

Faserbewehrter Lehm

Teil 1: Grundlagen des Lehmbaus und Experimente zur Lehm

Inhaltsverzeichnis

VORWORT.....	- 5 -
1.EINLEITUNG.....	- 6 -
2. STAND DER TECHNIK.....	- 8 -
2.1 BAUSTOFF LEHM.....	- 8 -
2.1.1 Rohstoffgewinnung.....	- 8 -
Bodenaushub	- 8 -
Aufbereitungsrückstände aus Kieswerken.....	- 8 -
Ausschussrohlinge aus Ziegeleien	- 8 -
2.1.2 Zusammensetzung	- 9 -
2.1.3 Eigenschaften	- 12 -
Zusammensetzung	- 12 -
Schwindverhalten	- 12 -
Wasserfestigkeit.....	- 13 -
Speichervermögen	- 13 -
Umweltverträglichkeit	- 13 -
Absorptionsvermögen.....	- 14 -
2.2 LEHMBAUTEILE	- 14 -
2.2.1 Geschichte des Lehmbau	- 14 -
2.2.2 Normung.....	- 15 -
2.2.3 Bauteile.....	- 16 -
Lehmsteine	- 16 -
Lehmplatten	- 16 -
Lehmmörtel	- 17 -
2.2.3.1 Herstellungstechnik Lehmstein	- 17 -
Lehmsteine	- 17 -
2.2.4 Bauweisen.....	- 19 -
Stampflehm.....	- 19 -
Wellerlehm	- 19 -
Strohlehm	- 19 -
Leichtlehm	- 19 -
Lehmschüttungen.....	- 20 -
2.2.4.1 Herstellungstechnik Stampflehm	- 20 -
Stampflehmbau.....	- 20 -

2.2.5 Verbesserung der Materialeigenschaften	- 21 -
Verringern der Rissbildung beim Austrocknen	- 21 -
Erhöhung der Wasserfestigkeit	- 22 -
Bindekraftoptimierung	- 23 -
2.3 MARKTSITUATION	- 24 -
2.3.1 Hersteller und Produkte	- 24 -
Hersteller	- 24 -
Produkte	- 24 -
Internetadresse	- 24 -
3. EIGENE ARBEITEN	- 25 -
3.1 LABORVERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER LEHMMISCHUNG	- 25 -
3.1.1 Einleitung	- 25 -
3.1.2 Mischungen	- 26 -
3.1.3 Laborversuche	- 27 -
Bestimmung der Korngrößenverteilung	- 27 -
Bestimmung des Wassergehaltes	- 29 -
Bestimmung der Konsistenzgrenzen	- 29 -
3.1.4 Ergebnisse	- 31 -
Probe 7833	- 31 -
Probe 7834	- 32 -
Probe 7835	- 33 -
Probe 7836	- 34 -
Probe 7837	- 35 -
Probe 7838	- 36 -
Zusammenfassung	- 37 -
3.2 EINAXIALE DRUCKVERSUCHE	- 38 -
3.2.1 Einleitung	- 38 -
3.2.2 Herstellung der Probekörper	- 38 -
Mischungen	- 39 -
3.2.3 Versuchsdurchführung	- 40 -
3.2.4 Ergebnisse	- 42 -
Probe 7836	- 42 -
Probe 7837	- 43 -
Probe 7838	- 44 -
Probe 7840	- 45 -
Probe 7841	- 46 -
3.2.5 Auswertung	- 47 -
4.PERSPEKTIVEN UND MÖGLICHKEITEN	- 49 -

LITERATURVERZEICHNIS	- 50 -
Zitierte und verwendete Literatur	- 50 -
Internetadressen	- 50 -

Vorwort

„Adam, der vom Acker genommene, wurde von Gott aus dem Lehm des Ackerbodens erschaffen“ (1.Buch Mose, Kap. 2)

Auf den ersten Seiten der Weißheitstexte des Alten Testaments wird der Baustoff Lehm bereits erwähnt. Aus ihm wurde der erste Mensch erschaffen. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit des Lehms in der Geschichte der Menschheit. Heute findet Lehm als Baustoff kaum noch Beachtung in den westlichen Industrienationen, obwohl er in ökologischen und ökonomischen Bereichen andere Baustoffe übervorteilen kann. Heute haben Länder und Völker die als rückständig und entwicklungsbedürftig gelten einen Wissens- und Kompetenzvorsprung im Lehmbau, weil sie ihr Jahrtausende altes Wissen bewahrt und erweitert haben.

Diese Studienarbeit soll Lehm als Baustoff wieder ins Bewusstsein rücken und Perspektiven des Lehmbaus im Bereich der modernen Bautechnik aufzeigen

1. Einleitung

Das Interesse an Lehm als einem leistungsfähigen, kosteneffektiven Baumaterial hat in den letzten Jahren stark zugenommen.

Bei der Planung und Realisierung von Bauvorhaben gewinnt die Umsetzung von Nachhaltigkeitsaspekten immer mehr an Bedeutung. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist hierbei die Verwendung von leicht recycelbaren und in der Herstellung energiearmen Baustoffen. Lehm ist ein solcher Baustoff.

Lehm eignet sich dank seiner positiven Eigenschaften hervorragend für die Umsetzung von Nachhaltigkeitsgrundsätzen in der Bauwirtschaft. Sowohl in der Herstellung als auch bei der Verarbeitung und Nutzung sowie der späteren Entsorgung verbraucht Lehm als Baustoff kaum Energie. Lehm hat neuesten Baumaterialien überlegene feuchtigkeitsregulierende und temperaturregulierende Eigenschaften.

Trotz der außergewöhnlichen Materialeigenschaften leidet der Baustoff Lehm an einem Informations- und Imagedefizit. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Zum einen fehlt es grundsätzlich an Fachwissen über Lehm als Baustoff, der daher als Nischenprodukt kaum wahrgenommen wird. Zum anderen liegt das Imagedefizit in der Tatsache begründet, dass Lehm in den 20er Jahren und in den Nachkriegszeiten 1945 – 1952 aus Not und Mangel eingesetzt wurde und daher sein Image als „Behelfsbaustoff“ hat. Lehm wird zudem von vielen Öko- oder Alternativbauherren verwendet, die in fälschlich belächelter „Do-it-yourself-Bauweise“ ihre Gebäude aus Geflecht und Lehmbewurf konstruieren.

Da aber die ökologischen und ökonomischen Eigenschaften Lehm zu einem höchst aktuellen Baustoff qualifizieren, muss die Frage gestellt werden, in welcher Weise dieser traditionelle Baustoff noch verbessert werden kann.

Lehm hat ein großes aber unterschätztes und kaum wahrgenommenes Potential als moderner Baustoff. Dieses Potential soll in dieser Ausarbeitung verdeutlicht werden. Die Zielsetzung der Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines Baukörpers aus Lehm und 3-dimensionalen Gewirken.

Die bauphysikalischen Eigenschaften des Lehms und die bewehrenden Möglichkeiten des Gewirkes führen zu einem vielfältigst einsetzbaren Material in der heutigen Bauwirtschaft.

Die vorliegende Forschungsarbeit befasst sich mit der Entwicklung von neuen Lehmbaumodulen, die ein Verbundsystem aus Lehm und dreidimensionalen Gewirken eingehen. Dieser Werkstoff kann z.B. als Materialträger für Trockenbauelemente, Mauersteine und Raumluftregulatoren dienen.

In dieser Ausarbeitung werden die Versuche und Ergebnisse zu den bauphysikalischen Eigenschaften des Lehms beschrieben, die den Ausgangspunkt und die Grundlage zu den noch zu entwickelnden neuen Bauelementen aus Textil- und Lehmverbund bilden.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Zusammenstellung von Lehmbaurelevanten Grundlagen
- Vorbereitung und Durchführung von Experimenten
- Perspektiven und Möglichkeiten für Faserverstärkte - Lehmbaumodule

2. Stand der Technik

In der folgenden Abhandlung werden die Eigenschaften, Einsatzbereiche und Verarbeitungstechniken des Baustoffes grundsätzlich erläutert.

2.1 Baustoff Lehm

2.1.1 Rohstoffgewinnung

Im Folgenden werden die üblicherweise genutzten Beschaffungswege für den Rohstoff Lehm dargestellt.

Bodenaushub

In Deutschland gibt es reichhaltige Lehmvorkommen. Deshalb wird häufig der Bodenaushub, der beim Bau des Gebäudes ohnehin anfällt, zur Herstellung von Lehmbauprodukten verwendet, so dass Lehm in der Regel nicht extra aus Lagerstätten abgebaut werden muss.

Um die Verarbeitbarkeit des Bodenaushubs zu verbessern, wird er noch einige Zeit vor der Verarbeitung im Freien (feucht) gelagert.

Aufbereitungsrückstände aus Kieswerken

Eine weitere Möglichkeit der Beschaffung von lehmhaltigen Rohstoffen ist die Verwendung von Aufbereitungsrückständen, so genannte Kieswaschschlamm, die bei der Kieswäsche anfallen. Es wird von einem jährlichen Anfall an Kieswaschschlamm von mehreren 10.000 Tonnen in Deutschland ausgegangen. In der Regel haben Kieswaschschlamm einen Tonanteil von mehr als 30 Prozent. Um daraus Baulehm herzustellen, müssen sie in der Regel noch abgemagert, d.h. mit sandigem Lehm oder Sand vermischt werden.

Allerdings erfordert diese Beschaffungsmethode viel Erfahrung und Kenntnis über den Rohstoff, weil die Verwendbarkeit der Schlamm als Baulehm erst nach einer fachlichen Prüfung festgestellt werden kann. Ansonsten ist dies eine preiswerte Beschaffungsmethode, da üblicherweise nur die Transportkosten in Rechnung gestellt werden.

Ausschussrohlinge aus Ziegeleien

Bei der Ziegelherstellung fällt immer wieder ein Ausschuss von noch ungebrannten Ziegeln an, so genannte Ausschussrohlinge, die normalerweise wieder in der Produktion ein-

gesetzt werden. Ausschussrohlinge können aber auch aufgrund einer vergleichbaren Rohstoffqualität zur Herstellung von Lehmbaustoffen verwendet werden.

Auch dies ist eine kostengünstige Alternative für die Beschaffung von Baulehm, da für seine weitere Verwendung so gut wie keine weiteren Aufbereitungsschritte mehr erforderlich sind.

Trotz der vielfältigen, einfachen und kostengünstigen Verfügbarkeit von Lehm, wird er äußerst zurückhaltend als Baustoff genutzt.

2.1.2 Zusammensetzung

Lehm ist ein Gemisch aus Ton, Schluff (Feinstsand) und Sand, das Beimengungen von größeren Gesteinspartikeln (Kies, Gestein) sowie von organischem Material enthalten kann.

Lehm ist ein mineralischer Boden. Er ist ein Verwitterungsprodukt aus Gesteinsschichten des Erdmantels. Er entsteht entweder aus Fest- oder Lockergesteinen oder durch die unsortierte Ablagerung der genannten Bestandteile. Man unterscheidet je nach Entstehung Berglehm, Gehängelehm, Geschiebelehm (Gletscher), Lößlehm (Löß) und Auenlehm (aus Flussablagerungen).

Die Verwitterung erfolgt überwiegend durch die mechanische Zerstörung des Gesteins durch Bewegung von Gletschern, in Wasserläufen, durch Wind und durch Ausdehnung und Zusammenziehen des Materials infolge von Temperaturdifferenzen oder durch die sprengende Wirkung gefrierenden Wassers. Auch chemische Reaktionen, bedingt durch organische Säuren der Pflanzen, durch Wasser und Sauerstoff, können zur Verwitterung beitragen.

Im Bauwesen werden die Bestandteile des Lehms entsprechend ihrem Korndurchmesser eingeteilt. Als Ton werden Bestandteile bezeichnet, die einen Durchmesser von weniger als 0,002 mm aufweisen, als Schluff Bestandteile mit einem Durchmesser von 0,002 bis 0,06 mm, als Sand Bestandteile mit einem Durchmesser von 0,06 bis 2 mm und als Kies Bestandteile mit einem Durchmesser von 2 bis 60 mm (Abb.1).

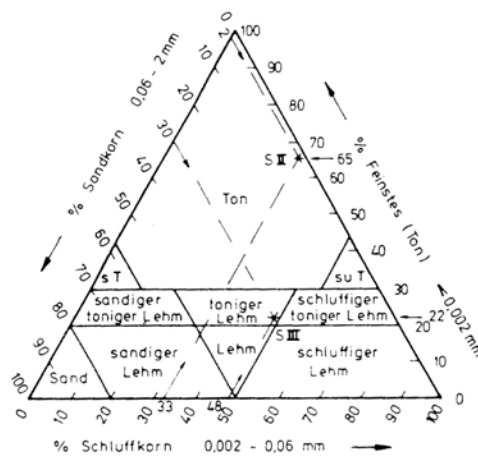


Abb. 1) Darstellung der Kornfraktionen mit Hilfe eines Dreiecknetzes (Voth 1978)

Im Lehm wirkt der Ton als Bindemittel, das die übrigen größeren Partikel, Schluff, Sand und Kies, miteinander verbindet. Je nachdem welcher der drei Hauptbestandteile im Lehm überwiegen, spricht man von einem tonigen, schluffigen oder sandigen Lehm (Tab.1).

	Ton	Schluff	Sand
Lehm	12%	43%	45%
Toniger Lehm	28%	37%	35%
Schluffiger Lehm	13%	75%	12%
Sandiger Lehm	18%	24%	58%

Abb. 2) Darstellung der Kornverteilung; Angaben sind gemittelt (Minke, Lehm bau-Handbuch, 1999)

Eine übliche Darstellung der unterschiedlichen Bestandteile erfolgt in der so genannten Körnungslinie (DIN 18123)¹, auch Kornverteilungskurve genannt.

Ein weiterer Bestandteil des Lehms, der wesentlich seine Eigenschaften bestimmt, ist Wasser. Lehm bindet Wasser. Folgende Arten werden unterschieden: Kristallwasser, Absorptionswasser und Porenwasser. Kristallwasser (Strukturwasser) ist chemisch gebunden. Absorptionswasser (Kohäsionswasser) wird durch das elektrisch bedingte Sorptionsvermögen der Tonminerale gebunden. Als Porenwasser wird Wasser bezeichnet, das in die luftgefüllten Poren zwischen den festen Partikeln des Lehms (Schluff, Sand und Kies) durch Kapillarkräfte eindringt.

