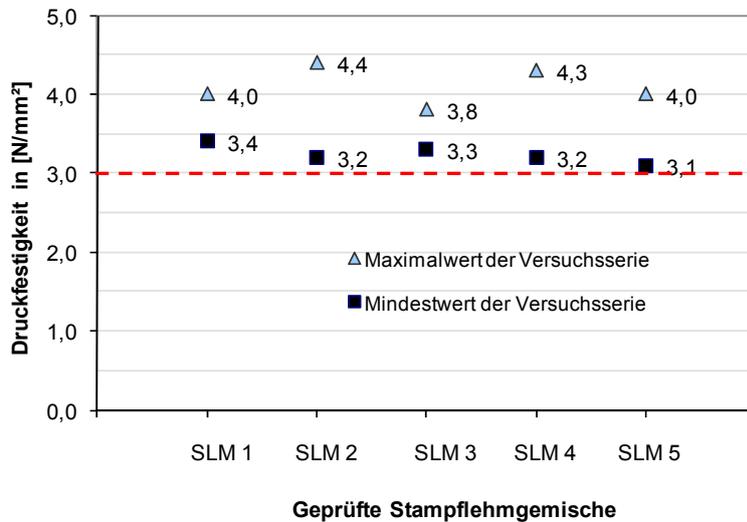


Abb. 86 Ermittelte Druckfestigkeit – Minimal- und Maximalwerte der Versuchsserien

Für Stampflehmgemische, die den definierten optimalen Vorgabekriterien entsprechen (SLM 1 bis SLM 5), werden Mindestdruckfestigkeiten **über 3,0 N/mm²** erreicht.

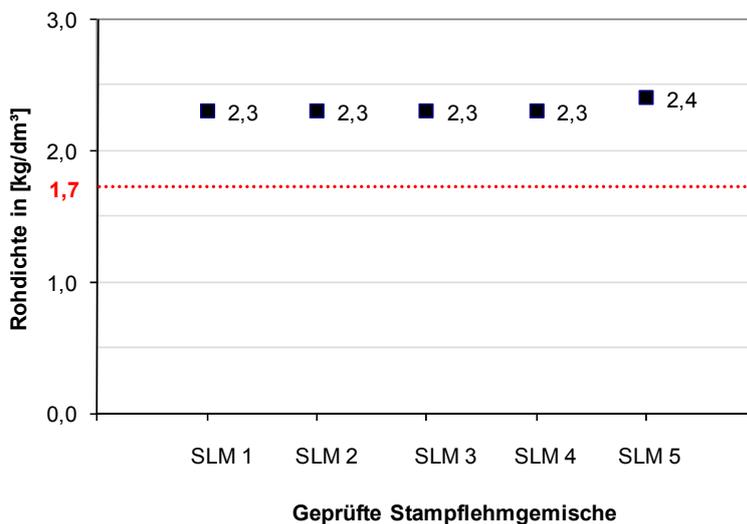


Abb. 87 Ermittelte Rohdichten

Für Stampflehmgemische, die den definierten optimalen Vorgabekriterien entsprechen (SLM 1 bis SLM 5), werden Rohdichten **über 1,7 kg/dm³** erreicht, die gemäß den bestehenden Lehmbaugeregeln als unterer Grenzwert für Stampflehmgemische angegeben werden.

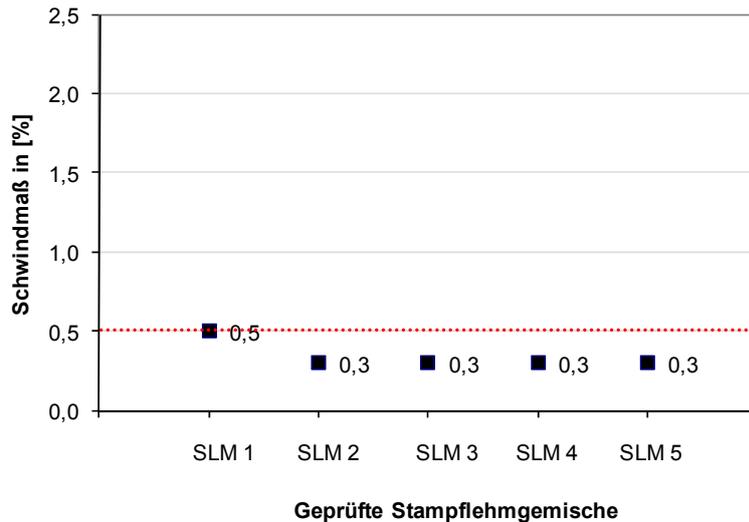


Abb. 88 Ermittelte Schwindmaße

Für Stampflehmgemische, die den definierten optimalen Vorgabekriterien entsprechen (SLM 1 bis SLM 5) werden Schwindmaße $\leq 0,5$ % erreicht. (nach [Ziegert – 2005] empfohlener Grenzwert für Sichtbauteile)

	SLM 1	SLM 2	SLM 3	SLM 4	SLM 5	SLM 6
Verarbeitbarkeit	günstig	günstig	günstig	günstig	günstig	brauchbar
Bindevermögen	Knetprüfung Zustand III	Knetprüfung Zustand II				
Druckfestigkeit in [N/mm ²]	3,4	3,2	3,3	3,2	3,1	1,9
Rohdichte in [kg/dm ³]	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,3
Schwindmaß in [%]	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0

Tab. 29 Zusammenfassung Materialeigenschaften

Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch Einhaltung von Vorgabekriterien, gezielt Stampflehmgemische - aus Grubenlehm mit signifikanten Unterschieden - zusammengesetzt werden können, die optimale Materialkennwerte aufweisen.

Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass nicht jeder Grubenlehm als Ausgangsstoff für optimale Stampflehmgemische geeignet ist, wenn dieser lediglich durch Zugabe von Gesteinskörnungen und Wasser modifiziert werden kann.

Im vorliegenden Fall traf dies auf das Stampflehmgemisch SLM 6 zu (hergestellt aus Grubenlehm GL-2), mit dem nur brauchbare Materialeigenschaften erreicht werden konnten.

Zur Erzielung optimaler Materialeigenschaften musste der Grubenlehm GL-2 durch Beigabe von Feinst- bzw. Schluffanteilen (Zugabe von Anteilen des Grubenlehmes GL-5) modifiziert werden (Stampflehmgemisch SLM 5). Die Stampflehmgemische SLM 1 bis SLM 5 weisen durchgängig sehr gute Materialeigenschaften auf.

5 Ergebnisübersicht Phase 1 und Phase 2

Im Rahmen der Untersuchungen konnten neue Methoden für die Dimensionierung von Stampflehmgemischen entwickelt, sowie grundlegende Materialzusammenhänge und deren Auswirkungen auf das Materialverhalten erkannt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für weitere statistische Untersuchungen und empirischen Ermittlungen dienen, die den Baustoff Stampflehm berechenbarer machen.

Die Nutzung von natürlichen Lehmvorkommen stellt derzeit die effizienteste Methode zur Herstellung von Stampflehmgemischen dar. Aus diesem Grund beschränkte sich diese Abhandlung auf die Verwendung von natürlichen Grubenlehmen, um diese durch Zugabe von Gesteinskörnungen zu Stampflehmen mit optimalen Materialeigenschaften zu modifizieren.

Als Ausgangsstoffe wurden fünf verschiedene Grubenlehme, im Hinblick auf eine möglichst hohe Untersuchungsvarianz, ausgewählt und analysiert. Aufbauend auf diesen Analysen wurden Stampflehmgemische hergestellt und geprüft. Die dafür verwendeten Prüfverfahren wurden auf ihre Eignung im Stampflehmbau untersucht und bewertet.

Die Arbeit teilt sich grundlegend in die *Phase 1: Analyse der Grubenlehme* und *Phase 2: Materialforschung Stampflehm* auf. Für die Untersuchungsphasen ergaben sich folgende Erkenntnisse.

Phase 1 – Prüfung und Analyse von Grubenlehmen:

Für die Untersuchung des Feinkornbereiches von Grubenlehmen wurden unterschiedliche Messverfahren auf deren Eignung und Anwendbarkeit im Lehmabbau untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass das Laser- und das Zentrifugen-Verfahren aufgrund der hohen Messgenauigkeiten für die Feinkornanalyse des Grubenlehmes nicht geeignet sind. Neben dem validierten Referenzverfahren (Atterberg-Methode) hat sich die Aräometer-Methode als ein Verfahren mit hoher Messgenauigkeit empfohlen. Der Vorteil gegenüber dem Atterberg-Verfahren besteht in dem geringen Versuchsaufwand und der schnellen Versuchsdurchführung. Die Nachteile sind eine etwas geringere Messgenauigkeit und die fehlende Möglichkeit, einzelne Kornfraktionen abzutrennen und für weitere Analysen zu gewinnen.

Ergebnis der Untersuchungen war eine detaillierte Analyse des Feinkornbereichs mit einem Korndurchmesser $d < 0,063$ mm. Es wurden die Korngrößenverteilung, der Anteil an bindigen und nicht bindigen Bestandteilen bestimmt sowie die Tonminerale in den einzelnen Kornfraktionen identifiziert und quantifiziert.

Die für die Ermittlung der einzelnen Kennwerte untersuchten Prüfverfahren sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die Verfahren, die sich für eine schnelle und praktische Untersuchung von Grubenlehm empfohlen haben, sind farbig hervorgehoben.

<i>Prüfparameter</i>		<i>Prüfverfahren</i>			
1	Vorhandensein organischer Substanzen	Riechversuch nach DIN 4022		Bestimmung der Farbe	
2	Korngrößenverteilung Korngrößen $d > 0,063$ mm	Siebverfahren nach DIN 18123			
3	Korngrößenverteilung Korngrößen $d < 0,063$ mm	Atterberg-Verfahren	Aräometer-Verfahren	Zentrifugen-Verfahren	Laserbeugung
4	Gewinnung Anteil der Feinstkornfraktion	Atterberg-Verfahren		Zentrifugen-Verfahren	
5	Identifizierung der Tonminerale	Röntgendiffraktometrie (an Schmierpräparaten)			
6	Bestimmung des Gesamtmineralbestands	Röntgendiffraktometrie (an Pulverpräparaten)			

Tab. 30 Übersicht der in Phase 1 - Prüfung und Analyse von Grubenlehmern verwendeten Prüfverfahren

Phase 2 – Materialforschung Stampflehm:

Mit den in Phase 1 analysierten Grubenlehmern wurden systematisch Stampflehmgermische hergestellt und deren Materialeigenschaften untersucht. Ziel war die Herstellung von Stampflehmern mit optimalen Materialeigenschaften, die aufbauend auf den Lehm bau Regeln wie folgt definiert wurden:

- Mindestdruckfestigkeit > 3 N/mm²,
- Schwindmaß $\leq 0,5$ % für Sichtbauteile
- Schwindmaß $\leq 2,0$ % für tragende Wände ohne repräsentativen Charakter
- Rohdichte ≥ 1.700 kg/m³

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Stampflehmgermische mit optimalen Materialeigenschaften nicht hinreichend genau durch eine vorgegebene Parabel der Korngrößenverteilung beschrieben werden können. Vielmehr konnte durch die Untersuchungen ein Kornverteilungsbereich für Stampflehmgermische eingegrenzt werden, mit dem gewünschte optimale Materialeigenschaften im Hinblick auf Verarbeitbarkeit, Oberfläche, Schwindmaß und Druckfestigkeit erreicht werden. Die empfohlene Parabel nach Boemanns (1989) in [Minke – 2004] bildet in guter Näherung die untere Grenze dieses Kornbereiches.

Für den Kornanteil mit einem Korndurchmesser von $d < 0,25$ mm erwies es sich als günstig, wenn dieser zwischen 20 – 30 Masse - % liegt.

Die Auswertung der Materialuntersuchungen hat weiterhin gezeigt, dass für baupraktische Belange eine genaue Analyse und Kenntnis der Zusammensetzung des Feinkorns und der bindigen Bestandteile von Grubenlehm ($d < 0,25 \text{ mm}$ - wie in Phase 1) nicht zwingend erforderlich ist. Vielmehr war eine gezielte Zusammensetzung von optimalen Stampflehm-gemischen auch mit Hilfe einfacher qualitativer Prüfverfahren möglich.

