

Geotechnische Probleme beim Lehmbau



DI Dr. Franz Aschauer, MBA
franz.aschauer@boku.ac.at



Prof. Dr.-Ing. Wei Wu
Wei.wu@boku.ac.at

Universität für Bodenkultur Wien
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Institut für Geotechnik
Feistmantelstraße 4
1180 Vienna

Tel.: +43-1-47654-5569; Fax: +43-1-47654-5567 (Aschauer), Tel.: +43-1-47654-5551; Fax: +43-1-47654-5567 (Wu)

Nachhaltigkeit gewinnt bei Bauvorhaben immer mehr an Bedeutung. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Verwendung von leicht recyclebaren und „energiearmen“ Baustoffen, die regional verfügbar sind. Diese Anforderungen werden vom Baustoff Lehm erfüllt. Dieser Beitrag beschreibt die Bodeneigenschaften, die für Lehmbauten kennzeichnend sind. Neben den unterschiedlichen Baumethoden wird die Problematik des Lehmbaus in unseren Breiten dargestellt. Dabei wird deutlich, dass bei gezielter Auswahl der Böden anhand der Bildsamkeitszahl, des linearen Schrumpfmaßes und der Kornverteilung einerseits und der eventuell beizumischenden Additive andererseits die erfolgreiche Anwendung der Lehmbauweise für dauerhafte Bauwerke mit guten wohnklimatischen Eigenschaften auch bei klimatisch schwierigen Verhältnissen sichergestellt werden kann.

1 Einführung

Lehmbauten werden schon seit Jahrhunderten in Entwicklungsländern aber auch in industrialisierten Ländern eingesetzt. Sie sind die am meisten verbreiteten Behausungen. 30 Prozent der Weltbevölkerung leben in derartigen Domizilen. Im 19. und 20. Jahrhundert hat allerdings die Verbreitung dieser Bauweise in industrialisierten Ländern zu Gunsten von modernen Bauprodukten stark abgenommen. Das vielfältige Anwendungsgebiet reicht von Häusern, Mauern, Zäunen bis hin zu Festungen und Tempeln. Derartige Konstruktionen zeichnen sich bei richtiger Abstimmung des Baustoffes mit der Baumethode durch eine lange Lebensdauer aus.

Lehm ist auch ein Baustoff, der sich mit seinen positiven Eigenschaften hervorragend für die Umsetzung von Nachhaltigkeitsgrundsätzen in der Bauwirtschaft eignet. Sowohl in der Herstellung als auch bei der Verarbeitung und Nutzung sowie der späteren Entsorgung verbraucht Lehm als Baustoff kaum Energie und Ressourcen.

Da Lehm in der Regel gut regional verfügbar ist, eignet er sich besonders gut für den Aufbau von regionalen Wirtschaftsnetzen – von der Rohstoffbeschaffung und -verarbeitung bis hin zur Produktherstellung und -vermarktung.

In solchen Fällen ist Lehm als Baustoff auch auf Grund von kurzen Transportwegen besonders „energiearm“. Beim Einsatz von Lehmstoffen kann die Eigenleistung von Bauherren gut in Anspruch genommen werden, was bei einem arbeitsintensiven Baustoff wie Lehm von großer Bedeutung ist. Daher würde sich der Einsatz von Lehm bei Bauvorhaben mit gemeinnützigem Charakter im Rahmen von aktuellen arbeitsmarktpolitischen Maßnahmen sehr gut anbieten. Das Interesse an Lehm als ein leistungsfähiges, kosteneffektives Baumaterial hat in den letzten Jahren wieder stark zugenommen. Dennoch wird er in unseren Breiten im Vergleich zu anderen Baustoffen kaum eingesetzt, da sein Potential noch oft zu wenig erkannt wird.

2 Zusammensetzung von Lehmstoffen und -baumethoden

Lehm ist eine Mischung aus Tonmineralien, Schluff und Sand. Für Baulehm empfiehlt sich ein Tonanteil bis zu 30 %, seine Eigenschaften können durch verschiedene Zusätze je nach Anwendung verbessert werden (Bild 1).