¹ Siehe hierzu auch die Erläuterungen im Kapitel 3.1.3

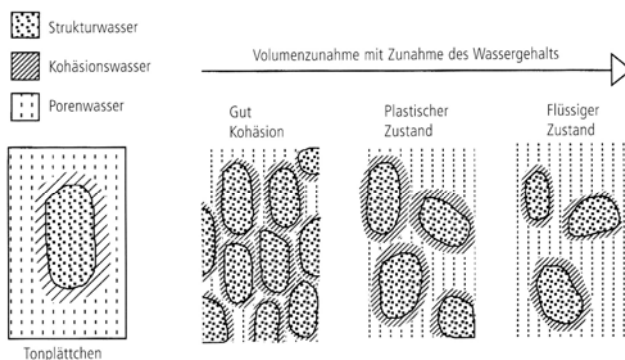


Abb. 3) Schematische Darstellung unterschiedlicher Zustandformen von Lehm (SIA: *Regeln zum Bauen mit Lehm*, 1994)

Kommt der trockene Lehm in Berührung mit Wasser, dem so genannte Anmachwasser, dringt das Wasser in das blättrige Kristallgefüge des Tons ein. Die Wasseraufnahme bewirkt eine Volumenzunahme, der Ton quillt. Die Kristallplättchen sind dann von einem dünnen Wasserfilm umhüllt und gleiten deshalb beim Kneten aneinander vorbei, dadurch ist Lehm plastisch verformbar.

Trocknet Lehm aus, so verdunstet das Anmachwasser und die Kristallplättchen des Tons lagern sich dicht aneinander. Es entstehen so genannte Kohäsionskräfte, welche die Zugfestigkeit des Lehms im plastischen Zustand, bzw. die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit im trockenen Zustand bewirken.

Bei der Herstellung von Lehmbauteilen werden dem Lehm Zuschlagstoffe beigefügt. Diese Zuschlagstoffe verleihen den fertigen Lehmbauteilen ihre spezifischen Materialeigenschaften.

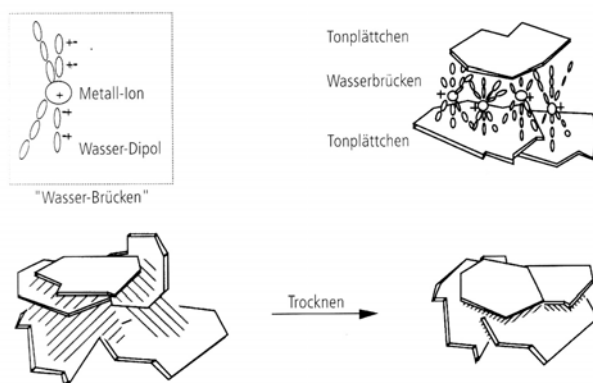


Abb. 4) Schematische Darstellung des Anziehmechanismus zwischen Tonplättchen, Wasser und Metallionen sowie des Schwindvorgangs im Ton (SIA: *Regeln zum Bauen mit Lehm*, 1994)

2.1.3 Eigenschaften

Lehm ist einer der ältesten Baustoffe der Menschheit und dank seiner unvergleichlichen wohnklimatischen Eigenschaften zugleich auch einer der modernsten Baustoffe.

Im Folgenden werden die wichtigsten Lehmbaueigenschaften beschrieben.

Zusammensetzung

Die verschiedenen Korngrößen einer Lehmart bezeichnet man als Kornfraktionen. Je nach Herkunft weist Lehm unterschiedliche Kornfraktionen auf. Es ist notwendig, das Verhältnis von Ton zu Kornfraktion zu kennen, um die Eigenschaften des Lehms beurteilen und gegebenenfalls durch Zusätze verändern zu können, da er je nach Verarbeitungstechnik unterschiedlich zusammengesetzt sein muss.

Lehm ist kein genormter Baustoff.

Schwindverhalten

Durch die Verdunstung des Anmachwassers, das notwendig ist, um Lehm verarbeiten zu können und seine Bindekraft zu aktivieren, reduziert sich sein Volumen. Es entstehen Trocken - bzw. Schwindrisse. Das lineare Trockenschwindmaß, das Maß, das die Verkürzung eines Probekörpers beim Austrocknen angibt, beträgt bei Nasslehmverfahren etwa 3 – 12 % und bei Stampflehm 0,4 – 2 %. Das Schwinden kann jedoch durch Reduzierung des Wasser- sowie des Tonanteils und durch Optimierung der Kornzusammensetzung wesentlich verringert werden.

Lehm schwindet beim Austrocknen.²



1)



2)

Abb. 5.1-2) zu 1/2: Schwindrisse

² Siehe hierzu auch die Erläuterungen im Kapitel 2.2.5

Wasserfestigkeit

Lehm muss insbesondere im feuchten Zustand vor Regen und vor Frost geschützt werden. Ein dauerhafter Schutz von Lehmwänden vor Nässeeinwirkung kann durch konstruktive Maßnahmen (horizontale Sperrschicht, Dachüberstände) und durch entsprechende Oberflächenbehandlung (Verkleidungen, Putze oder Anstriche) erreicht werden.

Lehm ist nicht wasserfest.³

Speichervermögen

Temperatur

Lehm kann sehr gut Wärme speichern und sie lange wieder abgeben. So kann Lehm die Raumtemperatur regulieren.

Das Wärmespeichervermögen von Lehm ist abhängig von seiner Rohdichte (kg/m^3). Lehm mit einer geringen Rohdichte, Leichtlehm, hat zwar eine hohe Dämmwirkung, aber ein geringeres Wärmespeichervermögen. Lehm mit einer hohen Rohdichte, Massivlehm, hat ein hohes Wärmespeichervermögen.

Feuchtigkeit

Lehm kann relativ schnell Luftfeuchtigkeit aufnehmen und diese auch wieder abgeben. Dadurch reguliert er die Feuchtigkeit der Raumluft und trägt somit zu einem gleich bleibenden Raumklima bei, was von Menschen als sehr angenehm empfunden wird.

Lehmstein / Grünlinge, ungebrannte Ziegel, nehmen innerhalb von 2 Tagen etwa 30mal soviel Feuchtigkeit auf wie die gebrannten Ziegel.

Messungen über einen Zeitraum von 5 Jahren in einem Wohnhaus aus Lehmsteinen ergaben, dass die relative Luftfeuchtigkeit nahezu konstant war. Sie betrug im Mittel 50% und schwankte lediglich um 5%. Diese Konstante erzeugt ein angenehmes und gesundes Wohnklima.

Lehm reguliert die Raumluft.

Umweltverträglichkeit

Lehm benötigt bei der Aufbereitung und Verarbeitung im Gegensatz zu anderen Baustoffen sehr wenig Energie und ist somit ein äußerst ökologischer Baustoff. Er braucht nur etwa 1% der Energie, die für die Herstellung von Mauerziegeln oder Stahlbeton notwendig ist.

Der Lehm ist regional verfügbar. Deshalb sind für die Rohstoffversorgung auch keine langen Transportwege erforderlich.

³ Siehe hierzu auch die Erläuterungen im Kapitel 2.2.5

Der ungebrannte Lehm ist jederzeit und unbegrenzt wieder verwendbar. Lehm kann im Gegensatz zu anderen Baustoffen niemals als Bauschutt die Umwelt belasten.

Lehm ist ökonomisch und ökologisch sinnvoll.

Absorptionsvermögen

Desodorierungseffekt

Lehm nimmt Gerüche auf (luftfilternder Effekt) und eignet sich für diffusionsoffene Konstruktionen.

Schadstoffe

Auf Grund seiner porösen Materialstruktur, kann Lehm Schadstoffe aufnehmen und binden. Diese Fähigkeit wird von der Industrie benutzt. Am Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde ein Verfahren zur Rückgewinnung des Phosphates aus häuslichen Abwässern mit Hilfe von stark tonhaltigem Lehm entwickelt.

Lehm bindet Schadstoffe.

2.2 Lehmteile

2.2.1 Geschichte des Lehmbaus

Lehmbautechniken sind seit mehr als 9000 Jahren bekannt. Lehm wurde in allen Kulturen als Baustoff für Wohnbauten, Befestigungsanlagen und Kulturbauten verwendet. So war beispielsweise die vor ca. 4000 Jahren errichtete Chinesische Mauer ursprünglich fast ausschließlich aus Lehm gebaut.

In trockenen Klimazonen, in denen Holz als Baumaterial fehlt, entstanden im Laufe von Jahrhunderten Mauertechniken, mit denen es möglich ist, aus ungebrannten Lehmsteinen Gebäude zu überdecken, ohne Holzbalken zu verwenden.

In Deutschland wurde im Mittelalter Lehm überwiegend für die Ausfachung und das Verputzen von Fachwerkhäusern. Auf Grund seiner hohen Feuerfestigkeit wurde Lehm nicht nur zum Bau von Öfen, Lehmöfen, sondern auch zu Brandschutzmaßnahmen verwendet.

Der wichtigste Impuls für den Lehmbau in Westdeutschland kam Ende des 18. Jahrhunderts, als der französische Stampflehm in Deutschland durch die Schriften von Cointeraux bekannt wurde. Im Laufe der Industrialisierung verdrängten Baumaterialien, wie Kalk und Zement, Lehm als primären Baustoff vom Markt.

Während im 18. und 19. Jahrhundert der Lehm in Deutschland vor allem propagiert wurde, um den Raubbau an den Wäldern zu verringern, wurde er nach dem ersten Weltkrieg gefördert, um den Verbrauch des Energieträgers Kohle zu reduzieren. Nach dem zweiten Weltkrieg sah man im Lehm vor allem eine Möglichkeit, Baumaterial und Baukosten zu sparen.

Seit etwa 1980 gibt es aufgrund des erwachten ökologischen Bewusstseins in Deutschland einen neuen Auftrieb für den Lehm mit seiner Vielzahl an positiven Eigenschaften.

2.2.2 Normung

Die Basis für die bauaufsichtlichen Regeln des Lehmbaus bildet die Lehmbauordnung⁴ aus dem Jahre 1944 und die davon abgeleiteten DIN Normen 18951 bis 18957. Auf Grund mangelnder wirtschaftlicher Interessen wurde die Lehmbauordnung 1971 ersatzlos gestrichen.

Mit dem Ziel „eine neue, zeitgemäße bauaufsichtliche Regelung zu ermöglichen“, wurden mit der zunehmenden Lehmaktivität zu Beginn der achtziger Jahre auf Initiative des Dachverbandes Lehm e. V. und der Bundesstiftung für Umwelt die so genannten Lehm-Bau-Regeln erarbeitet.

Die Lehm-Bau-Regeln beinhalten die wichtigsten Anforderungen an den Rohstoff Lehm (Gewinnung, Prüfung) sowie an die derzeit aktuellen Lehm-Baustoffe (Zusammensetzung, Aufbereitung, Prüfung) und Lehm-Bauteile (Planung und Bauleitung sowie Bauzeit, Konstruktion, etc.). Darüber hinaus geben sie einen Überblick über die einzelnen Baustoffe und -teile aus Lehm und über die bauphysikalischen Werte, wie Rohdichte, Festigkeit, Feuchte, Brandverhalten, Schallschutz etc.

1998 wurden die „Lehm-Bau – Regeln“ in die Musterliste der Technischen Baubestimmungen des Instituts für Bautechnik in Berlin aufgenommen und den Bundesländern empfohlen.

In 11 Bundesländern wurden die Lehm-Bau-Regeln in die Technischen Baubestimmungen integriert. Somit ist der Lehm-Bau eine anerkannte Bauart.

⁴ Verordnungen über Lehm-Bauten vom 04.10.1944, im Reichsgesetzblatt veröffentlicht

2.2.3 Bauteile

Lehmteile wie Lehmsteine, Lehmörtel und Lehmplatten werden industriell vorgefertigt. Im Folgenden werden sie im Einzelnen vorgestellt.

Lehmsteine

Lehmsteine können durch verschiedene Verfahren der Formgebung aus Lehmstoffen hergestellt werden. Zur Gewährleistung der Formstabilität der Lehmsteine müssen die eingesetzten Baulehne mager sein, also relativ wenig Ton enthalten. Je nach Rohdichteklasse werden Lehmsteine zu tragenden oder nicht tragenden Bauteilen verarbeitet.

Durch die Formgebung wird erreicht, dass ein in seiner inneren Struktur und seinen Materialeigenschaften homogener geformter Lehmstoff entsteht. Heute steht eine große Vielfalt an Lehmsteinen in unterschiedlichen Rohdichteklassen, Zuschlägen und Formaten zur Verfügung:

- I.) Lehmquader sind großformatige Lehmsteine, die 12 x 25 x 38 cm messen und aus erdfeuchtem, magerem Lehm in Form gestampft werden. Sie wiegen ca. 20 kg.
- II.) Lehmpatzen werden aus einer mittelfetten, nassen Lehmmischung, die zumeist faserige Zuschlagstoffe enthält, geschlagen bzw. gepatzt. Die Lehm Masse wird in eine 12 x 12 x 25 oder 24 x 24 x 7 große Holzform gepresst.
- III.) Grünlinge sind aus fettem, steinfreiem Lehm. Diese werden auch industriell in 2 DF - Format (11,3 x 11,5 x 24 cm) produziert.

Grünlinge werden wegen ihres hohen Gewichtes, ihrer geringen Festigkeit (beim Dübeln oder Nageln) und ihrer Witterungsanfälligkeit nicht für die äußere Schicht von Außenwänden verwendet.

Lehmplatten

Lehmplatten können durch verschiedene Verfahren der Aufbereitung und Formgebung durch Zugaben von Zuschlagstoffen hergestellt werden.

Lehmplatten mit einer Stärke von 50 mm sind nicht selbst tragend und erfordern eine Unterkonstruktion. Dünne Lehmplatten können auch armiert sein, z.B. mit Schilfrohrmatten. Ihre Einsatzgebiete im Trockenbau sind vielfältig: als Wand- oder Deckenbekleidungen und als nicht tragende Trennwände mit Unterkonstruktion. Lehmplatten mit einer Stärke von mehr als 50 mm (üblich 80 - 125 mm) sind selbst tragend und erfordern keine Unterkonstruktion. Sie werden deshalb in wachsendem Umfang im Trockenbau für nicht tragende Trennwände eingesetzt. Darüber hinaus ist ihr Einsatz im Fußboden- oder Deckenaufbau oder in Dachschrägen ebenso möglich.