Dazu wurde die Methode der Knetprüfung genutzt und weiterentwickelt, indem für diese verschiedene Zustandsformen definiert wurden, die als Bewertungskriterium für die Eignung von Stampflehm-gemischen dienen.

Die Einhaltung des neu definierten Zustandes III erwies sich dabei als Grundvoraussetzung für die Herstellung von Stampflehm mit optimalen Materialeigenschaften.

Es zeigte sich, dass der Gesamt-Tonmineralgehalt bzw. ein vorgegebener Verlauf der Feinkornzusammensetzung sich nur sehr begrenzt dazu eignen, Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften von Stampflehm zu ziehen.

Vielmehr ist die Art der Tonminerale entscheidend für die Eigenschaften des Lehm-baustoffes, da das Bindevermögen maßgebend von der spezifischen Oberfläche der unterschiedlichen Tonminerale abhängt. Ebenso konnte eine quantitative Ermittlung des erforderlichen Wassergehaltes effizient und hinreichend genau durch eine qualitative Prüfung mit der Knetprüfung und dem Erreichen des Zustands III dimensioniert werden.

Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen waren die Anwendung, Überprüfung und Dokumentation von Prüfverfahren. Neben den bereits anerkannten Prüfmetho-den wurden für den Stampflehm-bau Verfahren aus der Betontechnologie auf deren Anwendbarkeit überprüft.

Druckfestigkeit

Die Untersuchungen der Stampflehm-gemische wurden jeweils an verschiedenen Prüfkörperformaten durchgeführt. Das Ergebnis war eine Bestätigung der in den Lehm-bau Regeln empfohlenen Prüfwürfel von 200 mm Kantenlänge. Eine Belastungsgeschwindigkeit von $0,02 - 0,03 \text{ N/mm}^2$ je Sekunde stellte sich als günstig heraus.

Schwindmaß

In Anlehnung an den Prüfaufbau der Lehm-bau Regeln wurden Langzeitversuche an verschiedenen Stampflehm durchgeföhrt. In Abhängigkeit der Zusammensetzungen der Probemischungen konnte ein Erreichen des Endschwindmaßes nach drei bis maximal vierzehn Tagen festgestellt werden.

Kriechen

Exemplarisch wurde für ein Stampflehm-gemisch mit optimalen Materialeigenschaften das Kriechverhalten mit unterschiedlichen Dauerlasten untersucht. Im Hinblick auf die zu erwartenden ständigen Lasten eines Stampflehm-bauwerkes wurden die Dauerlasten mit $1/3$ bzw. $1/7$ der zu erwartenden Bruchspannung angesetzt. Bereits nach einer Woche wurden bei den Prüfkörpern ca. 50 % der endgültigen Kriechverformung festgestellt. Nach ca. 270 Tagen waren keine zusätzlichen Verformungen feststellbar. Für eine Dauerlast mit

1/3 der zu erwartenden Bruchspannung waren 95 % der Kriechverformungen bereits nach 118 Tagen erreicht. Für eine Dauerlast mit 1/7 der zu erwartenden Bruchspannung waren 95 % der Kriechverformungen nach 140 Tagen erreicht. Für die untersuchten Probekörper entspricht das Verhältnis der ermittelten Endkriechmaße ε_k dem Verhältnis der aufgetragenen Dauerlasten. Hier konnte ein direkt proportionaler Zusammenhang festgestellt werden. Für den untersuchten Stampflehm ergab sich eine Kriechzahl von 4,3.

Elastizitätsmodul

Im Zusammenhang mit dem Kriechverhalten von Stampflehm wurde der statische Elastizitätsmodul mit dem Prüfverfahren für Beton in Anlehnung an DIN 1048 – Teil 5 untersucht. Gegenüber dem Baustoff Beton war für das Erreichen der elastischen Verformung eine höhere Anzahl von Vorbelastungen notwendig. Für Stampflehmgemische, deren Materialeigenschaften als optimal eingestuft wurden, konnte ein statischer Elastizitätsmodul im Bereich von 267 – 427 N/mm² ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lagen teilweise deutlich unter den bisher für den Baustoff Stampflehm veröffentlichten Werten.

Basierend auf den Lehmregeln und den in dieser Arbeit gewonnenen neuen Erkenntnissen konnte das nachstehend dargestellte Ablaufdiagramm entwickelt werden, in dem das prinzipielle Vorgehen für die Dimensionierung von optimalen Stampflehmgemischen gezeigt wird.

Ablaufdiagramm für Stampflehmgemische mit optimalen Materialeigenschaften

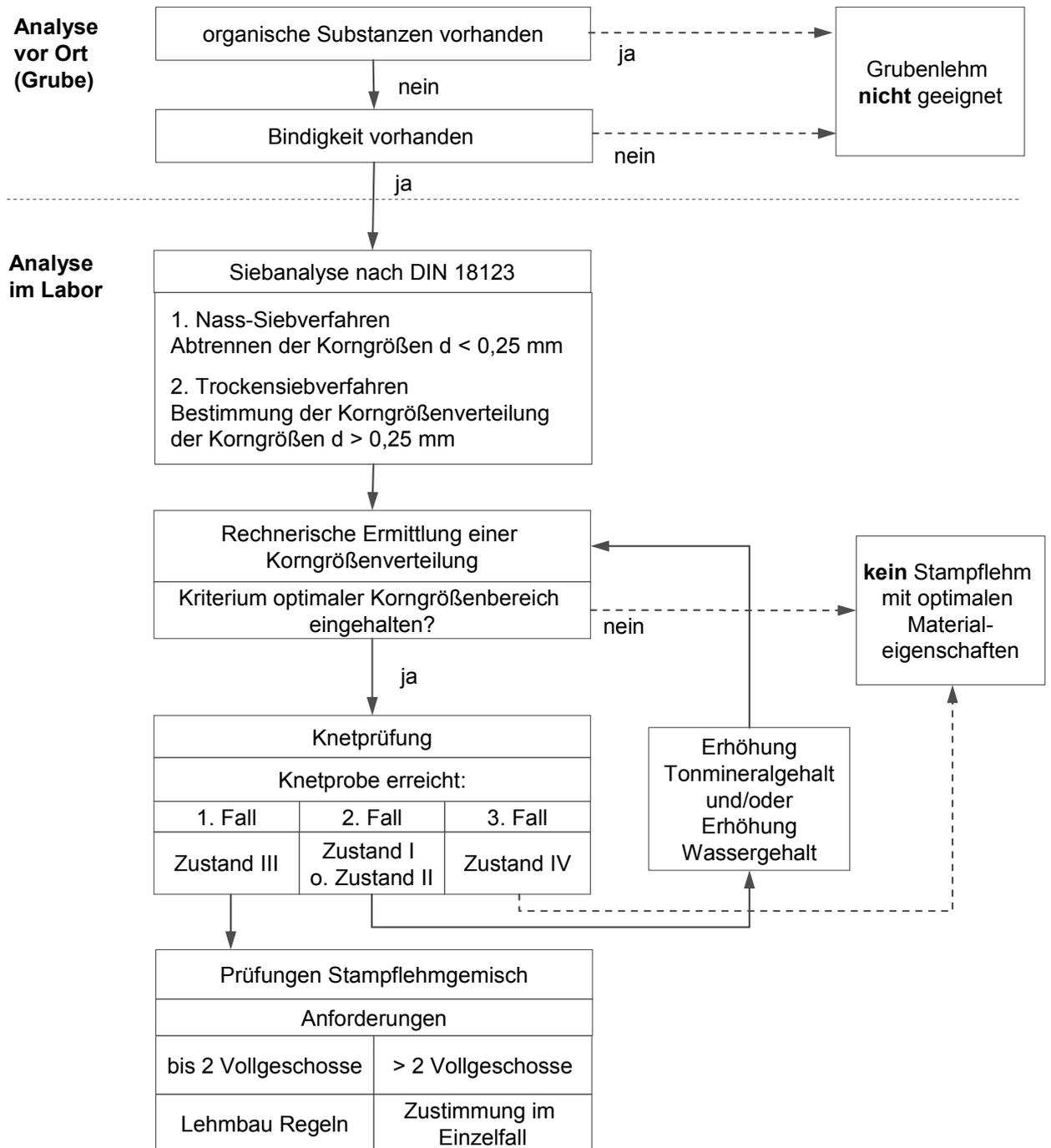


Abb. 89 Ablaufdiagramm für Stampflehmgemische mit optimalen Materialeigenschaften

6 Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen war es, einfache und praxisnahe Methoden zu entwickeln, mit denen Stampflehme mit optimalen Materialeigenschaften aus Grubenlehm und Gesteinskörnungen zusammengesetzt werden können.

Dazu wurden zunächst Grubenlehme unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung analysiert und die dafür verwendeten Untersuchungsmethoden bewertet.

Die gefundenen Materialkennwerte (wie Tonmineralgehalt, Korngrößenverteilung, Schluffgehalt) dienten als Eingangsparameter für die anschließenden Untersuchungen von Stampflehmgemischen.

Aufbauend auf den Lehmbau Regeln wurden Stampflehme mit optimalen Materialeigenschaften wie folgt definiert:

- Mindestdruckfestigkeit $> 3 \text{ N/mm}^2$,
- Schwindmaß $\leq 0,5 \%$ für Sichtbauteile
- Schwindmaß $\leq 2,0 \%$ für tragende Wände ohne repräsentativen Charakter
- Rohdichte $\geq 1.700 \text{ kg/m}^3$

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Einhaltung der folgenden Kriterien Stampflehme mit optimalen Materialeigenschaften gezielt zusammengesetzt werden können:

- 1.Kornverteilung: Stampflehme sollten eine Kornverteilung aufweisen, die sich im Grenzbereich b_1 - b_2 einordnet.
- 2.Die Knetprüfung der Stampflehmprobe sollte dem in dieser Arbeit definierten Zustand III zugeordnet werden können.
- 3.Der Feinkorngehalt (Korndurchmesser von $d < 0,25 \text{ mm}$) des Stampflehmgemisches sollte mindestens zwischen 20 und 30 Masse - % liegen.

Bei der Herstellung von Stampflehmgemischen konnte festgestellt werden, dass es ausreicht, den Ausgangsstoff Grubenlehm - neben der Prüfung auf Bindigkeit und das Vorhandensein organischer Bestandteile – durch eine Nasssiebung auf dessen Korngrößenzusammensetzung zu prüfen.

Aufwendige Untersuchungen der Ausgangslehme (Grubenlehme) zur Bestimmung der Feinkornzusammensetzung mittels Sedimentations- bzw. Schlämmanalysen sind nicht erforderlich.

Die Untersuchungen sollen einen Beitrag zur Materialentwicklung des Baustoffes Stampflehm leisten. Durch die Zielsetzung, einen ersten Überblick zum Materialverhalten in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen zu gewinnen, wurde ein breites Untersuchungsfeld gewählt und dabei der Probenumfang aller Versuchsserien auf drei bis fünf Messkörper begrenzt.

Dadurch war es möglich, Stampflehmeigenschaften in Abhängigkeit der Zusammensetzung zu charakterisieren und anhand von Bewertungskriterien Schlussfolgerungen über geeignete bzw. günstige Zusammensetzungen zu ziehen.

Das Untersuchungsspektrum konnte somit für weitergehende Betrachtungen eingegrenzt werden.

Im Hinblick auf eine statistische Betrachtung, die eine Festlegung der Material-sicherheitsfaktoren ermöglicht und Voraussetzungen für Normenregelwerke bilden, sind zusätzliche Untersuchungen mit einem höheren Probenaufwand erforderlich.