Lehmstoffe können mittels nassen Lehmtechniken durch Mischung von Baulehm, Zusätzen und Wasser vor Ort hergestellt werden (Stampf-, Weller-, Stroh-, und Leichtlehm sowie Lehmschüttungen) oder durch trockene Lehmtechniken vorgefertigt werden (Lehmsteine, -platten, -kacheln, -mörtel sowie Grünlinge aus der Ziegelproduktion).

2.1 Lehmmassivbau

Die Errichtung von Lehmmauern stellt einen arbeitsintensiven Prozess dar und kann durch unterschiedliche Baumethoden errichtet werden

2.1.1 Lehmstampfbau

Für den Lehmstampfbau sind, außer sehr mageren Lehmen, alle Lehmarten brauchbar, Steine über 50 mm

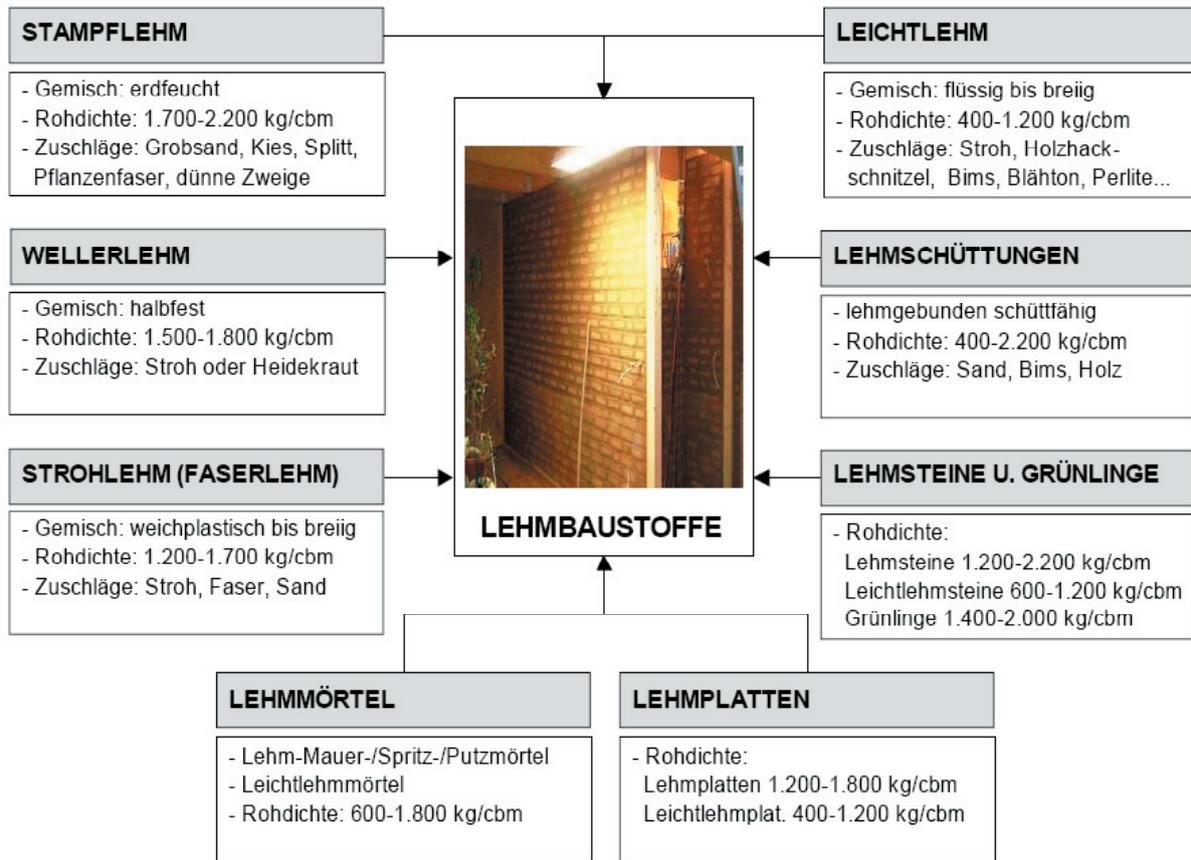


Bild 1: Übersicht über die verschiedenen Lehmbaumaterialien

Durchmesser sind auszusondern. In einem ersten Arbeitsschritt ist die richtige Lehmmischung herzustellen und anschließend in eine geeignete Schalung einzubringen. Der aufbereitete Lehm wird im erdfeuchten Zustand an Ort und Stelle in Schalungen lagenweise zu Mauern gestampft. Die Schalung besteht in der Regel aus Holzbohlen oder Sperrholzplatten, die mit einem Stahl- oder Aluminiumrahmen versteift sind. Diese Schalelemente werden mit Stahlstäben zusammengehalten, um dem Stampfdruck standzuhalten. Nach dem Umsetzen der Schalung werden diese Stäbe wieder entfernt und die entstandenen Löcher mit der gleichen Lehmmischung verfüllt. Die Mauerbank wird genau wie die Fenster- und Türüberleger aus Holz oder auch Stahl hergestellt.