Lehmmörtel

Lehmmörtel sind mit feinkörnigen und / oder feinfaserigen Zuschlagstoffen gemagerte Baulehme. Entsprechend ihrer Verwendung werden sie als Lehm- Mauermörtel, Lehm-Spritzmörtel oder Lehm-Putzmörtel bezeichnet.

Lehm-Mauermörtel werden zum Vermauern von Lehmsteinen, aber auch von Ziegelsteinen oder Natursteinen eingesetzt.

Lehm-Spritzmörtel werden zur Ausfachung von Fachwerkkonstruktionen, zur Erstellung von Vorsatzschalen und Innenwänden oder als Deckenfüllung eingesetzt. Sie werden mit mineralischen und / oder maschinengängigen organischen Leichtzuschlägen gemagert und wie Spritzputz ggf. mehrlagig bis zur Ausfüllung des Hohlraums bzw. bis zum Erreichen der vorgesehenen Dicke aufgetragen.

Lehm-Putzmörtel werden zum Verputzen von Wand- und Deckenoberflächen im Innenbereich oder auch auf schlagregengeschützten Außenwandoberflächen eingesetzt. Sie werden mit Sand, Stroh oder anderen pflanzlichen Faserstoffen gemagert. Die Faserstoffe übernehmen im Putz eine armierende Wirkung und beugen so einer Rissbildung nach Auftrag und anschließender Austrocknung vor.

Alle Lehmmörtel stehen heute in einer großen Vielfalt an Rohdichteklassen, Zuschlagstoffen und Farben zur Verfügung.

2.2.3.1 Herstellungstechnik Lehmstein

Im nachfolgenden wird die Herstellungstechnik von Lehmteilen exemplarisch an Hand der Produktion von Lehmstein erklärt.

Lehmsteine

Im Lehmziegelbau werden ungebrannte Ziegel mit Lehm – oder Kalkmörtel vermauert.

Die Lehmsteinherstellung erfolgt durch das Einfüllen von Lehm breiiger Konsistenz, durch das Einwerfen bzw. Patzen von Lehm plastischer Konsistenz oder durch Stampfen von erdfeuchtem Lehm in offenen Formrahmen.

Das Patzen von Lehmsteinen ist die einfachste Herstellungstechnik. Hierbei wird ein sandiger Lehm mit Wasser und Strohhäcksel dickbreiig angemischt und manuell in die Form geschmissen. Je kraftvoller das Schmeißen ist, desto besser die Verdichtung und die Festigkeit des Steins. Die Oberfläche wird mit der Hand, einem Holz, einem Draht oder einer Kelle glatt abgezogen, danach wird der Lehmstein ruckartig ausgeformt und zum Austrocknen auf die Seite gelegt (flach gelagert würde es zu Verformungen beim Austrocknen führen).

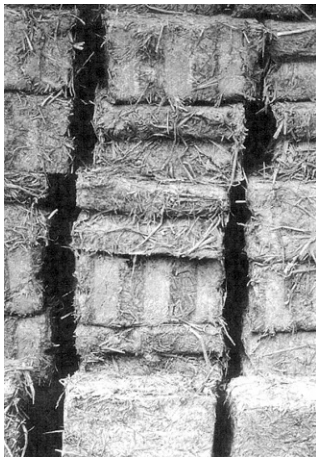
Die Arbeitsleistung einer Person inklusive aller Arbeitsschritte beträgt etwa 300 Steine pro Tag.

Durch die Verwendung von automatischen Pressen kann die Lehmsteinproduktion auf 1500 bis 4000 Steine pro 8 – Stundentag gesteigert werden. Der Vorteil der mechanischen Produktion besteht darin, dass der Lehm erdfeucht verarbeitet werden kann, dadurch ergibt sich eine geringere Austrocknungszeit des Lehmsteins.

Beim Vermauern von Lehmsteinen sollte Lehmmörtel, hydraulischer Kalkmörtel⁵ oder hochhydraulischer Kalkmörtel verwendet werden. Der Mörtel sollte dünner angerührt sein als bei gebrannten Ziegeln üblich, da der Lehmstein dem Mörtel sehr schnell Feuchtigkeit entzieht. Damit beim Austrocknen keine Schwindrisse entstehen, sollte der Mörtel einen Tongehalt von 10% nicht überschreiten.

Beim Mauern mit Grünlingen kann auch mörtelfrei gearbeitet werden, wenn der Lehmstein vor dem Vermauern kurz in einem Wasserbad gelagert wird, können die weichen Grünlinge „nass in nass“ verlegt werden. Beim Austrocknen verschmelzen die Steine miteinander.

Ungebrannte Lehmsteine lassen sich wesentlich leichter verarbeiten als gebrannte Ziegel, denn Zuschnitte können einfach durch Handsägen oder Kerben und Abschlagen getrennt werden.



1)



2)

Abb. 6.1-2 zu 1: Strohleichtlehmsteine (Huber, A.: *Neues Bauen mit Lehm*, Ökobuch 1997) / zu 2: Handgeformte Lehmsteine (Minke, G.: *Lehmbau - Handbuch*, Ökobuch 1997)

⁵ Hydraulischer Kalk besteht aus Kalk und Silikat, erhärtet auch ohne Luftzufuhr und ist im Mörtel Zementersatzstoff, erreicht aber einen geringeren Härtegrad

2.2.4 Bauweisen

Lehmbauweisen können direkt vor Ort (an der Baustelle) durch Mischung von Baulehm mit entsprechenden Zuschlägen und Wasser hergestellt werden. Solche „nassen Lehm- bautechniken“ werden in der Regel beim Stampflehm, Wellerlehm, Strohlehm und Leichtlehm sowie bei Lehmschüttungen angewendet. Im Folgenden werden sie im einzelnen vorge- stellt.

Stampflehm

Stampflehm ist ein feinkrümelig und erdfeucht aufbereiteter Lehmstoff, der nach Ver- dichtung und Austrocknung eine Rohdichte zwischen 1700 und 2200 kg/m³ erreicht. Stampflehm kann deshalb zu tragenden Bauteilen verarbeitet werden. Die Verarbeitung ist schalungsgebunden.

Wellerlehm

Der Wellerlehm ist im traditionellen Lehm- bau in einer eigenständigen Bauweise verar- betet worden. Vom Stampflehm unterscheidet er sich durch den Zuschlag von Stroh, wo- durch der Wellerlehm mit einem Rohdichte- bereich von 1500 bis 1800 kg/m³ auch „leich- ter“ ist. Er wird auch zu tragenden Wand- konstruktionen verarbeitet, ist allerdings nicht schalungsgebunden. Der Wellerlehm wird freihändig mit der Gabel zu Schichten von ca. 80 cm Höhe bis zum Erreichen der vollen Bauwerkshöhe aufgesetzt. Die Oberflächen wer- den glatt abgestochen. Zwischen den einzel- nen Sätzen sind Trockenzeiten erforderlich. Wellerlehm wird heute allenfalls bei der Sanierung bestehender Gebäude verarbeitet.

Strohlehm

Stroh- oder Faserlehme sind Mischungen aus aufbereitetem Baulehm und pflanzlichen Faserstoffen (vorwiegend Stroh). Nach Ver- arbeitung und Austrocknung weisen Bauteile aus Strohlehm Rohdichten zwischen 1200 und 1700 kg/m³ auf. Strohlehm wird in plasti- scher Konsistenz verarbeitet und heute vor allem im Sanierungsbereich, z.B. bei der Fach- werksausfachung, angewendet.

Leichtlehm

Aufbereiteter Baulehm wird in breiiger bis flüssiger Konsistenz mit organischen oder mi- neralischen Leichtzuschlägen gemischt. Als organische Zuschläge kommen vor allem Stroh und Holzhackschnitzel, als mineralische Zuschläge thermisch geblähte Materialien (Blähton, Blähschiefer u.a.) zum Einsatz. Bauteile und Baustoffe aus Leichtlehm erreichen deshalb nach Verarbeitung und Austrocknung einen Rohdichtebereich von 400 bis 1200 kg/m³. Dadurch verbessern sich vor allem deren wärmedämmende Eigenschaften. Durch den hohen Anteil von Zuschlägen sind die erreichbaren Druckfestigkeiten entspre- chend niedrig, so bleibt eine Verarbeitung von Leichtlehm auf den nicht tragenden Bereich beschränkt.

Leichtlehme können heute als lose Fertigmischung, zu Steinen oder Platten geformt, in unterschiedlichen Rohdichteklassen bezogen werden.

Ihre Bezeichnung richtet sich nach ihrem dominanten Zuschlagstoff bezeichnet, z.B. Strohleichtlehm.

Lehmschüttungen

Aufbereiteter Baulehm kann mit organischen oder mineralischen Zuschlägen vermischt als Baulehmschüttung erdfeucht zur Verfüllung waagerechter Bauteile, z.B. Balkendecken oder Hohlräume, eingebaut werden. Als Baulehme können auch solche Lehme eingesetzt werden, deren Bindekraft für die Herstellung geformter Lehmstoffe und -bauteile nicht ausreichend ist. Entsprechend der nach Verarbeitung und Austrocknung erreichten Rohdichten spricht man von Leichtlehmschüttungen bei Dichten $< 1200 \text{ kg/m}^3$.

2.2.4.1 Herstellungstechnik Stampflehm

Im Nachfolgenden wird exemplarisch die Herstellungstechnik von Stampflehmwänden erklärt.

Stampflehmbau

Beim Stampflehmbau wird erdfeuchter Lehm in 10-15cm dicken Schichten in eine Schalungsform geschüttet und durch Stampfen verdichtet. Stampflehmwände sollten „feucht in feucht“ erstellt werden. Die Wand wird in einzelnen Lagen von 50 bis 80 cm Höhe gestampft, dann wandert die Schalung waagrecht weiter. Ist eine Lage fertig gestellt, wird darauf die nächste errichtet. Um Schwindrisse zwischen den unterschiedlich trockenen Lagen zu vermeiden, wird eine dünne Schicht Kalkmörtel auf die Stampflehm Lage aufgebracht. Da Kalkmörtel mehrere Wochen plastisch bleibt, kann er sich den unterschiedlich stark schrumpfenden Bauteilen anpassen.

Schalung

Bei den üblicherweise verwendeten Schalungen werden die seitlichen Schaltafeln durch Traversen zusammengehalten. Diese Traversen durchdringen die Wand und hinterlassen Durchbrüche, die nach dem Ausschalen wieder gefüllt werden müssen. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wurden traversenfreie Schalungen entwickelt, die durch eine außen liegende Zangenkonstruktion die Schalbretter stabilisiert.

Die Schalungsbretter bzw. -tafeln sollten 30 bis 34 mm dick sein und im Abstand von 100 bis 150 cm ausgesteift sein.

Verdichtung

Der Lehm wurde früher mit manuell betriebenen Schlag- oder Stampfwerkzeugen verdichtet.

Ab Mitte des 20. Jahrhundert werden elektrisch bzw. pneumatisch betriebene Stampfgeräte verwendet.



1)



2)

Abb. 7.1-2) zu 1: Stampflehm in Ekuador (Minke, G.: *Lehmbau - Handbuch*, Ökobuch 1997) / zu 2: Stampflehm in Europa (Nieden, Ziegert: *Neue Lehm – Häuser international*, Bauwerkverlag 2002)

2.2.5 Verbesserung der Materialeigenschaften

Unterschiedliche Zuschläge und optimierte Zusammensetzungen verbessern die Eigenschaften des Lehms.

Im Folgenden werden einige Möglichkeiten beschrieben.

Verringern der Rissbildung beim Austrocknen

Die Gefahr der Rissbildung beim Austrocknen lässt sich vor allem durch eine Verringerung des Wassergehaltes mindern. Da Wasser jedoch notwendig ist, um die Bindekraft des Tones zu aktivieren, und jede Lehmbautechnik eine bestimmte Konsistenz erfordert, lässt sich der Wassergehalt nicht beliebig reduzieren.

Um dennoch eine Reduzierung des Wassergehaltes zu ermöglichen, ohne gleichzeitigen Verlust der benötigten Konsistenz, können Verflüssigungsmittel zugegeben werden. Als Mittel werden beispielsweise Natrium-Wasserglas, Soda, Humussäure oder Gerbsäure verwendet. Diese Mittel verändern die inneren Widerstände zwischen den Tonmineralen, so dass diese leichter übereinander gleiten können.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Schrumpfschäden ist eine Veränderung der Kornzusammensetzung, das Magern.

Als Magern wird das Untermischen von groben Bestandteilen wie Sand, Kies und Schotter bezeichnet. Dadurch nimmt der Tongehalt des Lehms ab, was wiederum bewirkt, dass das Trockenschwindmaß und die Rissbildung beim Austrocknen vermindert werden.

Durch Zusatz von Faserstoffen wird das lineare Trockenschwindmaß reduziert. Das ist darauf zurückzuführen, dass eine relative Verringerung des Tongehaltes erfolgt und gegebenenfalls durch Fasern etwas Anmachwasser gebunden wird. Zusätzlich wird die Zugfestigkeit des Lehms im plastischen Zustand erhöht, jedoch gilt dies für grobe Fasern (Stroh) nur beschränkt.

Erhöhung der Wasserfestigkeit

In der Regel ist es nicht notwendig, die Wasserfestigkeit von Lehm durch Zusätze zu erhöhen. Vorausgesetzt wird dabei eine horizontale Sperrschicht gegen aufsteigende Bodenfeuchtigkeit und das der Regen durch Dachüberstände, Verkleidungen, Putze oder Anstriche vom Lehm ferngehalten wird.

Sollte jedoch die Gefahr bestehen, dass Wasser in das Lehmbauteil eindringt und dieses durch Quellen oder durch Frosteinwirkung zerstört, empfiehlt es sich durch Zuschläge das Lehmbauteil „wasserfest“ zu machen.

Die zur Wasserfestigkeit zuzugeben Mittel umschließen die Tonbestandteile, verhindern dadurch ein Eindringen von Wasser und somit das Aufquellen und Weichwerden des Lehms.