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abb. A1	Aräometer	138
Abb. A2	Darstellung des Versuchsaufbaus	138
Abb. A3	Atterberg-Zylinder mit aufgeschüttelter Suspension	140
Abb. A4	Atterberg-Zylinder mit fast vollständiger Sedimentation der Teilchen	140
Abb. A5	Einstellen der Probe in die Zentrifuge	141
Abb. A6	Anordnung der Zentrifugengefäße in der Zentrifuge	141

Tabellenverzeichnis

Tab. A1	Benötigte Fallzeiten für die Sedimentation eines bestimmten Äquivalentdurchmessers (Stokessches Gesetz)	142
Tab. A2	Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-1	143
Tab. A3	Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-2	143
Tab. A4	Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-3	144
Tab. A5	Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-4	144
Tab. A6	Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-5	145
Tab. A7	Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-1	146
Tab. A8	Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-2	146
Tab. A9	Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-3	146
Tab. A10	Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-4	147
Tab. A11	Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-5	147
Tab. A12	Korngrößenverteilung mittels Laserverfahren (Grubenlehme GL-1 – GL-3)	148
Tab. A13	Korngrößenverteilung mittels Laserverfahren (Grubenlehme GL-4; GL-5)	149
Tab. A14	Ermittelte Rohdichten für Stampflehmgemische mit variierender Korngrößenzusammensetzung	150
Tab. A15	Ermittelte Druckfestigkeiten für Stampflehmgemische mit variierender Korngrößenzusammensetzung	151
Tab. A16	Ermittelte Schwindmaße für Stampflehmgemische mit variierender Korngrößenzusammensetzung	152
Tab. A17	Ermittelter Elastizitätsmodul für Stampflehmgemische mit variierender Korngrößenzusammensetzung	153

Tab. A18	Ermittelte Rohdichten für Stampflehmgemische mit vorgegebener (optimierter) Korngrößenzusammensetzung.....	165
Tab. A19	Ermittelte Druckfestigkeiten für Stampflehmgemische mit vorgegebener (optimierter) Korngrößenzusammensetzung	166
Tab. A20	Ermitteltes Schwindmaß für Stampflehmgemische mit vorgegebener (optimierter) Korngrößenzusammensetzung	167

Anhang 1 Beschreibung der Sedimentationsverfahren

Aräometer-Methode

Die Aräometer - Methode ist ein genormtes Sedimentationsverfahren nach DIN 18123. Bei dieser Messmethode werden Aräometer (siehe Abb. A1), spezielle Instrumente zur Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten oder Suspensionen, verwendet.

Für die Messung wird das Probenmaterial mit destilliertem Wasser zu einer Suspension verrührt. Danach wird in definierten Zeitintervallen nach Beginn der Sedimentation die Dichte der Suspension mit Hilfe eines Aräometers bestimmt.

Durch das Absinken einzelner Körner verändert sich die Dichte der verbleibenden Suspension. Größere Bestandteile weisen größere Absinkgeschwindigkeiten auf, weshalb sich die Dichte der Suspension am Versuchsanfang am stärksten verändert.

Mit zunehmender Versuchszeit, also einem vermehrten Absinken von Schwebpartikeln, wird die Suspension transparenter. Beim letzten Messvorgang, der im Allgemeinen nach 24 Stunden durchgeführt wird, sind in der Suspension nur noch geringere Feinanteile enthalten – die Dichte nähert sich der des reinen Wassers mit $\rho \approx 1 \text{ g/cm}^3$ an (in Abhängigkeit der Temperatur).

Aus den Suspensionsdichten und den Eintauchtiefen des Aräometers kann anschließend die Korngrößenverteilung rechnerisch bestimmt werden. [gemäß DIN 18123, Abs. 6.3]



Abb. A1 Aräometer



Abb. A2 Darstellung des Versuchsaufbaus

Im Gegensatz zu anderen Verfahren stellt die Aräometer – Methode kein trennendes Verfahren dar, in dem die einzelnen Kornfraktionen stofflich gewonnen werden können. Es lässt lediglich Aussagen über die Korngrößenverteilung der Anteile $< 0,063$ mm zu.

Für die gezielte Untersuchung einzelner Kornfraktionen müssen daher andere Verfahren, wie die nachstehend beschriebenen Atterberg – bzw. Zentrifugenmethode angewendet werden.

Atterberg-Methode

Die Atterberg - Methode ermöglicht die vollständige Gewinnung und Quantifizierung einzelner Kornfraktionen, durch die Anwendung einer Schlämm-Methode. Zur Schlämmung wird ein so genannter Atterberg - Zylinder verwendet. Dieser Glaszylinder hat eine Höhe von ca. $H = 35$ cm und einen Innendurchmesser von mindestens $d_i = 5$ cm. In einer Höhe von ca. 3 bis 4 cm über dem Glasboden befindet sich ein Auslauf (Siphon), der durch einen Schlauch mit Quetschhahn abgeschlossen werden kann.

Für die Messung wird die aufgeschlämmte Probe in den Glaszylinder gefüllt und bis zur gewünschten Fallhöhe - in Abhängigkeit des Zylinderdurchmessers - mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Anschließend wird der Zylinder verschlossen und der Inhalt solange geschüttelt bis eine gleichmäßig verteilte Suspension entstanden ist. Nach dem Abstellen des Zylinders wird der Beginn der Sedimentation zeitlich notiert.

In definierten Zeitabständen, die in Abhängigkeit der gesuchten Korngröße rechnerisch ermittelt werden, wird die über dem Ablauf befindliche Suspension abgelassen und der Anteil der entsprechenden Kornfraktion durch anschließende Trocknung gewonnen.



Abb. A3 Atterberg-Zylinder mit aufgeschüttelter Suspension



Abb. A4 Atterberg-Zylinder mit fast vollständiger Sedimentation der Teilchen

Für die vollständige Abtrennung einer einzelnen Kornfraktion muss der beschriebene Vorgang unter Berücksichtigung der Fallzeiten für die jeweilige Korngröße mehrmals wiederholt werden, bis die Flüssigkeit keine Trübung aufweist. Dazu werden die im Zylinder verbleibenden Bestandteile wieder mit destilliertem Wasser bis zur erforderlichen Fallhöhe aufgefüllt und durch erneutes Schütteln zu einer Suspension vermischt. Aus der schnelleren Sinkgeschwindigkeit großer Partikel ergibt sich, dass mit dieser Methode zunächst die feinkörnigsten Fraktionen abgetrennt werden. Unter Anwendung der Verfahrensvorgaben ergibt sich für die Trennung der Feinkornfraktionen folgende Reihenfolge $< 2 \mu\text{m}$, 2 bis $6 \mu\text{m}$,

6 bis 20 μm und $> 20 \mu\text{m}$. Die Versuche wurden in Anlehnung an [Engelhardt/Müller – 1964] durchgeführt.

Zentrifugen-Methode

Die Zentrifugen-Methode wird vorrangig zur Trennung und Gewinnung sehr feiner Bodenbestandteile eingesetzt.

Bei der Sedimentation in einer Zentrifuge kann durch die Zentrifugalbeschleunigung die auf die Teilchen einwirkende Kraft - im Vergleich zur Schwerkraft - um ein Vielfaches gesteigert werden. Dadurch können die Schlämmdauern erheblich reduziert werden.

Zur Korngrößentrennung wird das aufgeschlämmte Probenmaterial in Zentrifugengefäße gefüllt, bis zur gewünschten Fallhöhe mit destilliertem Wasser aufgefüllt und zentrifugiert. Nach Ablauf der Zentrifugationszeit wird die Suspension zügig abgegossen, so dass bereits sedimentierte Körner im Gefäß verbleiben. Die abgegossene Flüssigkeit wird aufgefangen und die darin enthaltenen (noch nicht sedimentierten) Mineralkörner z.B. durch Trocknung gewonnen. Für die vollständige Gewinnung der Kornfraktion wird der Vorgang wiederholt, bis keine Trübung in der Flüssigkeit mehr zu beobachten ist.



Abb. A5 Einstellen der Probe in die Zentrifuge



Abb. A6 Anordnung der Zentrifugengefäße in der Zentrifuge

Anhang 2 Protokolle der Sedimentations-Untersuchungen

Benötigte Fallzeiten für die Sedimentation eines bestimmten Äquivalentdurchmessers (Stokessches Gesetz). Zur Berechnung wurden idealisierte Quarzkörner mit der Dichte 2,67 g/cm verwendet.

Fallhöhe 25 cm				
Raum- temperatur	Äquivalentdurchmesser in [µm]			
	20 - 63	6,3 - 20	2 - 6,3	< 2
[°C]	Std./Min./Sec.	Std./Min./Sec.	Std./Min./Sec.	Std./Min./Sec.
15	0:01:20	0:13:12	2:26:42	22:00:17
16	0:01:17	0:12:52	2:22:55	21:26:14
17	0:01:16	0:12:32	2:19:16	20:53:21
18	0:01:14	0:12:13	2:15:47	20:22:05
19	0:01:12	0:11:55	2:12:26	19:51:51
20	0:01:10	0:11:37	2:09:13	19:22:54
21	0:01:09	0:11:21	2:06:10	18:55:29
22	0:01:07	0:11:06	2:03:20	18:29:58
23	0:01:05	0:10:50	2:00:21	18:03:07
24	0:01:04	0:10:35	1:57:32	17:37:52
25	0:01:02	0:10:20	1:54:49	17:13:23

Fallhöhe 30 cm				
Raum- temperatur	Äquivalentdurchmesser in [µm]			
	20 - 63	6,3 - 20	2 - 6,3	< 2
[°C]	Std./Min./Sec.	Std./Min./Sec.	Std./Min./Sec.	Std./Min./Sec.
15	0:01:36	0:15:50	2:56:02	26:24:20
16	0:01:32	0:15:26	2:51:30	25:43:28
17	0:01:31	0:15:02	2:47:07	25:04:01
18	0:01:29	0:14:40	2:42:56	24:26:30
19	0:01:26	0:14:18	2:38:55	23:50:13
20	0:01:24	0:13:56	2:35:04	23:15:29
21	0:01:23	0:13:37	2:31:24	22:42:35
22	0:01:20	0:13:19	2:28:00	22:21:58
23	0:01:18	0:13:00	2:24:25	21:39:44
24	0:01:17	0:12:42	2:21:02	21:09:26
25	0:01:14	0:12:24	2:17:47	20:04:04

Tab. A1 Benötigte Fallzeiten für die Sedimentation eines bestimmten Äquivalentdurchmessers (Stokessches Gesetz).