Zu feuchter Lehm darf nicht eingebaut werden, da er nicht genügend verdichtet werden kann und sich Schwindrisse ausbilden können. Eine Lagenschütthöhe von ca. 12 cm soll nicht überschritten werden. Nach dem Abglätten der Schütthöhe erfolgt die Verdichtung der Mischung aus Lehm, Wasser und eventuellen Additiven mit einem Handstampfer oder mit einem handgeführten Hydraulikstampfer direkt in den Wandschalungen. Das Stampfen bewirkt eine Zusammenpressung um etwa ein Drittel. Es gilt Trockendichten von mindestens 18 kN/m³ zu erreichen.

Der Lehmstampfbau stellt eine massive Lehmbaumaterial dar und ergibt feste zähe und homogene Baukörper (Bild 2). Bei den heutigen hohen energietechnischen Anforderungen resultieren in unseren Breiten aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit Außenwanddicken von 55 bis 70 cm mit dem Nachteil einer reduzierten Wohnfläche.

2.1.2 Lehmsteinbau

Bei der Herstellung von Lehmsteinen (Lehmziegeln) wird eine Mischung aus Lehm, Wasser und eventuellen Zusätzen in Holz oder Stahlformen gegossen und im einfachsten Fall in der Sonne getrocknet. Die getrockneten Lehmbaumaterialien werden im Verband vermauert. Als Mörtel kommt im einfachsten Fall die gleiche Ausgangsmischung wie bei der Ziegelherstellung zur Verwendung. Es kann aber auch Kalkmörtel oder hydraulischer Mörtel angewendet werden. Der Mörtel muss auf jedem Fall steinfrei sein. Das Mauerwerk kann geschlämmt oder verputzt werden aber auch auf Sicht verarbeitet werden. Der Lehmsteinbau kann bei tragenden Wänden, Gewölben oder Kuppeln eingesetzt werden aber auch als Ausfachung Verwendung finden.

2.2 Traggerippelehm

Eine Holzfachwerkstruktur (z.B. aus Eiche oder Buche) übernimmt alle auftretenden Lasten. Bevor mit den Lehmausfachungen begonnen wird, ist bereits das Dach vollständig gedeckt. Die Ausfachungen werden mit Lehmziegeln bzw. Backsteinen ausgemauert oder mit Geflechtaarten ausgeflochten und anschließend mit Lehm eingeworfen. Ausfachungen können aber auch mittels Leichtlehm – einer Mischung aus Lehm mit Stroh oder Häckselgut – hergestellt werden. Die Einbringung kann nass oder in Form von vorgefertigten Elementen trocken erfolgen. Die Mischung mit Stroh bzw. Häckselgut verbessert den Wärmedämmwert auf ca. 0.35 W/m²K.

In Kombination mit Holz (z.B. Holzrahmenbau mit Lehmausfachungen) bildet Lehm eine ideale Kombination, da dem Holz Wasser entzogen wird und es dadurch vor schädlicher Feuchtigkeit geschützt ist.

3 Eigenschaften von Lehmbauten

Als einer der ältesten Baustoffe der Menschheit stellt Lehm aber immer noch einen der modernsten, mit unvergleichbaren wohnklimatischen Eigenschaften dar. Er ist einerseits dadurch gekennzeichnet, dass er Feuchtigkeit gut aufnimmt, sie speichert und gleichmäßig wieder abgibt, andererseits speichert er auch sehr gut Wärme und gibt sie langsam wieder ab, wodurch die Raumtemperatur reguliert wird. Der Baustoff Lehm gilt aus diesen Gründen als Gesundheitsbaustoff Nr. 1!