Mögliche Zuschlagstoffgruppen:

I) Mineralische Bindemittel

- Zement: schränkt Quell- und Schwindwirkung ein
- Kalk: Ionenaustausch, Zusammenballung der feinen Bestandteile, Verringerung des Wasserbindungsvermögens
- Bitumen: Bitumen verklebt die groben Bestandteile des Lehms und verhindert das Eindringen von Wasser
- Wasserglas: Natriumwasserglas wird mit dem Anmachwasser vermischt und erhöht so die Wasserfestigkeit von magerem Lehm erheblich

II) Tierisch Produkte

Blut, Urin, Kot, Kasein und Knochenleim werden seit Jahrhunderten als stabilisierende Zusätze für Lehm verwendet.

III) Pflanzliche Produkte

Öl- und latexhaltige Pflanzensäfte haben in Verbindung mit Kalk eine erhöhte Wasserfestigkeit, allerdings wird dadurch die Wasserdampfdiffusion reduziert.

IV) Synthetische Produkte

Kunstharze, Paraffine, synthetische Wachse und synthetischer Latex haben Eigenschaften wie die mineralischen Zusätze, sind aber nicht ökonomisch, zersetzungsanfällig und weisen einen höheren Dampfdiffusionswiderstand auf.

Silane, Silicone, Siloxane, Kieselsäureester und Acrylate haben eine wasserabweisende Wirkung.

Bindekraftoptimierung

Je größer die Bindekraft des Lehms, desto größer die Druck- und Abreibfestigkeit im trockenen Zustand. Im Folgenden werden einige Methoden vorgestellt.

Mischen und Mauken

Die Vermengung der Lehmbestandteile durch Kneten oder Rühren und das anschließende Stehenlassen, das Mauken, haben entscheidenden Einfluss auf die Bindekraft. So ist die Bindekraft des Lehms nach zehnminütigen Rühren höher als die der selben Mischung nach einminütiger Behandlung. Nach zwanzigminütiger Aufbereitung wird die Bindekraft wieder schwächer.

Die Maukzeit soll 12 bis 48 Stunden betragen.

Erhöhung des Tongehaltes

Bei sehr mageren Lehmen lässt sich die Bindekraft am einfachsten durch die Zugabe von Ton in Pulverform erhöhen.

Dies verursacht allerdings ein stärkeres Quellen und Schwinden.

2.3 Marktsituation

2.3.1 Hersteller und Produkte

Hersteller	Produkte	Internetadresse
Casadobe, Mühlacker	Lehm-Sichtsteine mit Nut und Feder Leicht-Lehmplatten Lehmfinishputz; Lehmdekorputz	www.casadobe.de
Claytec, Viersen	Lehmsteine Lehm-Trockenbauplatten Lehmputz Japanische Lehm-Farbputz	www.claytec.com
Conluto, Blomberg-Großenmarpe	Lehmsteine Lehm-Dämmsysteme Lehmputz; Lehm Edelputz	www.conluto.de
eiwa Lehm GmbH, Bisterschied	Lehmsteine Lehm-Trockenbauplatten Lehmmörtel; Lehmputz farbiger Lehmedelputz	www.eiwa-lehmbau.de
Karphosit - Lehmbaumstoffe AG, Peißen	Wandsysteme aus Lehm Lehmfaserputz; Lehmglattputz	www.karphosit.de
Lebast - Lehmbaumstoffe, Störnstein	Lehm – Heizelemente Kohlefaser - Lehmabplatten	www.lebast-lehmbaumstoffe.de/
Lesando GmbH, Dettelbach	Lehmfinishputz; Lehmdekorputz	www.lesando.de
TEX-BIS Naturbaumstoffe GmbH, Nidderau-Windecken	Lehmabplatten und -steine Lehmmörtel und -putze	www.texbis.de
WEM-Systembau, Koblenz	Wandheizungssysteme Leichtlehmabplatten mit Heizstäben	www.wem-systembau.de

3. Eigene Arbeiten

Um das Potential eines Faser-Lehm-Verbundes zu erarbeiten, ist es notwendig einige grundlegende Versuche durchzuführen. Da das Verhalten von Lehm im Verbund mit Fasern noch nicht ausreichend geklärt ist werden diverse Textilien (Natur / Kunststoff) auf ihre Bindefestigkeit im Lehm getestet. Darüber hinaus muss der Lehm, der kein genormter Baustoff ist, klassifiziert werden, um ihn auf seine Tauglichkeit bezüglich Schrumpfung, Verarbeitungsfähigkeit und Druckfestigkeit im Verbund zu überprüfen.

Das theoretische Wissen über Lehm beschränkt sich ausschließlich auf bestehende Verarbeitungstechniken und Lehmhautypologien. Hier ist der Ansatzpunkt dieser Arbeit, welche die Eigenschaften durch Verbindung mit 3D Faserstrukturen verbessern, einen neuartigen Baustoff konzipieren und so die ursprünglich bekannten Mängel korrigieren und die eingeschränkten Einsatzbereiche und Verwendungsmöglichkeiten zu erweitern versucht.

3.1 Laborversuche zur Bestimmung der Lehmmischung

3.1.1 Einleitung

Da der Naturstoff Lehm keine einheitliche Zusammensetzung hat, sie vielmehr je nach Abtragungsort variiert, ist es notwendig seine Bestandteile zu bestimmen. Der Trockenlehm ist ebenso unbestimmt. Deshalb war bei einer Schlemmanalyse die Kornverteilung zu bestimmen notwendig, um gegebenenfalls Zuschläge beizufügen.

Es wurden verschiedene Lehmmischungen auf ihre Bestandteile untersucht. Dabei wurden der Wassergehalt, die Kornverteilung und die Schrumpfgrenze bestimmt.

Es wurde zudem der Einfluss des Wassergehaltes auf Schrumpfverhalten überprüft.

Ausgangsmaterial für die Laborversuche war eine sehr fette Lehmmischung der Firma Claytec. Diese Basismischung konnte durch Beigabe von Zuschlagstoffen beliebig verändert werden.

Damit alle versuche mit einer gleich bleibenden Lehmzusammensetzung durchgeführt werden konnten musste die Ausgangsmischung analysiert und entsprechend angepasst werden.

Um eine möglichst optimale Zusammensetzung zu erreichen, musste die Kornfraktion des Ausgangsmaterials bestimmt werden. Anschließend wurde die Menge und Art der Zuschlagstoffe bestimmt die für die versuchsfertige Mischung notwendig waren. Die so festgelegte Lehmmischung wurde für sämtliche Laborversuche als Stammkomponente eingesetzt.

3.1.2 Mischungen

Die Zusammensetzung der endgültigen versuchsfertigen Lehmmischung wurde schrittweise entwickelt. Sie resultiert aus den Erfahrungen mit den vorhergehenden versuchsweise produzierten Lehmmischungen. Die Testergebnisse der Proben wurden gesichtet und ausgewertet. Die Resultate flossen in die Zusammensetzung der darauf folgenden Lehmmischung ein.

I.) Überprüfung der Sackware

Das Lehpulver/der Trockenlehm wurde ohne weitere Zusätze (Kornfraktionen und Wasser) den Laborversuchen zugeführt.

Probennummer: 7833

II.) Erstes Mischungsverhältnis

Aufbauend auf der Probe 7833 wurde auf der Basis bisheriger Forschungsergebnisse ein sehr fettiger Lehm angemischt, d.h. mit einem hohen Tonanteil und entsprechend niedrigeren Kornfraktionen.

Einem Kilogramm Trockenlehm wurden 0,2 kg Quarzsand und 0,25 Liter Wasser zugegeben. Dieses Mischungsverhältnis wurde 10 Minuten angerührt und anschließend 2 Stunden abgedeckt ruhen gelassen, das so genannte Mauken.

Probennummer: 7834

III.) Zweites Mischungsverhältnis

Aufbauend auf die Proben 7833 und 7834 wurde hierbei darauf geachtet, dass der Lehm ein ausgewogenes Komponentenverhältnis aufweist, so dass keine Bestandteile überwiegen (Ton, Schluff, Sand).

Einem Kilogramm Trockenlehm wurden 0,6 kg Sandmischung (Kornfraktionen von 0,06 bis 2 mm), 0,1 kg Quarzsand und 0,4 Liter Wasser zugegeben. Dieses Mischungsverhältnis wurde 10-15 Minuten angemacht und mind. 12 Stunden abgedeckt ruhen gelassen (Mauken).

Probennummer: 7835

IV.) Mischungsverhältnisse mit verschiedenen Wassergehalten

Hierfür wurde das Mischungsverhältnis der Probe 7835 verwendet, jedoch mit drei unterschiedlichen Wassergehalten.

Probennummer :7836

Der Wasseranteil auf 1,7 kg Lehmmischung beträgt 0,18 Liter

Probennummer: 7837

Der Wasseranteil auf 1,7 kg Lehmmischung beträgt 0,54 Liter

Probennummer: 7838

Der Wasseranteil auf 1,7 kg Lehmmischung beträgt 0,7 Liter

3.1.3 Laborversuche

Die oben Aufgeführten Lehme wurden durch mehrere Laborversuche analysiert und klassifiziert. Um Aussagen über die Eigenschaften des spezifischen Lehms zu erhalten ist es notwendig folgende Versuche durchzuführen: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Bestimmung des Wassergehalt, Bestimmung der Konsistenzgrenzen.

Die Laborversuche werden im Folgenden detailliert erklärt.

Bestimmung der Korngrößenverteilung

Um die unterschiedlichen Lehmzusammensetzungen zu klassifizieren, ist es notwendig die Korngröße zu bestimmen.

Die Korngröße ist das primäre Unterscheidungsmerkmal mineralischer Böden. Die Korngrößenverteilung gibt die prozentualen Gewichtsanteile der in einer Lehmart vorhandenen Kornfraktion an.

Die quantitative Feststellung der Korngrößen erfolgt durch die Sieb- und Schlämmanalyse (DIN 18123).

Siebanalyse

Die Siebanalyse ist für Korngrößen $> 0,063\text{mm}$ geeignet.

Das übliche Verfahren ist die Trockensiebung. Dabei wird der Lehm (Schüttgut) bei 105°C im Ofen getrocknet und anschließend in einen Siebturm geschüttet (s. Abb....)

Das Schüttgut wird durch einen Siebsatz von kleiner werdenden Maschenweiten gerüttelt. Anschließend wird durch das Auswiegen der Rückstände auf den einzelnen Sieben die unterschiedliche Korngröße prozentual der Gesamtmasse ermittelt. Die erhaltenen Ergebnisse werden in die Korngrößenverteilungskurve eingetragen.

Der Anteil unter $0,063\text{mm}$ Durchmesser wird unten aufgefangen und durch die Schlemmanalyse weiter untersucht.



Abb. 8) Siebturm

Schlämmanalyse

Die Schlämmanalyse eignet sich für Korngröße $0.001\text{mm} < \text{Durchmesser} < 0,125\text{mm}$

Eine getrocknete und gewogene Probenmenge wird im Wasser zu einer Suspension aufgerührt. Abhängig von der Partikelgröße sinken die Feinteile unterschiedlich schnell auf dem Boden des Glaszylinders. Dabei verändern sich zeitabhängig die Verteilungen der Korngröße und damit auch die Verteilung der Dichte in der Suspension. Zum Messen dieser Veränderung wird ein Aräometer in festgelegten Zeitabständen in der Suspension abgelesen. Aus den Eintauchtiefen wird die Dichte und daraus der Massenanteil der Korngruppen über ein Nomogramm berechnet, das von Casagrande nach dem Stokes'schen Gesetz aufgestellt worden ist. Daraus ist es möglich die Korngrößenverteilungskurve zu ermitteln.

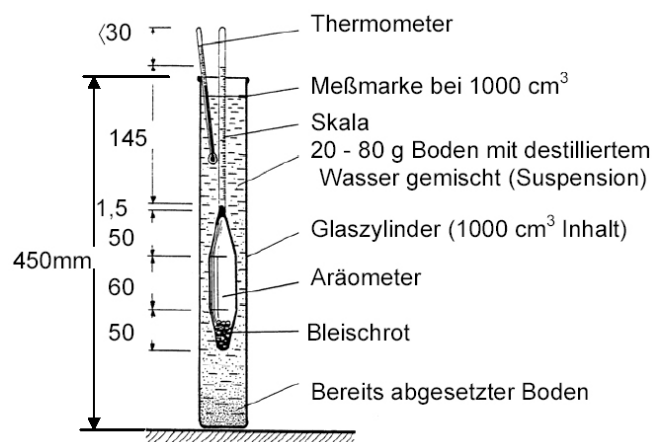


Abb. 9) Sedimentationsanalyse (Ziegler, M: *Bodenmechanik 1, Unterlagen zur Vorlesung, 2006*)

Die Ergebnisse dieser Analysen werden als Körnungslinien dargestellt, danach kann eine Lehmart genau bezeichnet werden, bezogen auf den Ton-, Schluff- und Sandanteil. Dabei wird der Anteil des jeweiligen Kornes bezogen auf die Gesamtmasse des Lehms in Prozent angegeben. Die Korndurchmesser sind auf einer logarithmischen Skala angegeben.

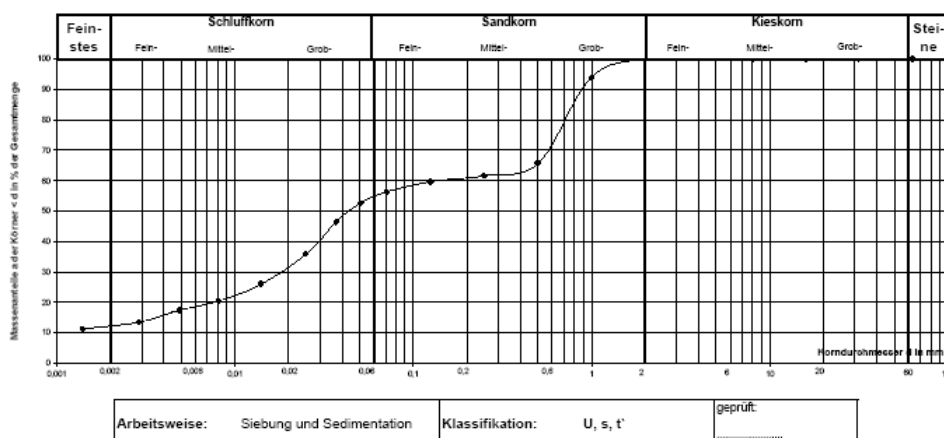


Abb. 10) Kornverteilungskurve (Ziegler, M: *Bodenmechanik 1, Unterlagen zur Vorlesung, 2006*)

Bestimmung des Wassergehaltes

Der Wassergehalt w ist definiert als das Verhältnis der Masse des Wassers zur Feststoffmasse.