Atterberg-Verfahren

Grubenlehm GL-1				
Gesamttrockenmasse in [g]: 24,04				
	Korndurchmesser in [mm]	Siebrückstand in [g]	Siebrückstand in [Gew-%]	Siebdurchgang in [Gew-%]
Siebung	16	0	0,0	100
	8	0	0,0	100
	4	0	0,0	100
	2	0,02	0,1	99,9
	1	0,03	0,1	99,8
	0,5	0,09	0,4	99,4
	0,25	0,21	0,9	98,5
	0,125	0,33	1,4	97,2
	0,063	0,46	1,9	95,3
Sedimentation Atterberg-Verfahren	0,02	6,40	26,6	68,6
	0,006	10,40	43,3	25,4
	0,002	2,30	9,6	15,8
	< 0,002	3,80	15,8	-

Tab. A2 Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-1

Grubenlehm GL-2				
Gesamttrockenmasse in [g]: 276,20				
	Korndurchmesser in [mm]	Siebrückstand in [g]	Siebrückstand in [Gew-%]	Siebdurchgang in [Gew-%]
Siebung	16	0	0,0	100
	8	0	0,0	100
	4	4,8	1,7	98,3
	2	3,4	1,2	97,0
	1	7,1	2,6	94,5
	0,5	27,4	9,9	84,5
	0,25	78,7	28,5	56,0
	0,125	49,3	17,8	38,2
	0,063	28,4	10,3	27,9
Sedimentation Atterberg-Verfahren	0,02	22,2	8,0	19,9
	0,006	13,9	5,0	14,9
	0,002	9,3	3,4	11,5
	< 0,002	31,8	11,5	-

Tab. A3 Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-2

Grubenlehm GL-3				
Gesamtrockenmasse in [g]: 30,10				
	Korndurchmesser in [mm]	Siebrückstand in [g]	Siebrückstand in [Gew-%]	Siebdurchgang in [Gew-%]
Siebung	16	0	0,0	100
	8	0	0,0	100
	4	0	0,0	100
	2	0,5	1,7	98,3
	1	0,6	2,0	96,3
	0,5	1,8	6,0	90,4
	0,25	4,6	15,3	75,1
	0,125	6,1	20,3	54,8
	0,063	3,5	11,6	43,2
Sedimentation Atterberg-Verfahren	0,02	2,7	9,0	34,2
	0,006	2,7	9,0	25,2
	0,002	2,0	6,7	18,5
	< 0,002	5,6	18,6	-

Tab. A4 Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-3

Grubenlehm GL-4				
Gesamtrockenmasse in [g]:	247,30			
	Korndurchmesser in [mm]	Siebrückstand in [g]	Siebrückstand in [Gew-%]	Siebdurchgang in [Gew-%]
Siebung	16	0	0,0	100
	8	0	0,0	100
	4	5,1	2,1	97,9
	2	3,9	1,6	96,4
	1	5,4	2,2	94,2
	0,5	15,8	6,4	87,8
	0,25	49,7	20,1	67,7
	0,125	54,1	21,9	45,8
	0,063	32,5	13,1	32,7
Sedimentation Atterberg-Verfahren	0,02	22,3	9,0	23,7
	0,006	15,6	6,3	17,4
	0,002	8,3	3,4	14,0
	< 0,002	34,6	14,0	-

Tab. A5 Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-4

Grubenlehm GL-5				
Gesamtrockenmasse in [g]:	30,50			
	Korndurchmesser in [mm]	Siebrückstand in [g]	Siebrückstand in [Gew-%]	Siebdurchgang in [Gew-%]
Siebung	16	0	0,0	100
	8	0	0,0	100
	4	0	0,0	100
	2	0,3	1,0	99
	1	0,3	1,0	98,0
	0,5	0,8	2,6	95,4
	0,25	2,2	7,2	88,2
	0,125	2,6	8,5	79,7
	0,063	2,5	8,2	71,5
Sedimentation Atterberg-Verfahren	0,02	2,9	9,5	61,9
	0,006	5,7	18,7	43,2
	0,002	5,8	19,1	24,1
	< 0,002	7,3	24,1	-

Tab. A6 Sedimentationsanalyse Atterberg-Verfahren, Grubenlehm GL-5

Aräometer-Verfahren

Grubenlehm GL-1					
Zeit Std./Min./Sec.	Uhrzeit Std./Min./Sec.	Temp. Susp. [°C]	Dichte ρ' [g/cm ³]	Trockenmasse m_d in [g] :	24,6
Start	13:11:00			Korndichte ρ_s in [g/cm ³]:	2,67
00.00.30	13:11:30	22,3	1,0130	Dispergierungsmittel:	Natriumpyrophosphat
00.01.00	13:12:00	22,3	1,0125	Meniskuskorrektur C_m in [g/cm ³]:	1,2
00.02.00	13:13:00	22,3	1,0120		
00.05.00	13:16:00	22,3	1,0105		
00.15.00	13:26:00	22,3	1,0080		
00.45.00	13:56:00	22,5	1,0055		
02.00.00	15:11:00	22,6	1,0030		
06.00.00	19:11:00	22,4	1,0020		
24.00.00	13:11:00	22,2	1,0010		

Tab. A7 Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-1

Grubenlehm GL-2					
Zeit Std./Min./Sec.	Uhrzeit Std./Min./Sec.	Temp. Susp. [°C]	Dichte ρ' [g/cm ³]	Trockenmasse m_d in [g] :	21,9
Start	11:05:00			Korndichte ρ_s in [g/cm ³]:	2,67
00.00.30	11:05:30	26,2	1,0110	Dispergierungsmittel:	Natriumpyrophosphat
00.01.00	11:06:00	26,2	1,0105	Meniskuskorrektur C_m in [g/cm ³]:	1,2
00.02.00	11:07:00	26,2	1,0100		
00.05.00	11:10:00	26,2	1,0090		
00.15.00	11:20:00	26,2	1,0080		
00.45.00	11:50:00	26,6	1,0070		
02.00.00	13:05:00	26,8	1,0060		
06.00.00	17:05:00	28,3	1,0045		
24.00.00	11:05:00	29,6	1,0035		

Tab. A8 Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-2

Grubenlehm GL-3					
Zeit Std./Min./Sec.	Uhrzeit Std./Min./Sec.	Temp. Susp. [°C]	Dichte ρ' [g/cm ³]	Trockenmasse m_d in [g] :	29,1
Start	10:36:00			Korndichte ρ_s in [g/cm ³]:	2,67
00.00.30	10:36:30	28,6	1,0135	Dispergierungsmittel:	Natriumpyrophosphat
00.01.00	10:37:00	28,6	1,0130	Meniskuskorrektur C_m in [g/cm ³]:	1,2
00.02.00	10:38:00	28,6	1,0125		
00.05.00	10:41:00	28,6	1,0115		
00.15.00	10:51:00	28,7	1,0100		
00.45.00	11:21:00	28,9	1,0090		
02.00.00	12:36:00	29,2	1,0070		
06.00.00	16:36:00	29,5	1,0055		
24.00.00	10:36:00	30,5	1,0040		

Tab. A9 Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-3

Grubenlehm GL-4					
Zeit	Uhrzeit	Temp. Susp.	Dichte ρ'	Trockenmasse m_d in [g]	
Std./Min./Sec.	Std./Min./Sec.	[°C]	[g/cm ³]	Korndichte ρ_s in [g/cm ³]:	27,9
Start	11:23:00			Dispergierungsmittel:	Natriumpyrophosphat
00.00.30	11:23:30	26,4	1,0140	Meniskuskorrektur C_m in [g/cm ³]:	1,2
00.01.00	11:24:00	26,4	1,0135		
00.02.00	11:25:00	26,4	1,0130		
00.05.00	11:28:00	26,4	1,0120		
00.15.00	11:38:00	26,4	1,0100		
00.45.00	12:03:00	26,5	1,0090		
02.00.00	13:23:00	26,8	1,0075		
06.00.00	17:23:00	28,2	1,0060		
24.00.00	11:23:00	29,6	1,0050		

Tab. A10 Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-4

Grubenlehm GL-5					
Zeit	Uhrzeit	Temp. Susp.	Dichte ρ'	Trockenmasse m_d in [g]	
Std./Min./Sec.	Std./Min./Sec.	[°C]	[g/cm ³]	Korndichte ρ_s in [g/cm ³]:	32,4
Start	10:05:00			Dispergierungsmittel:	Natriumpyrophosphat
00.00.30	10:05:30	26,0	1,0170	Meniskuskorrektur C_m in [g/cm ³]:	1,2
00.01.00	10:06:00	26,0	1,0165		
00.02.00	10:07:00	26,0	1,0162		
00.05.00	10:10:00	26,0	1,0157		
00.15.00	10:20:00	26,0	1,0145		
00.45.00	10:50:00	25,9	1,0125		
02.00.00	12:05:00	25,9	1,0100		
06.00.00	16:05:00	26,6	1,0063		
24.00.00	10:05:00	25,6	1,0005		

Tab. A11 Sedimentationsanalyse mittels Aräometer-Verfahren, Protokoll Grubenlehm GL-5

Anhang 3 Protokolle des Laser-Verfahrens

Massenanteile a der Körner < d in % der Gesamtmenge		0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Korngröße d in [mm]		0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Gruben- lehm	Probe-Nr.:												
GL-1	Probe 1	9,7	23,5	54,6	85,8	98,0	100	100	100	100	100	100	100
GL-1	Probe 2	9,4	23,9	56,2	88,0	98,6	100	100	100	100	100	100	100
GL-1	Probe 3	10,1	24,4	57,6	87,7	98,3	100	100	100	100	100	100	100
GL-1	Probe 4	9,9	23,3	55,7	85,7	98,2	100	100	100	100	100	100	100
GL-1	Probe 5	9,8	22,9	53,6	88,0	97,9	100	100	100	100	100	100	100
GL-1	Probe-MW	9,8	23,6	55,5	87,0	98,2	100	100	100	100	100	100	100
GL-2	Probe 1	7,1	23,8	40,5	48,0	56,5	71,9	90,4	99,9	100	100	100	100
GL-2	Probe 2	8,1	22,9	38,1	47,0	56,2	72,2	91,3	100	100	100	100	100
GL-2	Probe 3	10,7	29,2	48,0	57,3	65,3	77,3	91,0	99,9	100	100	100	100
GL-2	Probe 4	14,5	37,6	61,2	73,1	81,2	93,1	100	100	100	100	100	100
GL-2	Probe 5	8,9	25,9	43,6	51,3	59,5	74,5	91,4	100	100	100	100	100
GL-2	Probe-MW	9,9	27,9	46,3	55,3	63,7	77,8	92,8	99,9	100	100	100	100
GL-3	Probe 1	12,2	28,0	54,1	73,9	80,9	94,9	100	100	100	100	100	100
GL-3	Probe 2	12,1	30,0	52,1	73,4	85	95,1	100	100	100	100	100	100
GL-3	Probe 3	10,4	25,1	44,9	63,5	72,3	82,7	92,7	100	100	100	100	100
GL-3	Probe 4	13,3	30,6	57,6	78,7	85,5	96,3	100	100	100	100	100	100
GL-3	Probe 5	13	30,0	54	76,4	85,1	94,3	100	100	100	100	100	100
GL-3	Probe-MW	12,2	28,7	52,5	73,2	81,8	92,7	98,5	100	100	100	100	100

Tab. A12 Korngrößenverteilung mittels Laserverfahren (Grubenlehme GL-1 – GL-3)

Massenanteile a der Körner < d in % der Gesamtmenge		0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Korngröße d in [mm]													
Gruben- lehm	Probe-Nr.:												
GL-4	Probe 1	7,64	22,9	41,7	55	65,4	78	91,8	99,9	100	100	100	100
GL-4	Probe 2	5,97	17,8	32,4	43,1	53,5	69,4	88,4	99	100	100	100	100
GL-4	Probe 3	8,08	23,8	45,6	57,6	65,5	78,5	93,4	100	100	100	100	100
GL-4	Probe 4	5,85	18,2	34	45	55,4	71,5	87,7	98,0	100	100	100	100
GL-4	Probe 5	7,15	21,6	40,6	50,8	59,5	75,7	92,6	99,9	100	100	100	100
GL-4	Probe-MW	6,9	20,9	38,9	50,3	59,9	74,6	90,8	99,4	100	100	100	100
GL-5	Probe 1	13,2	34,9	64,9	87	95,2	99,4	100	100	100	100	100	100
GL-5	Probe 2	13,1	33,9	66,4	88,1	92,7	98,5	100	100	100	100	100	100
GL-5	Probe 3	12,2	33	60,6	80,7	92,1	98,5	100	100	100	100	100	100
GL-5	Probe 4	12,7	34,8	68	87,3	91,9	98,2	100	100	100	100	100	100
GL-5	Probe 5	12,9	33,5	62,7	83,6	92,3	98,6	100	100	100	100	100	100
GL-5	Probe-MW	12,8	34,0	64,5	85,3	92,8	98,6	100	100	100	100	100	100

Tab. A13 Korngrößenverteilung mittels Laserverfahren (Grubenlehme GL-4; GL-5)

Anhang 4 Stampflehm – Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Zusammensetzung - Versuchsprotokolle