Die Festigkeit des Lehms kann durch Zugabe von Sand – es wird auch vom Abmagern gesprochen – verbessert, allerdings werden durch diese Maßnahme die wohnklimatischen Eigenschaften verschlechtert. Die Dichte variiert von 500 kg/m^3 beim Leichtlehm bis zu 2200 kg/m^3 beim Massivlehm. Gestampfte Lehmmauern weisen eine Festigkeit von mindestens 2 MN/m^2 (nach 28 Tagen) auf. Die Gebäudehöhe ist im Allgemeinen auf zwei oder drei Geschosse begrenzt.

Die Stabilität erfordert dicke Wände (Lehmmassivbau) oder tragende Konstruktionen aus anderen Materialien (Traggerippelehmbau). Eine gute Verdichtung ist nicht nur Voraussetzung für eine hohe Festigkeit, sondern verringert gleichzeitig die thermische Leitfähigkeit. Was statische Belange betrifft, sind Lehmhäuser unempfindlicher gegenüber Erschütterungen als konventionelle Bauten.

Die Außenmauern in Trockengebieten benötigen keine wasserabweisenden Zusätze und Abdeckungen durch Vordächer. In unseren klimatischen Regionen erfordern Lehmmauern jedoch konstruktive Maßnahmen zum Schutz vor Feuchtigkeit. Zum Schutz vor aufsteigender Bodenfeuchtigkeit sind Kellermauerwerk bzw. Sockel 50 cm über den Boden auszuführen und aus Beton, Naturstein oder gemauert herzustellen. Zwischen Sockel und Lehmwand sollte eine Sperrschicht angeordnet werden und die Lehmwand vor Spritzwasser und Schnee geschützt werden. Da der größte Feind des Lehmbaus der Regen ist, gilt es ausreichende Dachüberstände, eine Holzverschalung oder Vorbauten auf der regenausgesetzten Seite vorzusehen.

Nasse Lehmbautechniken können nur zwischen Mai und September ausgeführt werden, da es Trockenzeiten einzuhalten gilt, um u. a. eine mögliche Schimmelbildung auszuschließen.

Da Lehmstoffe weicher, empfindlicher und nicht besonders wetterfest sind, geht der Trend im Lehmbau immer mehr in Richtung eines Einsatzes in den Innenbereichen als nichttragender Lehm in Form von Trennwänden und Putzen. Der selbsttragende Lehm ist auf Ein- und Zweifamilienhäuser beschränkt.

4 Stabilisierung

Bei Lehmmauern konnte in Europa, Asien und Afrika ein Alter von mehreren hundert Jahren festgestellt werden, obwohl weder chemische Additive, Bewehrungselemente oder maschinellen Stampfgeräte zum Einsatz kamen. Die Verwendung von Lehm kann aber auch je nach den Bodeneigenschaften und klimatischen Randbedingungen eine Stabilisierung erforderlich machen.

Bei der Stabilisierung von Lehmmauern werden folgende Ziele verfolgt:



Bild 2: Denkmalgeschützter Lehmstampfbau in Südchina aus dem 17. Jahrhundert

- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Steigerung der Druckfestigkeit, Zugfestigkeit und Scherkraft)
- Reduzierung des Porengehaltes und der Volumenveränderungen (Schwellen und Schrumpfen infolge Wassergehaltsänderung)
- Verbesserung der Beständigkeit gegenüber Niederschlag und Wind (Wasserundurchlässigkeit und Oberflächenerosion)

Generell ist festzuhalten, dass zur Stabilisierung eine Vielzahl von Additiven eingesetzt werden kann. Neben Sand und Ton werden hauptsächlich Kalk und Zement aber auch unterschiedliche Zement-Kalkgemische, Teer, Natur- und Kunststoffasern, Stroh, Flugasche- Kalkkombinationen, Silikate, ... beigemischt. In Entwicklungsländern werden auch Kuhdung, Reisschalen, Entenfedern, ... gegeben.

Die Auswahl der Additive und die Dosierung bedürfen sorgfältiger Laboranalysen. Die Stabilisierungsmethoden können in folgende drei Hauptgruppen zusammengefasst werden:

- Verdichtung
- Kornstabilisierung und
- Chemische Stabilisierung

Eine manuelle oder maschinelle Verdichtung führt zu einer Erhöhung der Trockendichte und Festigkeit. Diese Methode kann sowohl einzeln als auch in Kombination mit Korn- und/oder chemischer Stabilisierung Anwendung finden. Die Wirksamkeit der Verdichtung wird entscheidend vom Wassergehalt des Bodens beeinflusst, aus diesem Grund gilt es in Laboruntersuchungen mittels Proctorversuchen jenen Wassergehalt herauszufinden, bei dem sich der Boden am besten verdichten lässt.