Im Lehm wird der Anteil des nicht chemisch gebundenen Wassers festgestellt. Die Probe wird im feuchten Zustand gewogen, dann in einem Ofen bei 105 bis 110°C solange erwärmt bis keine Gewichtsabnahme mehr erfolgt. Die Differenz der beiden Gewichtsabnahmen ergibt den Wassergehalt, der in Massenprozenten bezogen auf das Trockengewicht angegeben wird.

Der Wassergehalt wird nach DIN 18121 Teil 1 bestimmt.

Bestimmung der Konsistenzgrenzen

Um das Verhalten des Lehms unter Wassereinwirkung bestimmen zu können, ist es notwendig seine Konsistenzgrenzen zu kennen. Darin sind enthalten:

I.) Fließgrenze

Die Fließgrenze w_L beschreibt den Wassergehalt am Übergang der flüssigen Zustandsform in den plastischen (bildsamen) Bereich. Dazu wird eine Lehmprobe mit destilliertem Wasser aufbereitet und in die Schale des Fließgrenzgerät gegeben. Die maximaldicke soll 10 mm betragen. Die Oberfläche wird glatt gestrichen und anschließend wird mit einem genormten Furchenzieher eine ca. 40 mm lange Furche gezogen. Dann wird die Schale durch drehen einer Handkurbel so oft angehoben und wieder fallengelassen, bis sich die Furche auf einer Länge von 10 mm geschlossen hat. Die Anzahl der Schläge wird festgestellt, der Wassergehalt wird bestimmt und anschließend in ein Diagramm eingetragen.

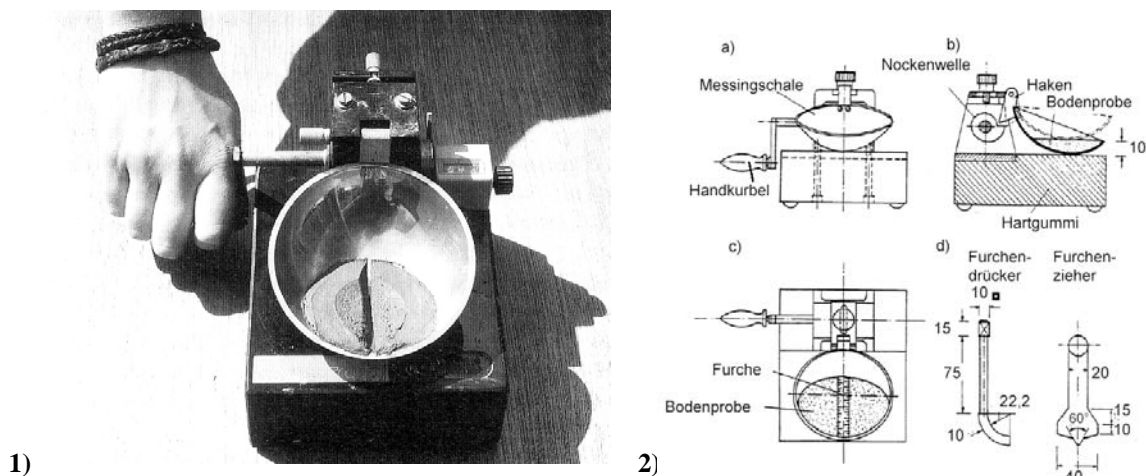


Abb. 11.1-2 zu 1: Fließgrenzengerät nach Casagrande (Minke, G.: *Lehmbau - Handbuch*, Ökobuch 1997)/ zu 2: Fließgrenzgerät: a) Vorderansicht, b) Seitenansicht, c) Draufsicht, d) Furchenbearbeitungsgerät (Ziegler, M: *Bodenmechanik 1, Unterlagen zur Vorlesung*, 2006)

Die Fließgrenze wird nach DIN 18122 Teil 1 bestimmt.

II.) Ausrollgrenze

Die Ausrollgrenze w_p beschreibt den Wassergehalt am Übergang von der steifen zu halb-festen Konsistenz. Dafür wird der Lehm auf einer wasseraufsaugenden Unterlage zu 3 mm dicken Walzen ausgerollt, dabei gibt die Probe Wasser ab. Anschließend werden die Röllchen zusammengeknetet und wieder ausgerollt. Der Vorgang wird solange wiederholt, bis die Lehmrollchen bei einem Durchmesser von 3 mm zerbrechen. Von diesen Bruchstücken wird der Wassergehalt bestimmt und wird als der Wassergehalt an der Ausrollgrenze definiert.

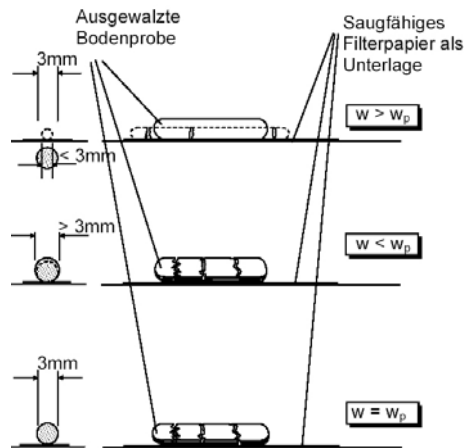


Abb. 12) Bestimmung der Ausrollgrenze (Ziegler, M: *Bodenmechanik 1, Unterlagen zur Vorlesung, 2006*)

Die Ausrollgrenze wird nach DIN 18122 Teil 1 bestimmt.

III.) Plastizitätszahl

Der plastische Bereich zwischen Fließ- und Ausrollgrenze wird noch einmal in die Zustandsformen breiig, weich und steif unterteilt. Die Differenz, die sich aus der Fließgrenze und der Ausrollgrenze ergibt, wird als Plastizitätszahl I_p bezeichnet.

IV.) Schrumpfgrenze

Die Schrumpfgrenze w_s ist der Wassergehalt eines feinkörnigen Bodens am Übergang von halbfester zum festen Konsistenz. Dabei wird angenommen dass das Volumen der Probe praktisch nicht mehr abnimmt. Physikalisch bedeutet dies, dass kein Porenwasser mehr in der Lehmprobe verblieben ist, sondern nur noch das an die Tonpartikel durch Hydratationskraft gebundene Restwasser.

Die Schrumpfgrenze wird nach DIN 18122 Teil 2 bestimmt.

3.1.4 Ergebnisse

Korngrößenverteilung, Konsistenzgrenze und Konsistenz

Probe 7833

Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
21	77	2

Tab. 1) Korngrößenverteilung

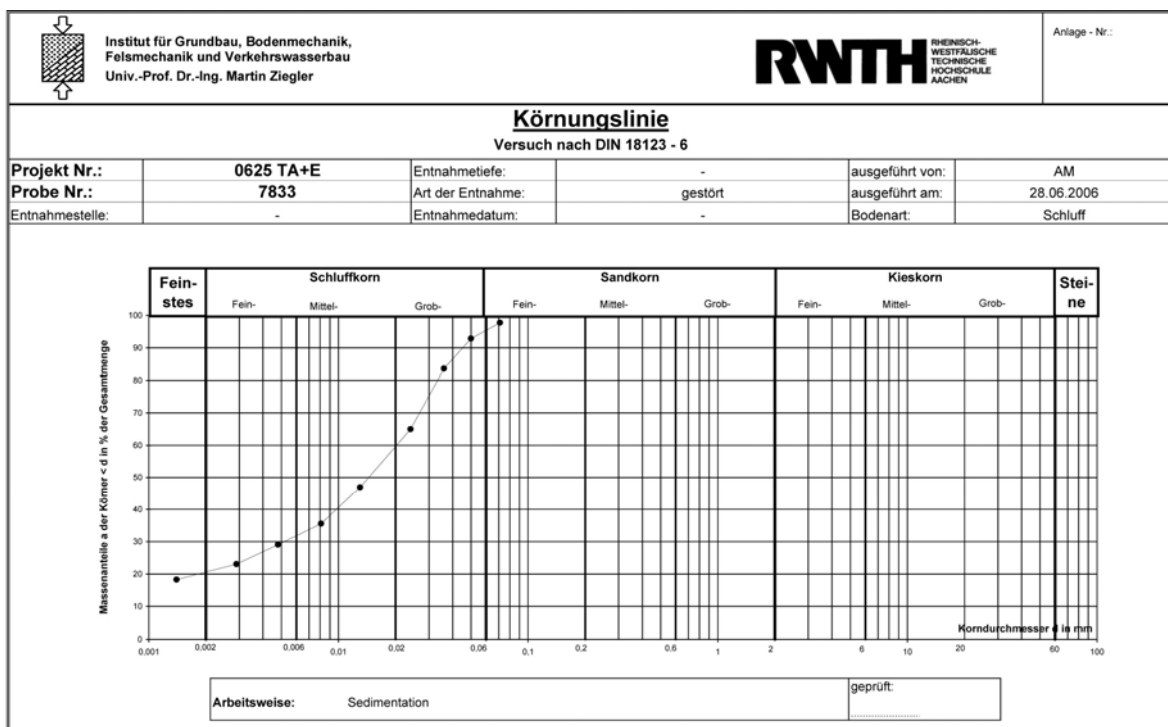


Abb. 13) Kornverteilungskurve

Wassergehalt w [%]	Schrumpfgrenze w_s [%]	Ausrollgrenze w_p [%]	Fließgrenze w_l [%]	Plastizitätszahl I_p
Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben

Tab. 2) Konsistenzgrenzen

Probe 7834

Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
18	57	25

Tab. 1) Korngrößenverteilung

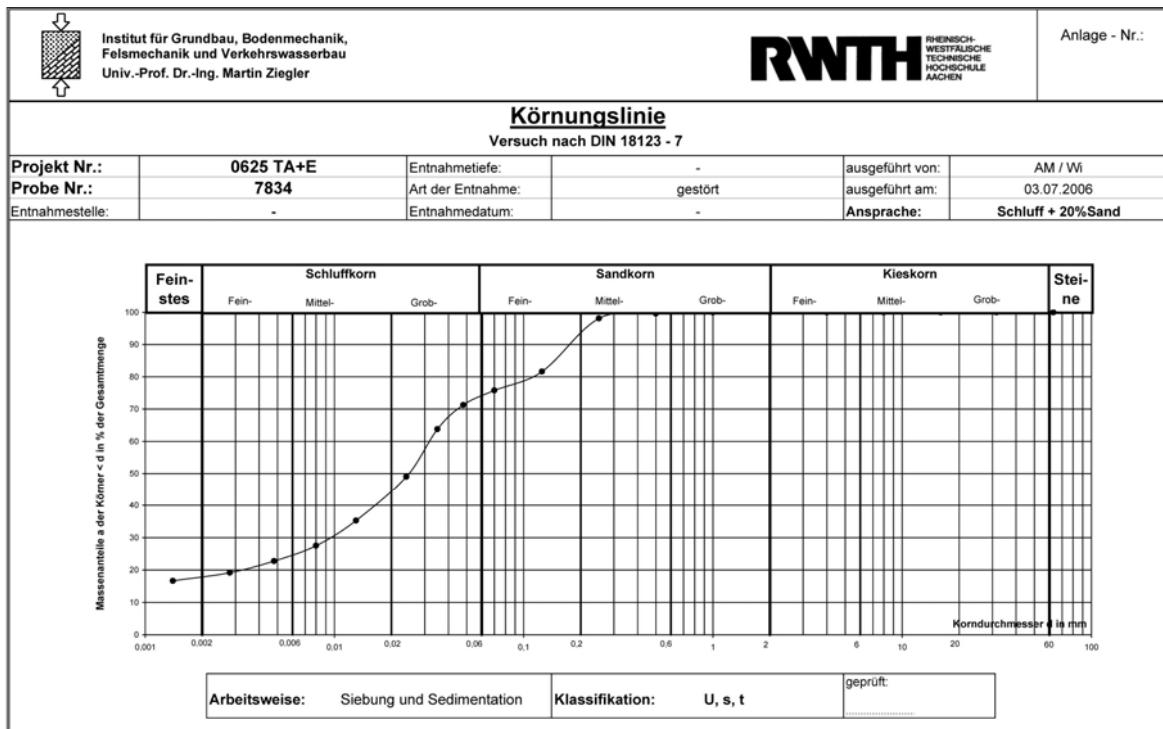


Abb. 14) Kornverteilungskurve

Wassergehalt w [%]	Schrumpfgrenze w_s [%]	Ausrollgrenze w_p [%]	Fließgrenze w_l [%]	Plastizitätszahl I_p
31,53%	16%	13,3%	26,3%	0,13

Tab. 2) Konsistenzgrenzen

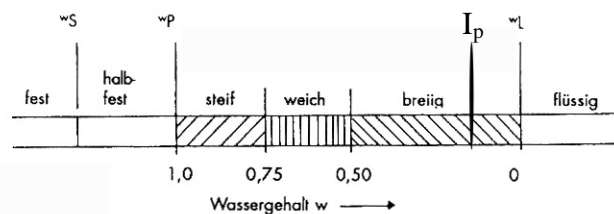


Abb. 15) Konsistenz

Probe 7835

Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
12	43	45

Tab. 3) Korngrößenverteilung

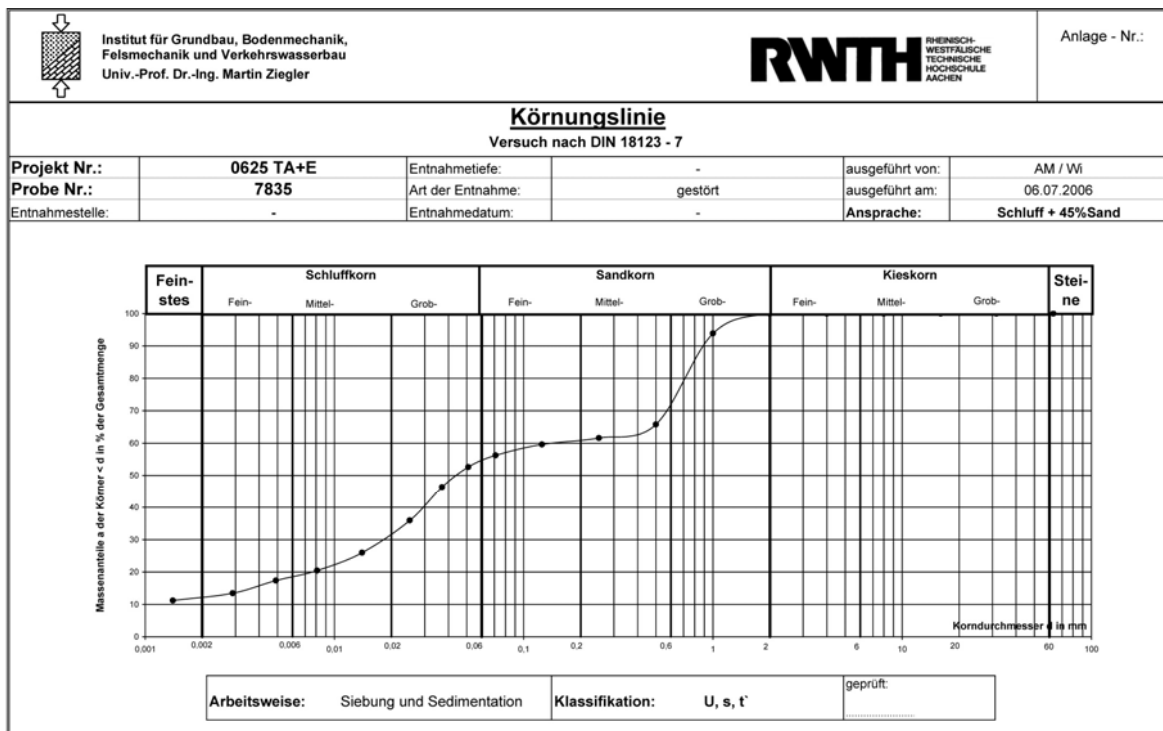


Abb. 16) Kornverteilungskurve

Wassergehalt w [%]	Schrumpfgrenze w _s [%]	Ausrollgrenze w _p [%]	Fließgrenze w _l [%]	Plastizitätszahl I _p
25,42	12,2	10,6	22,1	0,115