Rohdichte

Probewürfel, Kantenlänge 20 cm, Grubenlehm GL-1

Versuchsserie	Probennummer	Kornverteilungsbereich	Bezeichnung Probenmischung	Gewicht bei Ausgleichsfeuchte	Rohdichte	Kleinstes Einzelwert der Versuchsserie	Mittelwert der Versuchsserie
				[kg]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
1	1	a	KL-1a	-	-	-	-
	2			-	-		
	3			-	-		
2	1	a	KL-1b	-	-	-	-
	2			-	-		
	3			-	-		
3	1	b ₁	KL-1c	18,23	2,3	2,2	2,3
	2			18,31	2,3		
	3			17,91	2,2		
4	1	b ₁	KL-1d	18,52	2,3	2,3	2,3
	2			18,39	2,3		
	3			18,36	2,3		
5	1	b ₁	KL-1e	19,10	2,4	2,3	2,3
	2			18,24	2,3		
	3			18,42	2,3		
6	1	b ₂	KL-1f	18,51	2,3	2,3	2,3
	2			18,71	2,3		
	3			18,66	2,3		
7	1	b ₂	KL-2d	17,81	2,2	2,2	2,2
	2			17,70	2,2		
	3			17,40	2,2		
8	1	b ₂	KL-2e	17,67	2,2	2,2	2,2
	2			17,45	2,2		
	3			17,73	2,2		
9	1	b ₂	KL-2f	16,93	2,1	2,1	2,1
	2			17,10	2,1		
	3			16,97	2,1		
10	1	c	KL-3c	17,29	2,2	2,1	2,1
	2			17,18	2,1		
	3			16,90	2,1		
11	1	c	KL-3d	17,50	2,2	2,1	2,1
	2			17,00	2,1		
	3			16,92	2,1		
12	1	c	KL-3f	16,78	2,1	2,1	2,1
	2			16,82	2,1		
	3			17,42	2,2		

Tab. A14 Ermittelte Rohdichten für Stampflehmgemische mit variierender Korngrößenzusammensetzung

Druckfestigkeit

Probewürfel, Kantenlänge 20 cm, Grubenlehm GL-1

Versuchserie	Probennummer	Kornverteilungsbereich	Bezeichnung Probenmischung	Bruchlast	Druckfestigkeit β_P	Kleinster Einzelwert der Versuchserie	Maximalwert der Versuchserie
				[kN]	[N/mm ²]		
1	1	a	KL-1a	-	-	-	-
	2			-	-		
	3			-	-		
2	1	a	KL-1b	-	-	-	-
	2			-	-		
	3			-	-		
3	1	b ₁	KL-1c	97	2,4	2,4	3,0
	2			120	3,0		
	3			103	2,6		
4a	1	b ₁	KL-1d	164	4,1	3,4	4,9
	2			138	3,4		
	3			196	4,9		
4b	1	b ₁	KL-1d	162	4,1	4,0	4,2
	2			169	4,2		
	3			159	4,0		
5a	1	b ₁	KL-1e	161	4,0	3,4	4,0
	2			148	3,7		
	3			135	3,4		
5b	1	b ₁	KL-1e	152	3,8	3,6	3,8
	2			143	3,6		
	3			149	3,7		
6	1	b ₂	KL-1f	141	3,5	3,5	3,7
	2			146	3,7		
	3			138	3,5		
7	1	b ₂	KL-2d	192	4,8	3,4	4,8
	2			143	3,6		
	3			134	3,4		
8	1	b ₂	KL-2e	134	3,4	3,2	3,4
	2			128	3,2		
	3			136	3,4		
9	1	b ₂	KL-2f	109	2,7	2,3	2,7
	2			94	2,4		
	3			92	2,3		
10	1	c	KL-3c	116	2,9	2,5	2,9
	2			108	2,7		
	3			98	2,5		
11	1	c	KL-3d	113	2,8	2,8	3,1
	2			110	2,8		
	3			125	3,1		
12	1	c	KL-3f	76	1,9	1,9	2,4
	2			96	2,4		
	3			79	2,0		

Tab. A15 Ermittelte Druckfestigkeiten für Stampflehmgemische mit variierender Korngrößenzusammensetzung

Schwindmaß

Probekörper: Abmessungen 70 cm x 15 cm x 15 cm, Grubenlehm GL-1

Versuchsserie	Probennummer	Kornverteilungsbereich	Bezeichnung Probenmischung	Endschwindmaß	Maximalwert der Versuchsserie
				[%]	[%]
1	1	a	KL-1a	-	-
	2			-	
	3			-	
2	1	a	KL-1b	-	-
	2			-	
	3			-	
3	1	b ₁	KL-1c	< 0,1	< 0,1
	2			< 0,1	
	3			< 0,1	
4	1	b ₁	KL-1d	0,1	0,2
	2			0,2	
	3			0,2	
5	1	b ₁	KL-1e	0,5	0,5
	2			0,4	
	3			0,5	
6	1	b ₂	KL-1f	0,4	0,5
	2			0,5	
	3			0,5	
7	1	b ₂	KL-2d	0,7	0,8
	2			0,8	
	3			0,7	
8	1	b ₂	KL-2e	0,4	0,7
	2			0,7	
	3			0,7	
9	1	b ₂	KL-2f	1,2	1,2
	2			1,1	
	3			1,2	
10	1	c	KL-3c	1,1	1,2
	2			1,2	
	3			1,2	
11	1	c	KL-3d	1,2	1,3
	2			1,3	
	3			1,2	
12	1	c	KL-3e	1,3	1,3
	2			1,2	
	3			1,3	

Tab. A16 Ermittelte Schwindmaße für Stampflehmgemische mit variierender Korngrößenzusammensetzung

Elastizitätsmodul

Probezylinder: Abmessungen d = 15 cm, h = 30 cm

Probennummer	Kornverteilungsbereich	Bezeichnung Probenmischung	obere Prüfspannung	untere Prüfspannung	Prüfgeschwindigkeit	E-Modul
			N/mm ²	N/mm ²	N/mm ² je Sekunde	N/mm ²
1	b ₁	KL-1d	0,82	0,12	0,025	353
2	b ₁	KL-1e	0,61	0,09	0,025	312
3	b ₁	KL-b3	0,71	0,11	0,025	287
4	b ₂	KL-b4	0,73	0,11	0,025	427
5	b ₂	KL-1f	0,60	0,09	0,025	365
6	b ₂	KL-2e	0,66	0,10	0,025	267
7	c	KL-3e	0,61	0,09	0,025	187
8	c	KL-3f	0,60	0,09	0,025	169

Tab. A17 Ermittelter Elastizitätsmodul für Stampflehmgemische mit variierender Korngrößenzusammensetzung

Anhang 5 Stampflehm - Rechnerische Ermittlung der Zusammensetzung von Stampflehmgemischen

Kornzusammensetzung der Ausgangsstoffe | Grubenlehme/Mineralische Zuschläge

Durchgang in Masse-% durch die Siebe in mm														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Grubenlehme														
Grubenlehm GL-1		15,8	25,4	68,7	95,4	97,3	98,5	99,4	99,8	99,9	100	100	100	100
Grubenlehm GL-2		11,5	14,9	19,9	27,9	38,2	56,0	84,5	94,5	97,0	98,3	100	100	100
Grubenlehm GL-3		18,6	25,3	34,2	43,2	54,8	75,1	90,4	96,3	98,3	100	100	100	100
Grubenlehm GL-4		14,0	17,4	23,7	32,7	45,8	67,7	87,8	94,2	96,4	97,9	100	100	100
Grubenlehm GL-5		24,1	43,2	61,9	71,5	79,7	88,2	95,4	98,0	99,0	100	100	100	100
Gesteinskörnungen														
Edelbrechsand 0/2		0,6	1,2	2,2	5,5	7,2	18,2	35,6	61,5	91,7	100	100	100	100
Edelsplitt 2/5		0	0	0	0	0	0	0	0,13	2,4	55,7	100	100	100
Splitt 8/16		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	96,5	100

Siebrückstand in Masse-%														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Grubenlehme														
Grubenlehm GL-1	15,8	9,6	43,3	26,7	1,9	1,3	0,9	0,4	0,1	0,1	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	11,5	3,4	5,0	8,0	10,3	17,8	28,5	9,9	2,6	1,2	1,7	0	0	0
Grubenlehm GL-3	18,6	6,7	9,0	9,0	11,6	20,3	15,3	6,0	2,0	1,7	0,0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	14,0	3,4	6,3	9,0	13,1	21,9	20,1	6,4	2,2	1,6	2,1	0	0	0
Grubenlehm GL-5	24,1	19,1	18,7	9,6	8,2	8,5	7,2	2,6	1,0	1,0	0	0	0	0
Gesteinskörnungen														
Edelbrechsand 0/2	0,6	0,6	1,0	3,3	1,7	11,0	17,4	25,9	30,3	8,3	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2,3	53,3	44,3	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	95,0	3,5	0

Anteile an Kornfraktion in [%]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Gesteinskörnungen														
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,4	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0	0

Rechnerische Ermittlung der Kornzusammensetzung von Stampflehmgemischen

Stampflehmgemisch SLM 1

Zusammensetzung

Grubenlehm		kg/Liter bzw. kg/dm ³	Anteil in [L]
Grubenlehm GL-1		1,22	3
Grubenlehm GL-2		1,34	0
Grubenlehm GL-3		1,37	0
Grubenlehm GL-4		1,23	0
Grubenlehm GL-5		1,24	0
Mineralische Zuschläge			
Edelbrechsand 0/2	(0 - 2 mm)	1,49	1,5
Edelsplitt 2/5	(2 - 5 mm)	1,32	4
Splitt 8/16	(8 - 16 mm)	1,45	3

Grubenlehme

Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Grubenlehm GL-1	0,6	0,4	1,6	1,0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Grubenlehm GL-1	0,5	0,3	1,3	0,8	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Mineralische Zuschläge

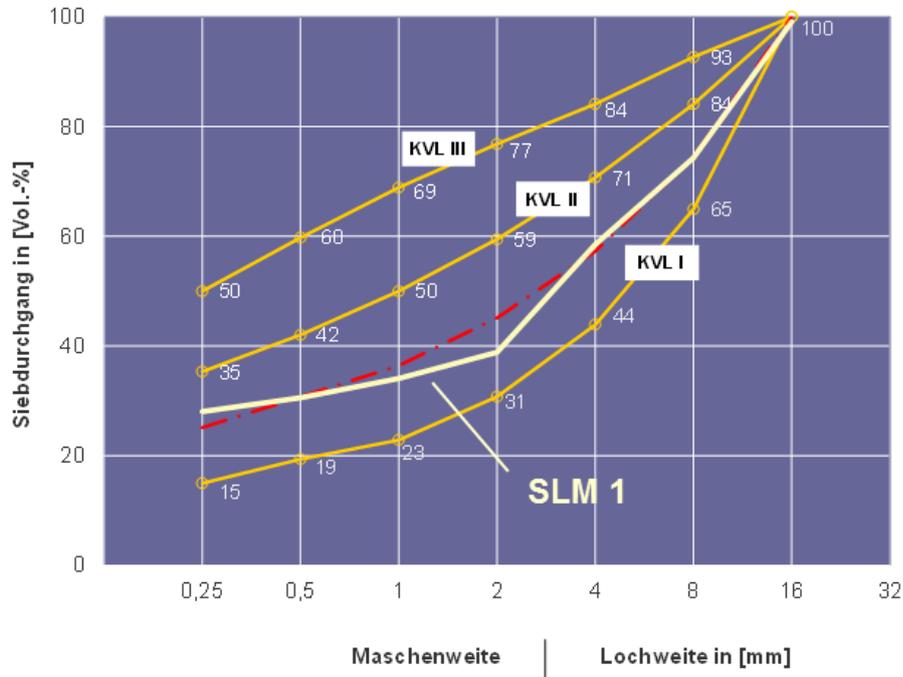
Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0,1	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,2	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2,8	2,3	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	4,1	0,2	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2,1	1,8	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,8	0,1	0

Mineralische Zuschläge (gesamt)

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	4	0	0
Siebrückstand in [Masse-%]	0	0	0	1	0	2	3	5	7	25	20	35	1	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	0	0	0	1	1	3	7	12	18	44	64	99	100
Volumen [RT]	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	2,3	1,8	2,8	0,1	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	0,1	0,1	0,2	0,6	0,3	1,9	3,1	4,6	6,4	26,5	21,4	33,5	1,2	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	0	0	0	1	1	3	6	11	17	44	65	99	100