Tab. 4) Konsistenzgrenzen

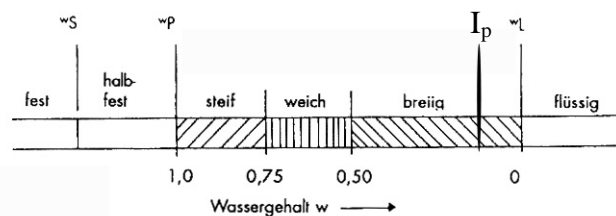


Abb. 17) Konsistenz

Probe 7836

Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
14	41	45

Tab. 5) Korngrößenverteilung

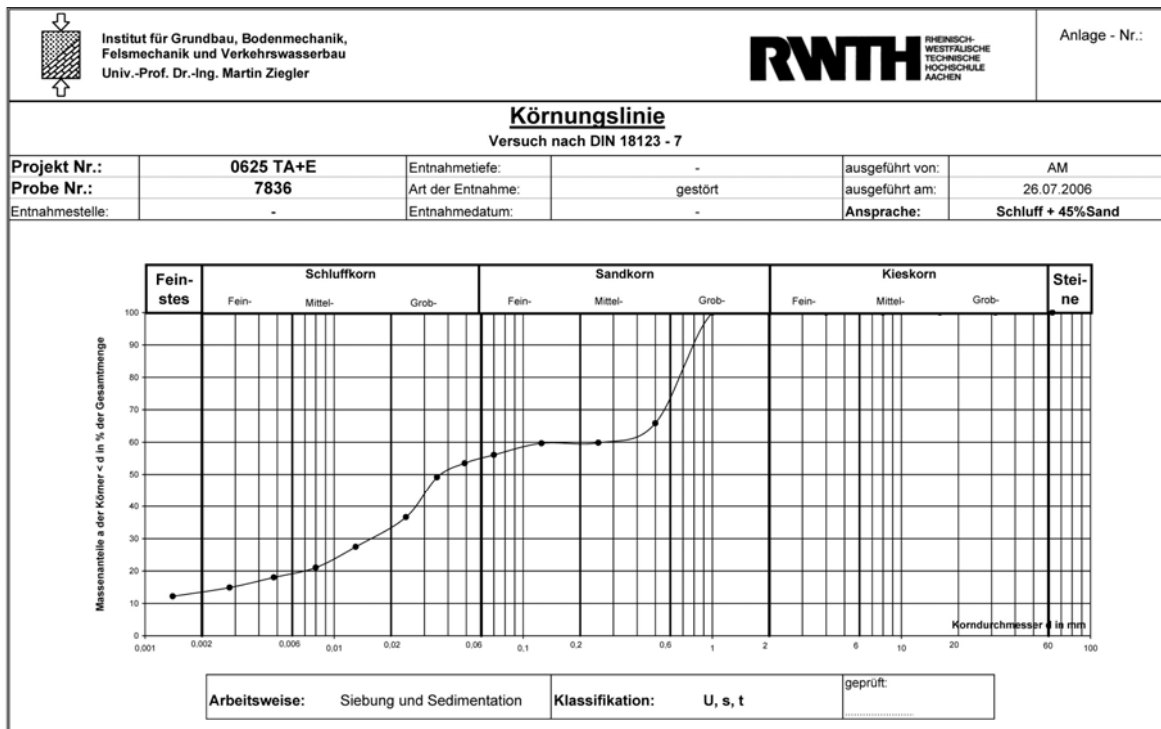


Abb. 18) Kornverteilungskurve

Wassergehalt w [%]	Schrumpfgrenze w_s [%]	Ausrollgrenze w_p [%]	Fließgrenze w_l [%]	Plastizitätszahl I_p
19,11%	10,5%	10,9%	19,8%	0,088

Tab. 6) Konsistenzgrenzen

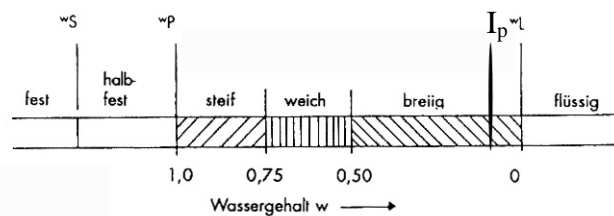


Abb. 19) Konsistenz

Probe 7837

Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
13	41	46

Tab. 7) Korngrößenverteilung

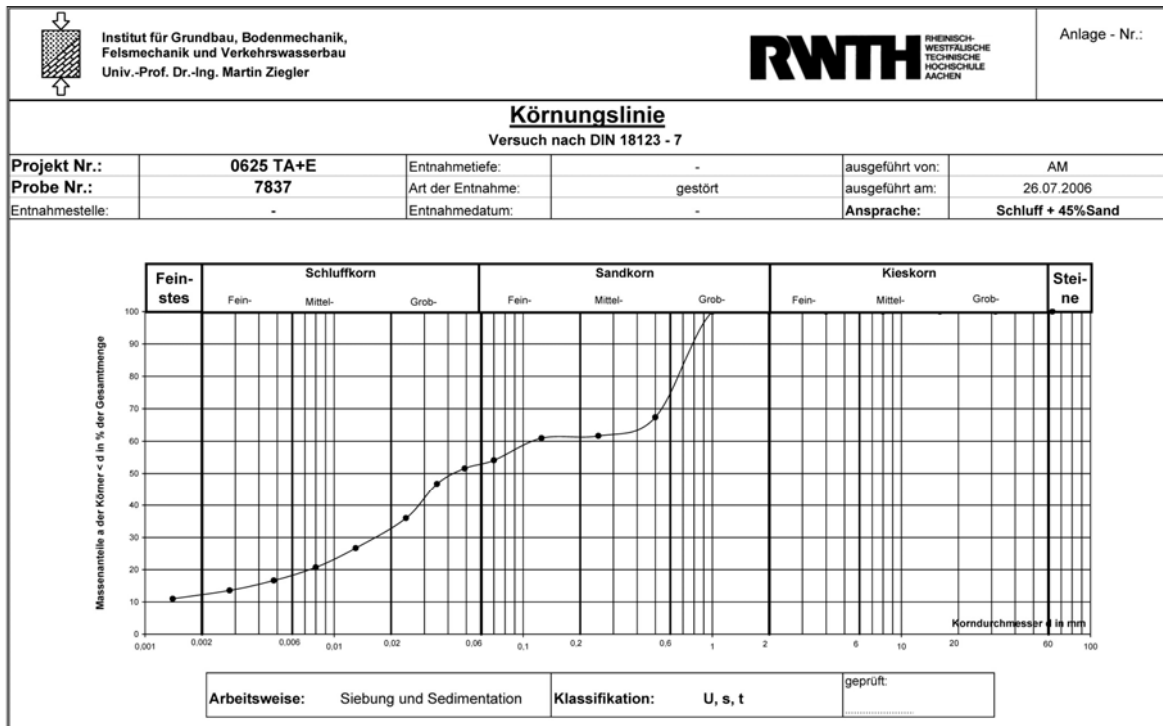


Abb. 20) Kornverteilungskurve

Wassergehalt w [%]	Schrumpfgrenze w_s [%]	Ausrollgrenze w_p [%]	Fließgrenze w_l [%]	Plastizitätszahl I_p
23,92	12	10,4	20,5	0,101

Tab. 8) Konsistenzgrenzen

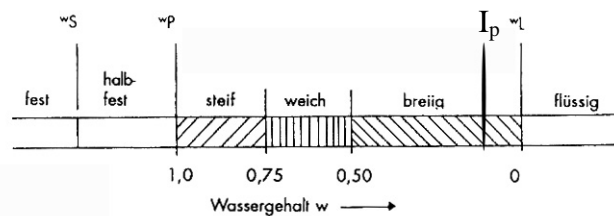


Abb. 21) Konsistenz

Probe 7838

Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
11	42	47

Tab. 9) Korngrößenverteilung

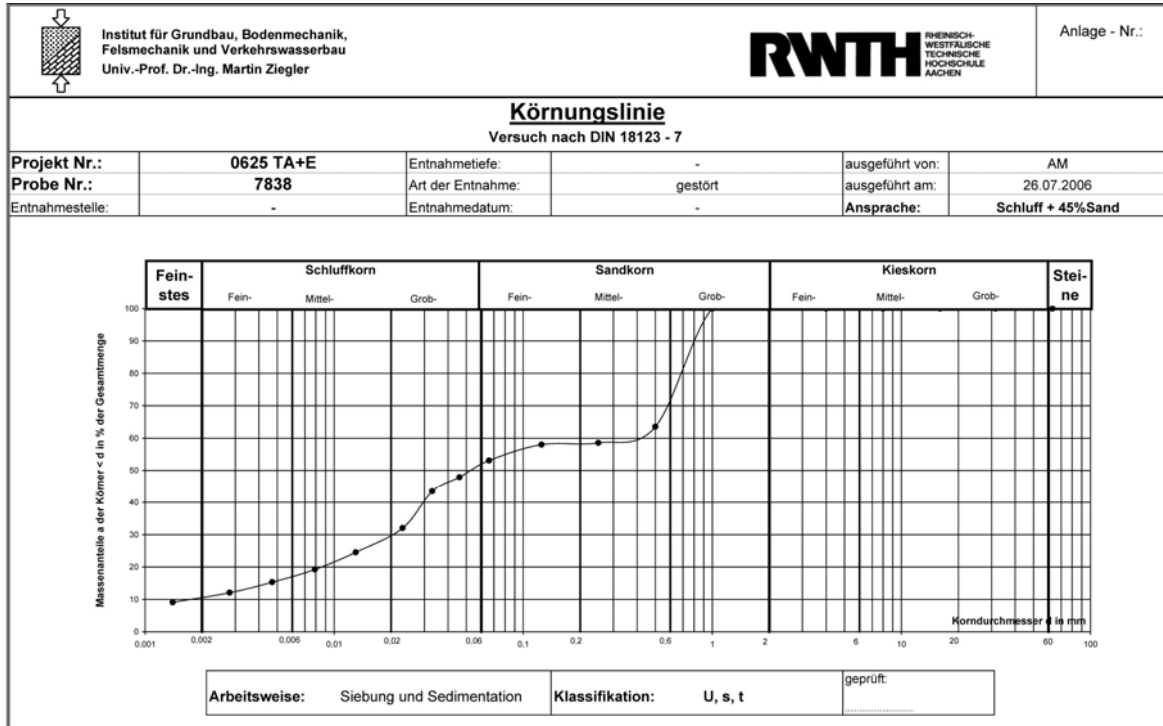


Abb. 22) Kornverteilungskurve

Wassergehalt w [%]	Schrumpfgrenze w _s [%]	Ausrollgrenze w _p [%]	Fließgrenze w _l [%]	Plastizitätszahl I _p
31,03	12,8	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben

Tab. 10) Konsistenzgrenzen

Zusammenfassung

Die Kornverteilungskurven der Proben 7836, 7837 und 7838 sind identisch, sie haben ein gleiches Mischungsverhältnis. Bei diesen Proben variiert nur der Wassergehalt (vgl. Abb. 18, Abb. 20 und Abb. 22).

Probe Nr.	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
7833	21	77	2
7834	18	57	25
7835	12	43	45

Tab. 11) Korngrößenverteilung

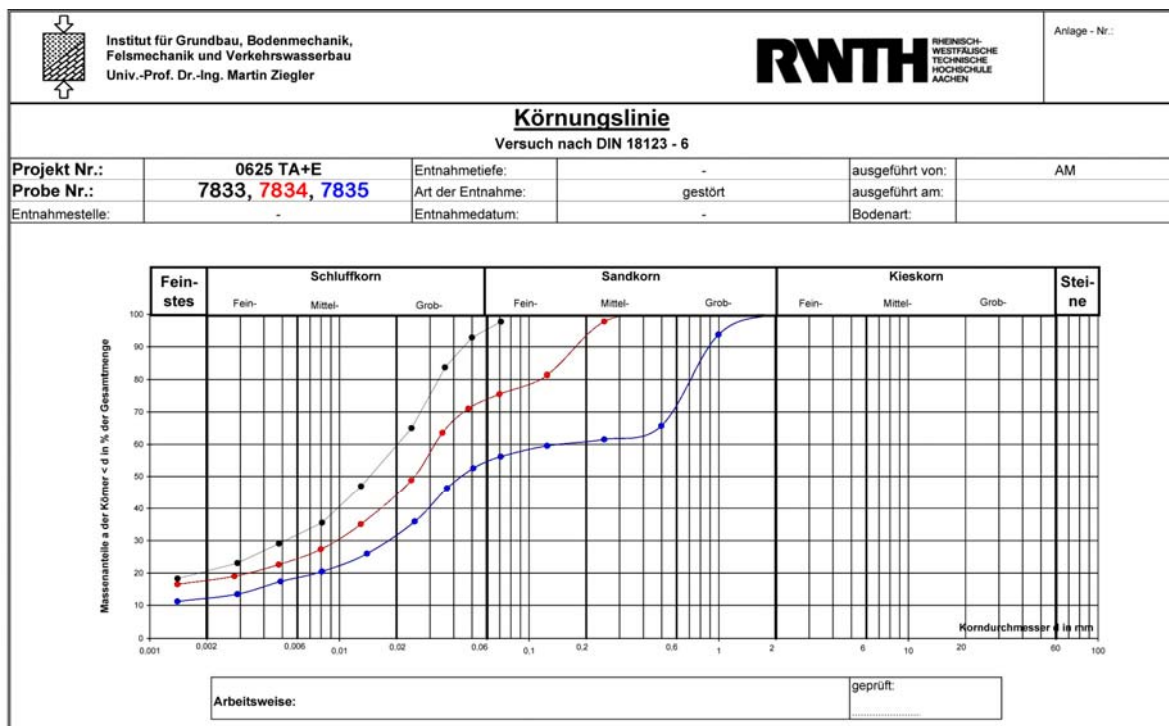


Abb. 23) Kornverteilungskurven der Proben 7833, 7834 und 7835

Probe Nr.	Wassergehalt w [%]	Schrumpfgrenze w_s [%]	Ausrollgrenze w_p [%]	Fließgrenze w_l [%]	Plastizitätszahl I_p
7834	31,53	16,0	13,3	26,3	0,13
7835	25,42	12,2	10,6	22,1	0,115
7836	19,11	10,5	10,9	19,8	0,088
7837	23,92	12,0	10,4	20,5	0,101
7838	31,03	12,8			

Tab. 12) Konsistenzgrenzen

3.2 Einaxiale Druckversuche

3.2.1 Einleitung

Die Druckfestigkeit trockener Lehmteile liegt im Allgemeinen zwischen 30 und 60 kg/cm². Bei extrem magerem Lehm kann sie bei 10 kg/cm² liegen und bei idealer Zusammensetzung im Extremfall auch 100 kg/cm² erreichen. Sie ist vor allem abhängig von der Menge und Art des Tons, aber auch von der Größe und Menge der Schluff-, Sand- und Kieskörner sowie von der Art und dem Maß der Aufbereitung und der Verdichtung.

Die Druckfestigkeit wird durch den so genannten „Einaxialen Druckversuch“ ermittelt, sie ist kennzeichnend für die Festigkeit von Gesteinen, in unserem Fall die des Lehms.

„Die einaxiale Druckfestigkeit ist der Höchstwert der axialen Druckspannung ($q_u = \max \sigma$), die auf einen zylindrischen Boden- oder Gesteinsprüfkörper bei unbehinderter Seitendehnung aufgebracht werden kann, wobei der Versuch mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit (Stauchungsgeschwindigkeit) durchgeführt wird. Wird bis zu einer Stauchung von 20 % kein Extremwert erreicht, so wird die einaxiale Druckspannung bei $\varepsilon = 20 \%$ ($\varepsilon = \Delta h/h_a$ mit $h_a =$ Ausgangsprobenhöhe) als einaxiale Druckfestigkeit definiert“.⁶

3.2.2 Herstellung der Probekörper

Es wurden fünf verschiedenen Lehmmischungen in jeweils fünffacher Ausfertigung dem Prüfverfahren zugeführt. Drei Mischungen wurden dabei mit unterschiedlichen Wassergehalten angefertigt und zwei mit anorganischen Zuschlägen versehen.

Die kreiszylindrischen Proben wurden durch Ausstechen aus der Lehm Masse mit zuvor zugeschnittenen PE-Fallrohren gewonnen und anschließend zum Austrocknen auf eine Glasplatte gestellt.

Um Fehler aus Randeinflüssen zu vermeiden, soll die Probekörperhöhe möglichst den doppelten Durchmesser des Probekörpers betragen ($h > 2 \times d$).

Bei unserm mineralischen Lehm wurde darauf geachtet, dass der Probekörperdurchmesser größer oder mindestens gleich dem sechsfachen des Größtkorndurchmessers ist ($d > 6 \times D_{\max}$).

Die getrockneten Probekörper wurden anschließend geschliffen und vermessen.

⁶ Quellenangabe: *Messen in der Geotechnik*, Bergische Universität Wuppertal

Mischungen

Probennummer	Wasseranteil	Zuschlagstoffe
7836.1-5	19%	keine
7837.1-5	24%	keine
7838.1-5	31%	keine
7840.1-5	24%	10% Natrium-Wasserglas
7841.1-5	24%	5% Zement

Die Lehmzusammensetzung 7835 wurde als Basismischung für alle hergestellten Probekörper verwendet.



1)
Abb. 24.1-2) zu 1: Probekörper mit drei unterschiedlichen Wassergehalten, ansteigend von links nach rechts / zu 2: Probekörper mit Zement-(links) und Wasserglaszuschlag (rechts).

3.2.3 Versuchsdurchführung

Die Druckversuche wurden nach DIN 18136 Teil 7 durchgeführt. Die Prüfkörper wurden in einem Prüfgerät einem konstant steigenden Druck bis zur Belastungsgrenze, dem Brechen des Prüfkörpers, ausgesetzt.

Das Prüfgerät dreht eine motorgetriebene Spindel mit konstanter Geschwindigkeit ($v=0,308$ mm/min). Dabei wird der Druck mittels eines Stempels auf den Probekörper übertragen, wobei pro Zeitschritt der axiale Verformungsweg um einen konstanten Betrag zunimmt; die axiale Last wird gemessen.



1)



2)



3)

Abb. 25.1-3) zu 1: Versuchsaufbau / zu 2: Probe 7836.1 bei Versuchsbeginn / zu 3: Probe 7836.1 nach Versuchseintritt

In der folgenden Tabelle (Tab.14) sind alle geprüften Probekörper im Einzelnen aufgelistet.

Einaxiale Druckversuche (nach DIN 18134)					
Projekt-Nr.:		0625 TA+E		$v =$	0,308 mm/min
				Datum:	03.08.2006
Probe-Nr.:	Durchmesser	Höhe	Masse	Dichte	Bemerkungen:
	cm	cm	g	g/cm ³	
7836.1	3,48	7,32	136,86	1,97	
7836.2	3,45	7,11	131,14	1,97	
7836.3	3,42	7,36	128,31	1,90	großes Loch
7836.4	3,46	7,52	138,32	1,96	Riß und Loch
7836.5	3,52	7,02	130,43	1,91	
7837.1	3,40	7,02	126,01	1,98	mehrere Löcher
7837.2	3,39	7,01	126,54	2,00	
7837.3	3,39	7,02	122,83	1,94	großes Loch
7837.4	3,40	6,90	122,53	1,96	
7837.5	3,38	6,72	120,02	1,99	
7838.1	3,35	6,60	112,94	1,94	
7838.2	3,35	6,68	115,10	1,95	
7838.3	3,35	6,70	115,72	1,96	
7838.4	3,43	6,55	112,37	1,86	
7838.5	3,38	6,30	108,94	1,93	
7840.1	3,48	7,17	114,32	1,68	
7840.2	3,40	7,01	110,34	1,73	
7840.3	3,49	6,75	108,16	1,68	
7840.4	3,45	5,68	87,63	1,65	
7840.5	3,45	7,38	114,21	1,66	großes Loch
7841.1	3,55	6,93	120,01	1,75	mehrere (H) Risse
7841.2	3,57	7,46	127,35	1,71	
7841.3	3,55	7,53	127,00	1,70	mehrere (H) Risse
7841.4	3,55	6,38	113,13	1,79	
7841.5	-	-	-	-	

Tab. 13) Probekörper der Einaxialen Druckversuche

3.2.4 Ergebnisse

Probe 7836

Die Prüfkörper der Probe 7836, ohne anorganische Zuschläge mit einem Wassergehalt von 19%, hielten der zweithöchsten Druckbelastung stand. Die einwandfrei hergestellten Prüfkörper versagten durchschnittlich bei einer Druckbelastung von ca. 3300 kN/m².

Die geringere Druckbelastbarkeit ist vermutlich auf eine inhomogene Dichte und die damit verbundenen niedrigeren Bindekraft der Prüfkörper zurückzuführen. Der Wassergehalt scheint für die hier verwendete Lehmischung zu gering zu sein.

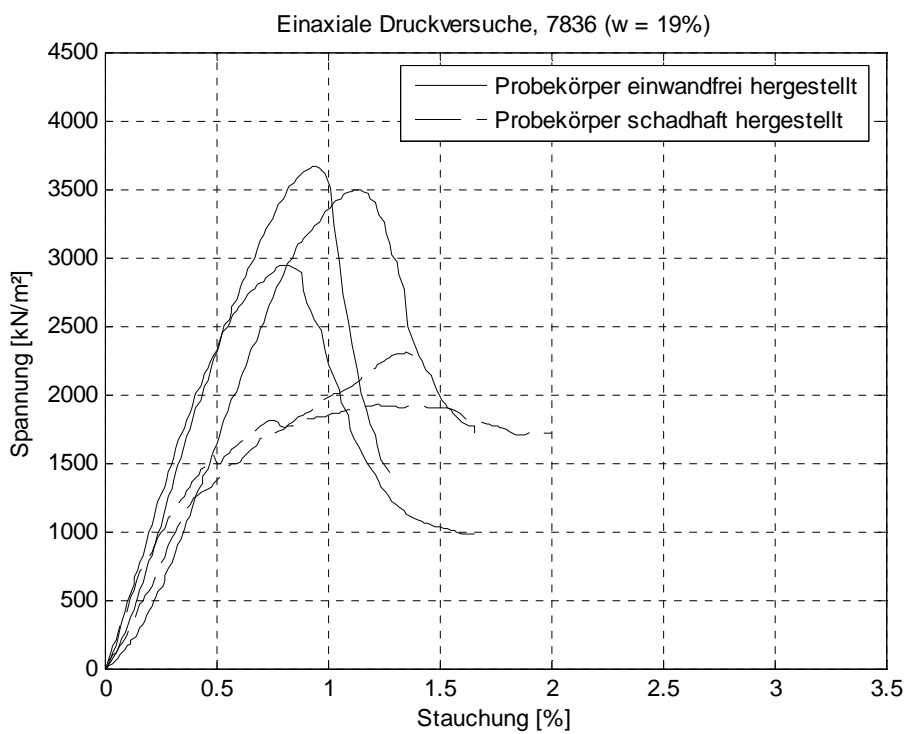


Abb. 26) Einaxiale Druckversuche der Proben 7836.1-5

Probe 7837

Die Prüfkörper der Probe 7837, ohne anorganische Zuschläge mit einem Wassergehalt von 24%, hielten der höchsten Druckbelastung stand. Die einwandfrei hergestellten Prüfkörper versagten durchschnittlich bei einer Druckbelastung von ca. 3800 kN/m².

Die Druckbelastbarkeit ist vermutlich auf eine hohe homogene Dichte und die damit verbundenen hohen Bindekraft der Prüfkörper zurückzuführen. Der Wassergehalt scheint für die hier verwendete Lehmischung nahe am Optimum zu liegen.

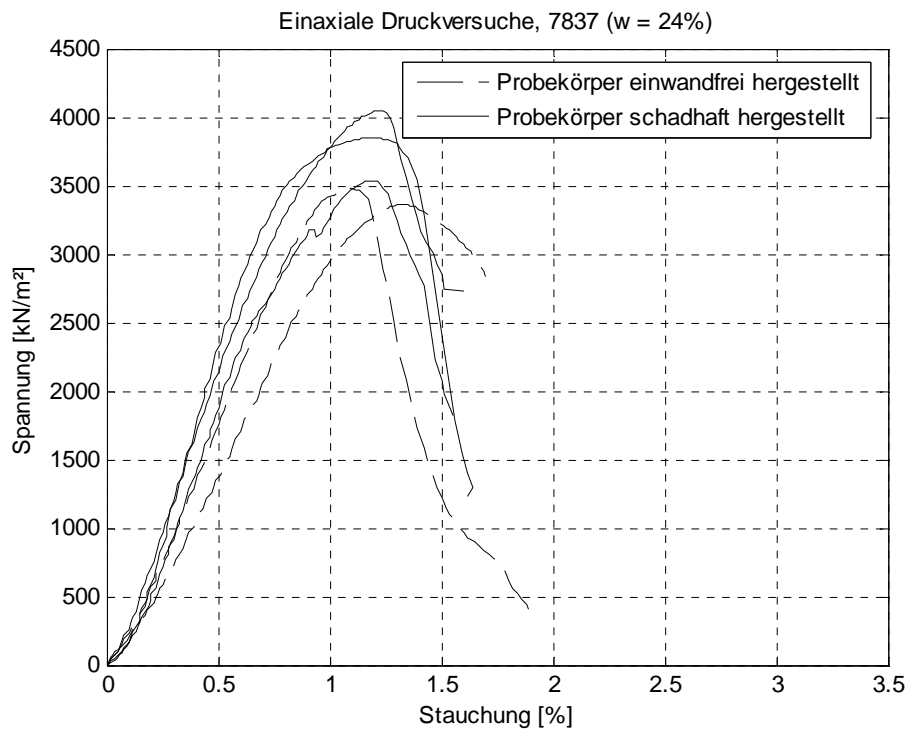


Abb. 27) Einaxiale Druckversuche der Proben 7837.1-5

Probe 7838

Die Prüfkörper der Probe 7838, ohne anorganische Zuschläge mit einem Wassergehalt von 31%, hielten der dritthöchsten Druckbelastung stand. Die einwandfrei hergestellten Prüfkörper versagten durchschnittlich bei einer Druckbelastung von ca. 2100 kN/m². Die geringere Druckbelastbarkeit ist vermutlich auf eine ungleichmäßige Schrumpfung während des Trocknungsprozesses und der dadurch partiell verringerten Dichte und Bindkraft zurückzuführen. Der Wassergehalt scheint für die hier verwendete Lehmischung zu hoch zu sein.