Kornverteilung Stampflehmgemisch SLM 1

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	1	0	2	1	0	0	0	1	1	3	2	4	0	0,0
Siebrückstand in [Masse-%]	4	2	10	7	1	2	3	4	5	19	16	27	1	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	4	6	17	23	24	26	29	32	38	57	72	99	100
Volumen [RT]	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2	2	3	0	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	4	3	11	7	1	2	2	4	5	20	16	25	1	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	4	7	18	26	26	28	31	34	39	58	74	99	100



Rechnerische Ermittlung der Kornzusammensetzung von Stampflehmgemischen

Stampflehmgemisch SLM 2

Zusammensetzung

Grubenlehm		kg/Liter bzw. kg/dm ³	Anteil in [L]
Grubenlehm GL-1		1,22	0
Grubenlehm GL-2		1,34	0
Grubenlehm GL-3		1,37	7
Grubenlehm GL-4		1,23	0
Grubenlehm GL-5		1,24	0
Mineralische Zuschläge			
Edelbrechsand 0/2	(0 - 2 mm)	1,49	1,5
Edelsplitt 2/5	(2 - 5 mm)	1,32	7
Splitt 8/16	(8 - 16 mm)	1,45	7

Grubenlehme

Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Grubenlehm GL-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-3	1,8	0,6	0,9	0,9	1,1	1,9	1,5	0,6	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Grubenlehm GL-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-3	1,3	0,5	0,6	0,6	0,8	1,4	1,1	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Mineralische Zuschläge

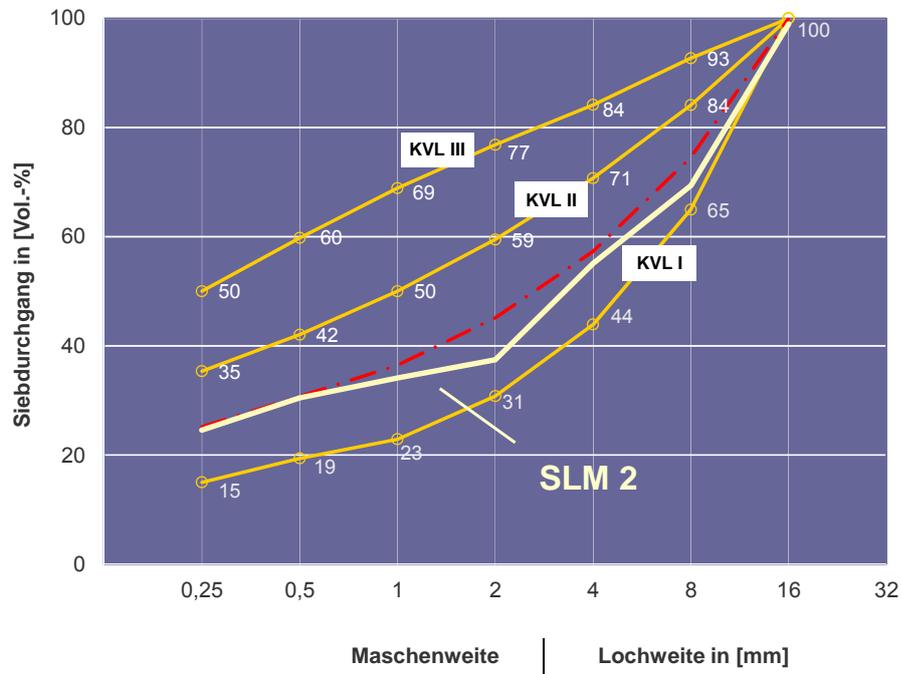
Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0,1	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,2	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	4,9	4,1	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	9,6	0,4	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	3,7	3,1	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	6,6	0,2	0

Mineralische Zuschläge (gesamt)

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0,6	0,9	5,1	4,3	9,6	0,4	0
Siebrückstand in [Masse-%]	0	0	0	0	0	1,1	1,8	2,7	4,1	23,6	19,7	44,6	2	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	0,1	0,1	0,2	0,6	0,7	1,9	3,7	6,4	10,5	34,1	53,8	98	100
Volumen [RT]	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,6	3,9	3,2	6,6	0,2	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	1,1	1,7	2,6	4,0	24,9	20,7	42,9	1,6	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	0	0	0	0,5	0,7	1,8	3,4	6,0	10,0	34,8	55,5	98,4	100

Kornverteilung Stampflehmgemisch SLM 2

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	2	1	1	1	1	2	2	1	1	5	4	10	0	0,0
Siebrückstand in [Masse-%]	6	2	3	3	4	7	6	4	3	17	14	31	1	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	6	8	11	14	17	24	30	34	38	54	68	99	100
Volumen [RT]	1	0	1	1	1	2	1	1	1	4	3	7	0	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	6	2	3	3	4	7	6	4	3	18	14	30	1	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	6	8	11	14	18	25	30	34	37	55	69	99	100



Rechnerische Ermittlung der Kornzusammensetzung von Stampflehmgemischen

Stampflehmgemisch SLM 3

Zusammensetzung

	kg/Liter bzw. kg/dm ³	Anteil in [L]
 Grubenlehm		
Grubenlehm GL-1	1,22	0
Grubenlehm GL-2	1,34	0
Grubenlehm GL-3	1,37	0
Grubenlehm GL-4	1,23	13
Grubenlehm GL-5	1,24	0
Mineralische Zuschläge		
Edelbrechsand 0/2 (0 - 2 mm)	1,49	1,5
Edelsplitt 2/5 (2 - 5 mm)	1,32	9
Splitt 8/16 (8 - 16 mm)	1,45	9

Grubenlehme

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32

Mineralische Zuschläge

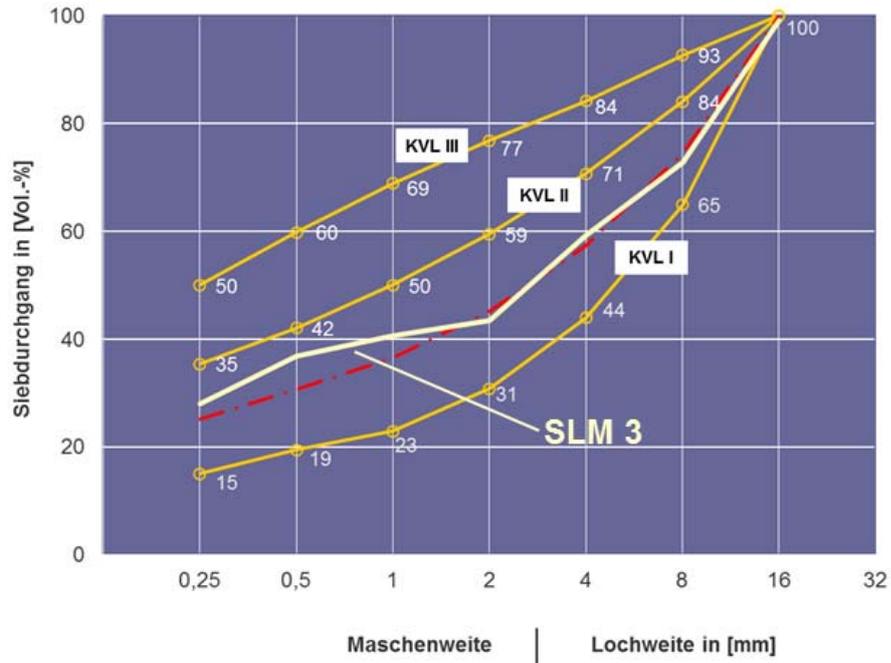
Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0,1	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,2	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	6,3	5,3	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	12,4	0,5	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	3,7	3,1	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	6,6	0,2	0

Mineralische Zuschläge (gesamt)

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0,6	0,9	6,5	5,5	12,4	0,5	0
Siebrückstand in [Masse-%]	0	0	0	0	0	0,9	1,4	2,2	3,5	24,0	20,1	45,6	1,7	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	0	0,1	0,2	0,5	0,6	1,5	2,9	5,1	8,6	32,6	52,7	98,3	100
Volumen [RT]	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,7	4,9	4,1	8,5	0,3	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	0	0	0,1	0,3	0,1	0,8	1,3	2,1	3,4	25,2	21,2	43,8	1,6	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	0	0	0	0,4	0,6	1,4	2,7	4,8	8,2	33,4	54,6	98,4	100

Kornverteilung Stampflehmgemisch SLM 3

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	2	1	1	2	2	4	4	2	1	7	6	12	0	0
Siebrückstand in [Masse-%]	5	1	2	4	5	9	8	4	3	16	13	29	1	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	5	7	9	12	17	26	34	38	41	57	70	99	100
Volumen [RT]	2	0	1	1	2	3	3	1	1	5	4	9	0	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	6	1	3	4	5	9	9	4	3	16	14	26	1	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	6	7	10	13	19	28	37	41	43	59	73	99	100



Rechnerische Ermittlung der Kornzusammensetzung von Stampflehmgemischen

Stampflehmgemisch SLM 4

Zusammensetzung

Grubenlehm	kg/Liter bzw. kg/dm ³	Anteil in [L]
Grubenlehm GL-1	1,22	0
Grubenlehm GL-2	1,34	0
Grubenlehm GL-3	1,37	0
Grubenlehm GL-4	1,23	0
Grubenlehm GL-5	1,24	2,5
Mineralische Zuschläge		
Edelbrechsand 0/2 (0 - 2 mm)	1,49	1,5
Edelsplitt 2/5 (2 - 5 mm)	1,32	4
Splitt 8/16 (8 - 16 mm)	1,45	3

Grubenlehme

Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Grubenlehm GL-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-5	0,7	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Grubenlehm GL-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-5	0,6	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0

Mineralische Zuschläge

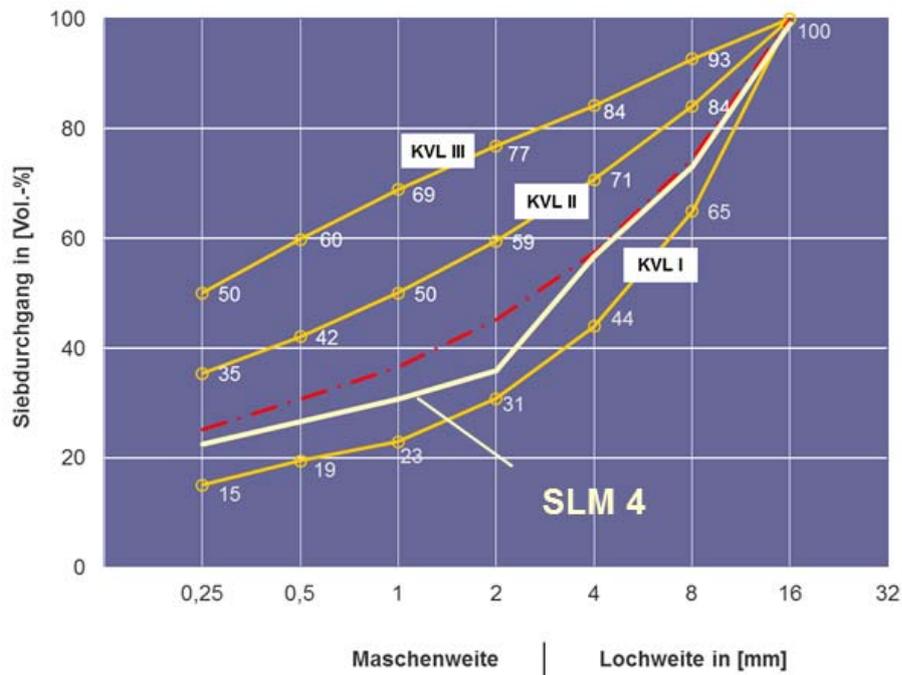
Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0,1	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,2	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2,8	2,3	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	4,1	0,2	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2,1	1,8	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	2,8	0,1	0

Mineralische Zuschläge (gesamt)

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0,6	0,8	3,0	2,4	4,1	0,2	0
Siebrückstand in [Masse-%]	0	0	0	1	0	2,1	3,3	4,9	6,7	25,3	20,3	34,8	1,3	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	0	0,2	0,4	1,0	1,4	3,4	6,7	11,6	18,3	43,6	63,9	98,7	100
Volumen [RT]	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	2,3	1,8	2,8	0,1	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	0	0	0,2	0,6	0,3	1,9	3,1	4,6	6,4	26,5	21,4	33,5	1,2	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	0	0	0	1,0	1,3	3,2	6,3	10,9	17,3	43,8	65,2	98,8	100

Kornverteilung Stampflehmgemisch SLM 4

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	1	1	1	0	0	1	1	1	1	3	2	4	0	0
Siebrückstand in [Masse-%]	5	4	4	2	2	3	4	4	6	20	16	28	1	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	5	9	13	16	18	21	25	30	35	55	71	99	100
Volumen [RT]	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	3	0	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	6	4	4	3	2	3	4	4	5	21	17	26	1	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	6	10	14	17	19	23	27	31	36	57	73	99	100



Rechnerische Ermittlung der Kornzusammensetzung von Stampflehmgemischen

Stampflehmgemisch SLM 5

Zusammensetzung

Grubenlehm	kg/Liter bzw. kg/dm ³	Anteil in [L]
Grubenlehm GL-1	1,22	0
Grubenlehm GL-2	1,34	2
Grubenlehm GL-3	1,37	0
Grubenlehm GL-4	1,23	0
Grubenlehm GL-5	1,24	2
Mineralische Zuschläge		
Edelbrechsand 0/2 (0 - 2 mm)	1,49	1,5
Edelsplitt 2/5 (2 - 5 mm)	1,32	4
Splitt 8/16 (8 - 16 mm)	1,45	3

Grubenlehme

Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Grubenlehm GL-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	0,3	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	0,3	0,1	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-5	0,6	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Grubenlehm GL-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,6	0,2	0,1	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Grubenlehm GL-5	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0

Mineralische Zuschläge

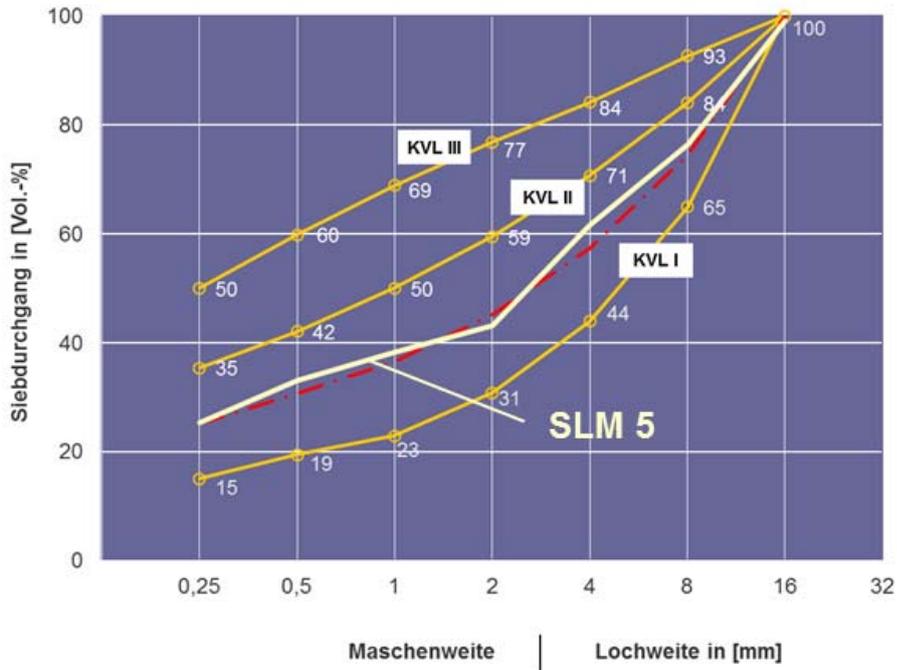
Siebrückstand: Masse in [g]														
	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0,1	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,2	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2,8	2,3	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	4,1	0,2	0
Siebrückstand: Volumen [RT]														
Edelbrechsand 0/2	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0	0	0	0
Edelsplitt 2/5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2,1	1,8	0	0	0
Splitt 8/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	2,8	0,1	0

Mineralische Zuschläge (gesamt)

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0,6	0,8	3,0	2,4	4,1	0,2	0
Siebrückstand in [Masse-%]	0	0	0	1	0	2,1	3,3	4,9	6,7	25,3	20,3	34,8	1,3	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	0	0,2	0,4	1,0	1,4	3,4	6,7	11,6	18,3	43,6	63,9	98,7	100
Volumen [RT]	0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	2,3	1,8	2,8	0,1	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	0	0,1	0,2	0,6	0,3	1,9	3,1	4,6	6,4	26,5	21,4	33,5	1,2	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	0,1	0,2	0,4	1,0	1,3	3,2	6,3	10,9	17,3	43,8	65,2	98,8	100

Kornverteilung Stampflehmgemisch SLM 5

	< 0,002	0,002	0,006	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Siebrückstand Masse in [g]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	4	0	0
Siebrückstand in [Masse-%]	5	3	4	3	3	5	8	5	5	18	14	24	1	0
Siebdurchgang in [Masse-%]	0	5	9	12	16	19	24	32	37	43	60	75	99	100
Volumen [RT]	1	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	3	0	0
Siebrückstand in [Volumen-%]	6	4	4	3	3	6	8	5	5	18	15	23	1	0
Siebdurchgang in [Volumen-%]	0	6	9	13	17	20	25	33	38	43	62	76	99	100



Anhang 6 Stampflehme mit vorgegebener Materialzusammensetzung – Versuchsprotokolle

Rohdichte

Probewürfel, Kantenlänge 20 cm

Versuchsserie	Probennummer	optimaler Kornverteilungsbereich	Stampflehmgemisch	Gewicht bei	Rohdichte	Kleinster Einzelwert der Versuchsserie
				Ausgleichsteuchte		
				[kg]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]
1	1	b ₁ /b ₂	SLM 1	19,1	2,4	2,3
	2			18,2	2,3	
	3			18,4	2,3	
2	1	b ₁ /b ₂	SLM 2	18,7	2,3	2,3
	2			18,9	2,4	
	3			18,8	2,4	
3	1	b ₁ /b ₂	SLM 3	18,7	2,3	2,3
	2			19,1	2,4	
	3			18,4	2,3	
4	1	b ₁ /b ₂	SLM 4	18,7	2,3	2,3
	2			18,4	2,3	
	3			18,5	2,3	
5	1	b ₁ /b ₂	SLM 5	18,9	2,4	2,4
	2			19,1	2,4	
	3			18,8	2,4	

Tab. A18 Ermittelte Rohdichten für Stampflehmgemische mit vorgegebener (optimierter) Korngrößenzusammensetzung

Druckfestigkeit

Probewürfel, Kantenlänge 20 cm

Versuchsserie	Probennummer	optimaler Kornverteilungsbereich	Stampflehmgemisch	Bruchlast	Druckfestigkeit β_P	Kleinstes Einzelwert der Versuchsserie	Maximalwert der Versuchsserie
				[kN]	[N/mm ²]		
1	1	b ₁ /b ₂	SLM 1	161	4,04	3,4	4,0
	2			148	3,69		
	3			135	3,37		
2	1	b ₁ /b ₂	SLM 2	175	4,39	3,2	4,4
	2			128	3,20		
	3			164	4,10		
3	1	b ₁ /b ₂	SLM 3	151	3,78	3,3	3,8
	2			132	3,29		
	3			148	3,70		
4	1	b ₁ /b ₂	SLM 4	173	4,34	3,2	4,3
	2			127	3,17		
	3			164	4,10		
5	1	b ₁ /b ₂	SLM 5	122	3,05	3,1	4,0
	2			135	3,40		
	3			161	4,00		

Tab. A19 Ermittelte Druckfestigkeiten für Stampflehmgemische mit vorgegebener (optimierter) Korngrößenzusammensetzung

Schwindmaß

Probekörper: Abmessungen 70 cm x 15 cm x 15 cm

Versuchsserie	Probennummer	optimaler Kornverteilungsbereich	Stampflehmgemisch	Endschwindmaß
				[%]
1	1	b ₁ /b ₂	SLM 1	0,5
	2			0,4
	3			0,5
2	1	b ₁ /b ₂	SLM 2	0,1
	2			0,3
	3			0,3
3	1	b ₁ /b ₂	SLM 3	0,3
	2			0,2
	3			0,3
4	1	b ₁ /b ₂	SLM 4	0,3
	2			0,2
	3			0,3
5	1	b ₁ /b ₂	SLM 5	0,3
	2			0,3
	3			0,3

Tab. A20 Ermittelt es Schwindmaß für Stampflehmgemische mit vorgegebener (optimierter) Korngrößenzusammensetzung

Literaturverzeichnis

- [Allman – 2003] Allmann, R. : Röntgenpulverdiffraktometrie, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003
- [Bazara – 1998] Bazara, A : Bautechnische Grundlagen zum Lehmgeschoßbau im Jemen. Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Fraunhofer IRB Verlag (Stuttgart), Berlin 1998
- [Bussert – 2004] Bussert, R.: Tongeologie, Skript zur Lehrveranstaltung Tongeologie am FG Sedimentologie und Explorationsgeologie an der Technischen Universität Berlin, Berlin 2004
- [Chamley – 1989] Chamley, H.: Clay Sedimentolgy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989, 561 (623) Seiten
- [Cointereaux - 1803] Cointereaux, F.: Die Pisé-Baukunst. Herausgegeben von C.L. Seebaß, Leipzig 1803; Reprint Zentralantiquariat der DDR, Leipzig 1989
- [CRATerre – 1991] CRATerre/Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE in der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ): The Basics of Compressed Earth Blocks, Eschborn 1991
- [Dachverband Lehm e.V. -2002] Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): Lehm bau Regeln. Braunschweig/Wiesbaden 2002
- [Dachverband Lehm e.V. – 2004] Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): Lehm 2004: Tagungsbeiträge der 4. Internationalen Fachtagung für Lehm bau, Weimar 2004
- [Dachverband Lehm e.V. -2009] Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): Lehm bau Regeln. 3. überarbeitete Auflage, Wiesbaden 2009
- [Dahlhaus et al – 2001] Dahlhaus, U.; Eider, W.; Papke, L.: Lehm bau 2001, Aachen 2001
- [Dethier – 1982] Dethier, J.: Lehmarchitektur, Die Zukunft einer vergessenen Bautradition, Mit einem Vorwort zur deutschen Ausgabe von Heinrich Klotz sowie Beiträgen von Karl Heinz Striedter und Hildegard Erhard, Prestel-Verlag, München 1982
- [Dierks/Ziegert – 2000] Dierks, K., Ziegert, C.: Materialprüfung und Begleitforschung im tragenden Lehm bau. In: Wiese, K.