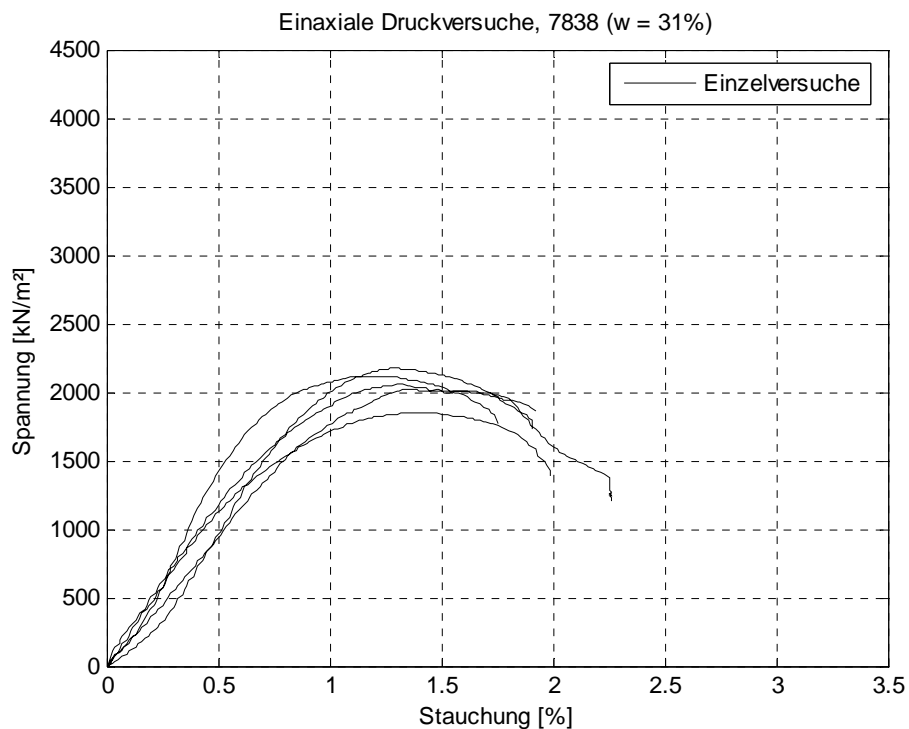


Abb. 28) Einaxiale Druckversuche der Proben 7838.1-5

Probe 7840

Die Prüfkörper der Probe 7840, mit dem anorganische Zuschlag Wasserglas und einem Wassergehalt von 24%, hielten der vierthöchsten Druckbelastung stand. Die einwandfrei hergestellten Prüfkörper versagten durchschnittlich bei einer Druckbelastung von ca. 750 kN/m².

Die geringere Druckbelastbarkeit dieser Probe ist auf den anorganischen Zuschlag Wasserglas zurückzuführen. Dieser Zuschlag verursachte eine inhomogene Dichte mit einer partiell verringerten Bindekraft. Der Wassergehalt war bei dieser Probe gleich dem, der optimal getesteteten. Ob er in Verbindung mit dem Zuschlag erhöht oder verringert werden muss um die Druckbelastbarkeit zu erhöhen müsste durch Folgeversuche ermittelt werden.

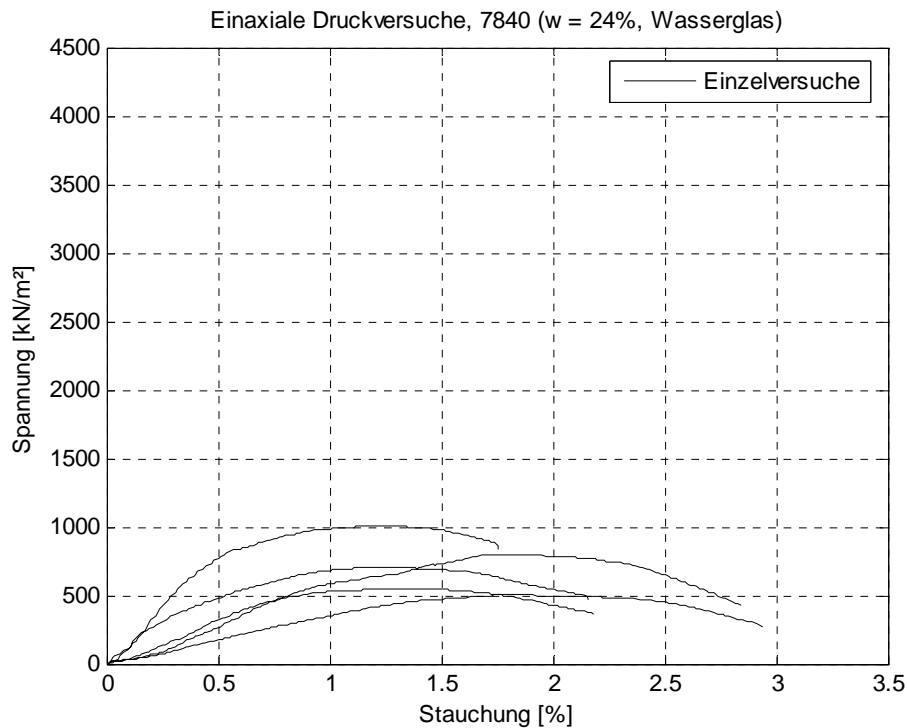


Abb. 29) Einaxiale Druckversuche der Proben 7840.1-5

Probe 7841

Die Prüfkörper der Probe 7841, mit dem anorganischen Zuschlag Zement und einem Wassergehalt von 24%, hielten der geringsten Druckbelastung stand. Die einwandfrei hergestellten Prüfkörper hatten eine so geringe Bindekraft, dass sie bereits ab einer durchschnittlichen Druckbelastung von ca. 300 kN/m² ihre Form verloren und bröckelig auseinander fielen.

Die geringere Druckbelastbarkeit dieser Probe ist auf den anorganischen Zuschlag Zement zurückzuführen. Dieser Zuschlag verursachte eine homogen gering Dichte und grob offene porige Struktur mit einer sehr geringen Bindekraft. Der Wassergehalt war bei dieser Probe gleich dem, der optimal getesteteten. Ob er in Verbindung mit dem Zuschlag erhöht oder verringert werden muss um die Druckbelastbarkeit zu erhöhen müsste durch Folgeversuche ermittelt werden.

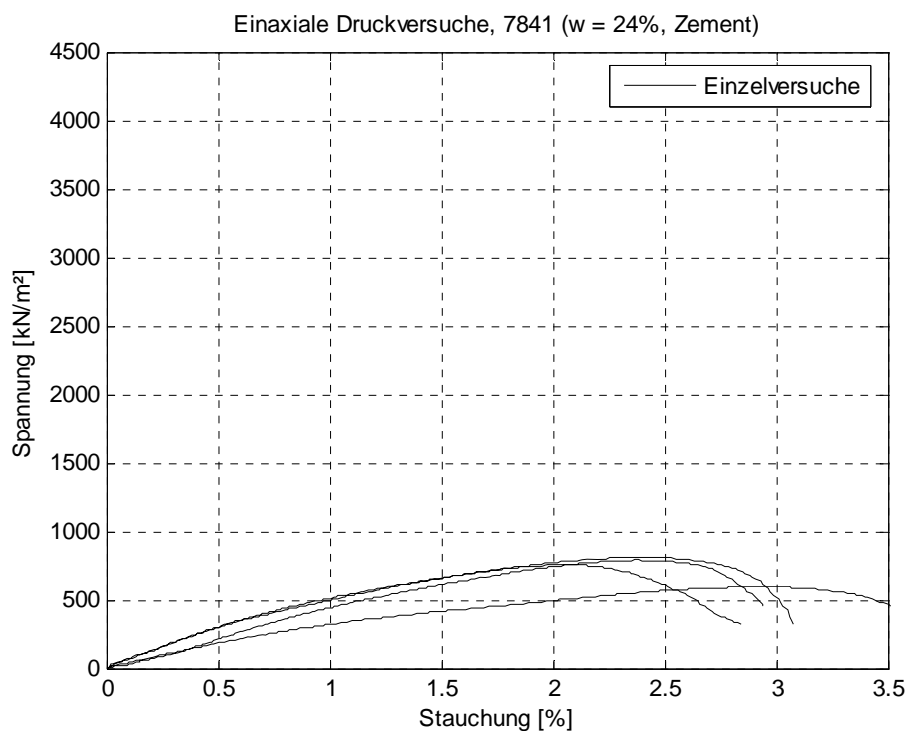


Abb. 30) Einaxiale Druckversuche der Proben 7841.1-4

3.2.5 Auswertung

In der folgenden Abbildung (Abb. 31) und Tabelle (Tab.14) sind die maximalen einaxialen Druckfestigkeiten der einzelnen Versuchsserien dargestellt.

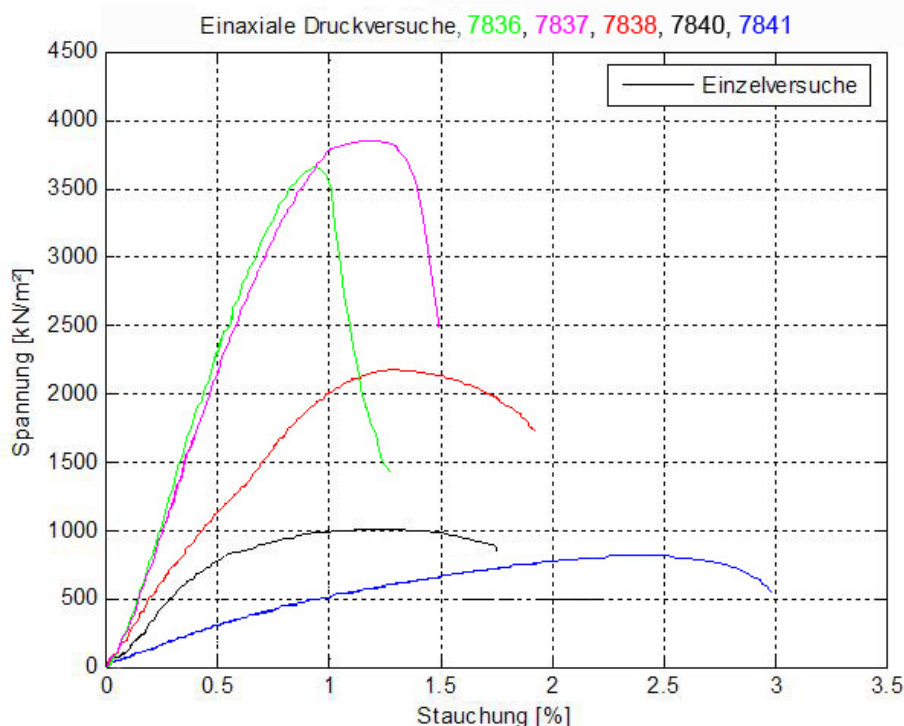


Abb. 31) Maximale Druckfestigkeit der jeweiligen Versuchsserie

Probe Nr.	Maximale Druckfestigkeit [kN/m ²]	Zugehörige Stauchung [%]
7836	3800	1,2
7837	3650	0,9
7838	2200	1,25
7840	1000	1,3
7841	800	2,5

Tab. 14) Maximale Druckfestigkeit mit zugehöriger Stauchung

Bei der für die Versuche verwendeten Lehmmischung liegt der für eine möglichst hohe Druckbelastbarkeit optimale Wassergehalt über 19% und unter 31%. Der Wassergehalt von 24%, den die bei diesem Versuch optimal getestete Probe aufwies, scheint nahe dem Optimum zu liegen. Durch weitergehende Versuche wäre eine genauere Ermittlung des optimalen Wassergehaltes möglich.

Die Zugabe von anorganischen Zuschlägen brachte ohne Anpassung des Wassergehaltes keine Verbesserung sondern eine Verschlechterung der Druckbelastbarkeit. Durch weiter-

gehende Versuche wäre eine Ermittlung des optimalen Wassergehaltes bei der Verwendung von anorganischen Zuschlägen möglich.

4. Perspektiven und Möglichkeiten

Es gibt Hinweise aus praktischen Anwendungen, die darauf hindeuten, dass Lehm nicht nur als Schadstoffbarriere, wie bei Deponien dienen kann, sondern auch zur Speicherung von Schadstoffen verwendet werden kann.

Die praktische Anwendung der potentiell schadstoffspeichernden Eigenschaften von Lehm könnte durch bautechnische Integration lehmhaltiger oder vollständig aus Lehm bestehender Module erfolgen. Die Positionierung solcher Module wäre im heiz- und klimatechnischen Bereich sowie im Baumaterial denkbar.

Diese bisher kaum beachteten und erforschten Eigenschaften von Lehm, ergänzen die ökologischen und ökonomischen Vorteile. Sie lassen eine verstärkte Integration von Lehm bei der Konstruktion und Ausstattung von Wohn- und Bürobauten als höchst attraktiv erscheinen.

Das große Potential von Lehm ist heute schon teilweise praktisch einsetzbar. Eine weitergehende Erforschung der einzigartigen Eigenschaften und der daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten kann Lehm zu einem der wichtigsten Baumaterialien der Zukunft werden lassen.

Literaturverzeichnis

Zitierte und verwendete Literatur

Minke, G:

Lehmbau–Handbuch, Baustoff Lehm und seine Anwendung. 4. und 5. Auflage: Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg 1999, 2001

Ziegert, C.; zur Nieden, G.:

Neue Lehm-Häuser international.1. Auflage: Bauwerk-Verlag, Berlin 2002

Huber, a.; Kleespies, T; Schmidt, P:

Neues Bauen mit Lehm, Konstrucktion und gebaute Objekte.1. Auflage : Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg 1997

Schaerer, A.; Huber, A; Kleespies, T.:

Bauen mit Lehm, Dokumentation 077, Referat der Tagung an der ETHZ: SIA, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1991

Schaerer, A.; Huber, A; Kleespies, T.:

Regeln zum Bauen mit Lehm, Dokumentation 0111, Forschungsauftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft BEW: SIA, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1994

Hamidovic- Baumgarten, J:

Bauen mit Lehm, Stand und Perspektiven für Schleswig Holstein: Umweltministerium Schleswig Holstein und Nova Ideja, Kiel 2004

Rexhäuser, T

Verdichtungseigenschaften von Felsbruchmaterialien, Diplomarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar, 2005

Walz, B:

Messen in der Geotechnik, Skript zur Vorlesung: Bergische Universität Wuppertal, 2001

Internetadressen

www.dachverband-lehm.de

www.tek.tu-berlin.de/forschung/lehmbau/lehmwellerbau.htm

http://www.calice.igt.ethz.ch/bodenmechanik/classification_d/classification_d.htm#SOILCLASS