- (Hrsg.): Lehm 2000, Beiträge zur 3. internationalen Fachtagung Lehmbau des Dachverbandes Lehm e.V. 17.-19.11.2000 in Berlin, Berlin 2000
- [Dierks/Ziegert – 2002] Dierks, K.; Ziegert C.: Tragender Stampflehm. In Avak, R.; Goris, A. (Hrsg.): Stahlbeton aktuell, Praxishandbuch, Berlin 2002
- [Die Wille – 2003] Die Wille gGmbH (Hrsg.): Moderner Lehm 2003 Nachhaltiger Wohnungsbau - Zukunft Ökologisches Bauen, Berlin 2003
- [DIN 1045 – 2] DIN 1045 – 2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Juli 2001
- [DIN 1048 – 1] DIN 1048 – 1: Prüfverfahren für Beton: Frischbeton, Juni 1991
- [DIN 1048 – 2] DIN 1048 – 2: Prüfverfahren für Beton: Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, Juni 1991
- [DIN 4022 – 1] DIN 4022 – 1: Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels (1969)
- [DIN 18123] DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Bestimmung der Korngrößenverteilung. Berlin 1996
- [DIN 18 951] DIN 18951, 1971 zurückgezogen: Blatt 1: Lehmverfahren, Blatt 2: Lehmbauten, Vorschriften für die Ausführung; Erläuterungen. Berlin 1951
- [DIN 18952] DIN 18952, Vornorm, 1971 zurückgezogen: Lehm; Baulehm; Blatt 1: Begriffe, Arten, Blatt 2: Prüfung von Baulehm. Berlin 1956
- [DIN 18953] DIN 18953, Vornorm, 1971 zurückgezogen: Lehm; Baulehm; Lehmteile;
Blatt 1: Verwendung von Baulehm;
Blatt 2: Gemauerte Lehmwände;
Blatt 3: Gestampfte Lehmwände;
Blatt 4: Gewellte Lehmwände;
Blatt 5: Leichtlehmwände in Gerippebauten;
Blatt 6: Lehmfußböden. Berlin 1956

- [DIN 18954] DIN 18954, Vornorm, 1971 zurückgezogen: Lehm-
bau; Ausführung von Lehmbauten; Richtlinien.
Berlin 1956
- [DIN 18955] DIN 18955, Vornorm, 1971 zurückgezogen: Lehm-
bau; Baulehm; Lehmbauteile, Feuchtigkeitsschutz. Berlin
1956
- [DIN 18956] DIN 18956, Vornorm, 1971 zurückgezogen: Lehm-
bau; Putz auf Lehmbauteilen. 1956
- [DIN 18957] DIN 18957, Vornorm, 1971 zurückgezogen:
Lehm-
bau; Lehmschindeldach. Berlin 1956
- [Engelhardt/Müller – 1964] Engelhardt, W.; Müller G.: Sediment-Petrologie Teil 1,
Methoden der Sediment-Untersuchung, Schweizerbart
Verlag, Stuttgart 1964
- [Fauth – 1946] Fauth, W.: Der praktische Lehm-
bau, Wiesbaden 1946
- [Frick et al – 1972] Frick, Knöll, Neumann: Baukonstruktionslehre, Bd.1-
25., neubearb. und erw. Aufl. bearb. von Friedrich
Neumann, Teubner Verlag, Stuttgart 1972
- [Füchtbauer – 1988] Füchtbauer, H.: Sediment-Petrologie Teil 2: Sedimente
und Sedimentgestein, 4. Auflage, Schweizerbart
Verlag, Stuttgart 1988
- [Günther – 1826] Günther, O.B.: Ausführliche Beschreibung des Pisé-
Baues mit allen dabei vorkommenden Arbeiten und den
vielen Verbesserungen neuerer Zeit [für Baumeister
und Landwirthe neu bearbeitet, durch Beobachtungen
und praktische Erfahrungssätze vervollkommnet] Als
des vergriffenen Werkes: Über die Pisé-Baukunst von
Herrn Prof. Seebaß zweite Auflage, Baumgärtner
Verlag; Leipzig 1826
- [Grübl et al – 2001] Grübl, P., Weigler, H., Sieghart, K.: Beton – Arten, Her-
stellung und Eigenschaften, Auflage 2001,
Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [Houben/Guillaud – 1989] Houben, H., Guillaud H.: Traite de construction en terre:
L'encyclopédie de la construction en terre (auch in eng.),
Editions Paranthèses Marseille, Marseille 1989
- [Huber et al – 1997] Huber, A.-L.: Neues Bauen mit Lehm: Konstruktionen
und gebaute Objekte / Anne-Louise Huber; Thomas
Kleespies; Petra Schmidt, 1. Auflage, Stauffen bei
Freiburg: Ökobuch, 1997

- [Jasmund/Lagaly – 1993] Jasmund, K.; Lagaly, G. (Hrsg.): Tonminerale und Tone (Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt, 1. Auflage, Steinkopff Verlag, Darmstadt, 1993
- [Kapfinger/Rauch – 2001] Kapfinger O., Rauch M.: Rammed Earth und Architektur (Terra Cruda e Architettura), Basel 2001
- [Karliczek – 1997] Karliczek, R.: 5000 Jahre Architektur. Vom Lehm- zum Betonbau, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [Keppler/Lemke – 1986] Keppler, M.; Lemke, T.: Mit Lehm gebaut, ein Lehmhaus im Selbstbau, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe 1986
- [Kézdi – 1973] Kézdi, Á.: Handbuch der Bodenmechanik, Band III. Bodenmechanisches Versuchswesen, Deutsche Bearbeitung: Kinze, W.; Kinze M.; Rudert, J., VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1973
- [KirchBauhof – 1998] KirchBauhof gGmbH (Hrsg.): Modern Bauen mit Lehm - Ein Ratgeber der KirchBauhof gGmbH, Berlin 1998
- [KirchBauhof – 1999] KirchBauhof gGmbH (Hrsg.): Moderner Lehm- bau Einführung und Messekatalog 1999 (zur 3. Lehmbaummesse Berlin/Brandenburg 1999), Berlin 1999
- [KirchBauhof – 2002] KirchBauhof gGmbH (Hrsg.): Moderner Lehm- bau 2002 - Internationale Beiträge zum modernen Lehm- bau, Berlin 2002
- [Kleespies/Huber – 1994] Kleespies, T. ; Huber A.-L.: Wärmeschutz und Feuchte- verhalten von Lehm- baustoffen. Forschungsgruppe Lehm- bau; ETH-Zürich (1994)
- [Kleespies – 1997] Kleespies, T.: Schweizer Pisébauten. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1997
- [Krüger - 2004] Krüger, S.: Stampflehm – Renaissance einer alten Technik 1. Auflage, manudom Verlag, Aachen 2004
- [Miller et al – 1947] Miller, T.; Grigutsch, E.; Schulze, K.W.: Lehm- baufibel Darstellung der reinen Lehm- bauweisen (Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaften Hochschule/Weimar, Heft 3, 1947, Universitätsverlag Bauhaus Universität Weimar, Reprint der 2. Auflage in 1999

- [Minke – 1987] Minke, G.: Bauen mit Lehm, Aktuelle Berichte aus Praxis und Forschung, Heft 1 bis 6, Ökobuch Verlag 1984-1987
- [Minke – 2001] Minke, G.: Das neue Lehm-Bau-Handbuch, 5. Auflage, Stauffen bei Freiburg 2001
- [Minke – 2004] Minke, G.: Das neue Lehm-Bau-Handbuch, 6. Auflage, Stauffen bei Freiburg 2004
- [Müller – 2001] Müller, F.: Gesteinskunde, Lehrbuch und Nachschlagewerk über Gesteine für Hochbau, Innenarchitektur, Kunst und Restaurierung, 6. Auflage, Ebner Verlag, Ulm 2001
- [Niemeyer – 1944] Niemeyer, R.: Der Massive Lehm-Bau. In: Der Wohnungsbau in Deutschland, Heft 7/8, April 1944, Berlin 1944
- [Niemeyer – 1946] Niemeyer, R.: Der Lehm-Bau und seine praktische Anwendung, Nienburg a.d. Weser 1946, unveränderter Nachdruck der Originalausgabe Grebenstein 1982
- [Pollack/Richter – 1952] Pollack, E./Richter, E.: Technik des Lehm-Baus, Berlin 1952
- [Raulin – 1984] Raulin, H.: Lehm-Bau in Frankreich. In: Jahrbuch für Hausforschung 34, Marburg 1984
- [Rauch – 1998] Rauch, M.: Moderner Massivlehm-Bau. In: Wiese, K. (Hrsg.): Modern Bauen mit Lehm, Berlin 1998
- [Riemann – 1988] Riemann, A.: Baustoff Lehm, Karlsruhe 1988
- [Sachs – 1825] Sachs, S.: Anleitung zur Erd-Bau-Kunst (Pisé-Bau): Anwendung auf alle Arten von Stadt- und Land-Bauten, Berlin 1825
- [Salmang/Scholze – 1951] Salmang, G.; Scholze, H.: Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik, Heidelberg 1951
- [Schäffler et al – 2005] Schäffler H., Bruy E., Schelling, G.: Baustoffkunde, Aufbau und Technologie, Arten und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung, Vogel Buchverlag, 9. Auflage, Würzburg 2005
- [Schillberg – 1993] Schillberg, K., Knieriemen, H., Naturbaustoff Lehm, Aarau (CH) 1993
- [Schillberg – 2001] Schillberg, K., Knieriemen, H.: Bauen und sanieren mit Lehm; Kork, Hanf und Schilf in modernen

- Lehmbautechniken, 1. Auflage, AT Verlag, Aarau (Schweiz) 2001
- [Schneider et al - 1996] Schneider, U.; Schwimann M.; Bruckner H.: Lehmbau für Architekten und Ingenieure: Konstruktion, Baustoffe und Bauverfahren, Prüfungen und Normen, Rechenwerte, Auflage, Werner Verlag GmbH, Düsseldorf 1996
- [Scholz/Hiese – 1999] Scholz, W., Hiese, W.: Baustoffkenntnis, 14. Auflage 1999, Werner Verlag GmbH Co. KG, Düsseldorf
- [Schroeder – 2004] Schroeder, H., Bieber A.: Neue Stampflehmprojekte in Thüringen, in Lehm 2004 Tagungsbeiträge der 4. Internationalen Fachtagung für Lehm, S. 190 – 201, Schriften des Dachverbandes Lehm e.V. Eigenverlag Dachverband Lehm e.V., Weimar 2004
- [SIA – 1991] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA-Dokumentationen D 0111: Bauen mit Lehm, Zürich 1991, (alle drei Teile sind zu wesentlichen Teilen nachgedruckt in Huber, A.L., Keespies T., Schmidt, P.: Neues Bauen mit Lehm 1997)
- [SIA – 1994] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA-Dokumentationen D 0112: Lehm, Zürich 1994 (alle drei Teile sind zu wesentlichen Teilen nachgedruckt in Huber, A.L., Keespies Th., Schmidt, P.: Neues Bauen mit Lehm 1997)
- [Sieber - 1988] Baustoff Lehm: Sammlung Lehmverfahren / Lehrmittelwerkstätten A. Reimann, Weilburg. Neu hrsg. von Heinz G. Sieber (enthält Nachdrucke zurückgezogener Lehmbaunormen), (C.F. Müller, 2. Auflage 1994)
- [Steingass – 2000] Steingass, P (Hrgs.): Lehm 2000 - Beiträge zur 3. Internationalen Fachtagung Lehm des Dachverband Lehm e.V., 17.-19. November 2000 in Berlin, Overall Verlag Berlin, 2000
- [Steingass – 2002] Steingass, P (Hrgs.): Moderner Lehm, Stuttgart 2002
- [Steingass – 2005] Herausgegeben von Umbra Umwelt- und Unternehmensberatung GmbH durch Peter Steingass: Moderner Lehm, Tagungsband, Berlin 2005

- [Svedberg/Pedersen – 1940] Svedberg, T.; Petersen, K.O.: Die Ultrazentrifuge. Handbuch der Kolloidwissenschaft, Band VII, 436 S., Verlag Steinkopff, Dresden-Leipzig, 1940
- [Volhardt - 1995] Volhard, F.: Leichtlehm-bau, alter Baustoff - neue Technik; 5. ergänzte Auflage; Verlag C.F. Müller; 1995
- [Wimpf, W.J. – 1837] Der Pisé-Bau oder vollständige Anweisung äußerst wohlfeile, dauerhafte, warme und feuerfeste Wohnungen aus bloßer gestampfter Erde, Pisébau genannt, zu erbauen: aus 36-jähriger Erfahrung geschöpft. Mit vielen litographischen Tafeln erläutert, 1837-1838, Verlag Lanz, Weilburg 1837
- [Ziegert – 2003] Ziegert, C.: Lehmwellerbau, Konstruktion, Schäden und Sanierung; Fraunhofer IRB Verlag, Berlin 2003
- [Ziegert – 2005] Ziegert, C.: Innovative Konstruktionen im Stampflehm-bau, Berlin 2005
- [Zur Nieden/Ziegert – 2002] Zur Nieden, G.; Ziegert, C: Neue Lehm-Häuser International - Projektbeispiele, Konstruktion, Details; Berlin 2002