Unter einer Kornstabilisierung versteht man eine Vermischung von zwei oder mehr Bodenmaterialien mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften (z. B. Kornverteilung) oder die Elimination bestimmter Korngrößen. Die Zugabe von Sand führt zu einem besseren Scherverhalten, eine weitgestufte Kornverteilung zu einer höheren Trockendichte. Nicht geeignet sind grobkörnige Böden wie Kies oder Sand sowie stark bildsame Tone.

Die chemische Stabilisierung umfasst beispielsweise die Zugabe von Kalk, um sowohl die Festigkeit als auch

Tabelle 1: Klassifizierung von Böden für den Lehm- und Zementbau in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften [10]

	Lineares Schrumpfmaß (%)	Bildsamkeitszahl (%)	Sandgehalt (%)
günstig	<7,1	<13	<60
zufriedenstellend	7,1–13,0	16–30	
ungünstig	>13,0	>30	>60

die Bildsamkeit bzw. oder Schrumpfverhalten zu beeinflussen. Kalk wird entweder in Form von gebranntem Kalk (CaO) oder gelöschtem Kalk (Ca(OH)₂) eingebracht und bildet mit den Bodenfeinteilen Aggregate. Die Zumischung variiert zwischen 6 und 12 % der Trockendichte. Je mehr Tonanteile der Boden aufweist, desto höher muss die Kalkbeigabe sein. Es kann aber auch Zement zugemischt werden, wobei eine reine Zementstabilisierung ab einer Fließgrenze des Bodens von 30–40 % oder bei einem Tonanteil größer als 25–30 % nicht mehr wirkungsvoll ist.

Studien zeigen, dass die Festigkeit pro Prozentpunkt Zementzumischung im Vergleich zu einer Kalkzumischung um das Doppelte ansteigt [10].

Eine Teerzugabe führt zu keiner Veränderung der Festigkeitseigenschaften, jedoch zu einer Verbesserung des Wasserabweisungsvermögens. Eine Zumischung von 2–3 % ist üblich.

Basierend auf dem linearen Schrumpfmaß und der Bildsamkeit kann die Eignung unterschiedlicher Böden für den Lehm- und Zementbau entsprechend Tab. 1 in drei Klassen unterschieden werden. Zur Bestimmung des linearen Schrumpfmaßes wird der Boden mit einem Wassergehalt, der der Fließgrenze entspricht, in eine halbzyklindrische Form gestrichen und nach der Ofentrocknung die reduzierte Länge gemessen und daraus das lineare Schrumpfmaß bestimmt. Die Bildsamkeitszahl wird aus der Differenz des Wassergehaltes der Fließgrenze und dem Wassergehalt bei der Ausrollgrenze errechnet.

Geht man von einer Festigkeit von >2 MN/m² aus, die bei der Lehmmassivbauweise einzuhalten sind, so können als günstig klassifizierte Böden mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % stabilisiert werden, zufriedenstellende mit 65 % und ungünstige mit 10 %. Der Sandgehalt kann ergänzend als Beurteilungsfaktor herangezogen werden. Zufriedenstellend eingeordnete Böden können mit Zugabe von zumindest 6 % Zement oder Kalk bzw. einer Mischung aus 4 % Kalk und 2 % Zement stabilisiert werden. Vergleicht man die Stabilisierungszusätze Zement und Kalk, so kann festgehalten werden, dass Kalk das Schrumpfen des Bodens besser reduziert und daher besonders bei tonreichen Böden bevorzugt verwendet werden soll.

5 Schlussfolgerungen

Zukünftig gilt es verstärkt die Möglichkeiten und die damit verbundenen Chancen des Lehm- und Zementbaues zu erforschen sowie verstärkte Anstrengungen zu unternehmen, um den Wissenstransfer in die Praxis erfolgreich gestalten zu können. Dazu bedarf es aber auch von staatlicher Seite mittels entsprechender Forschungs- und Technologiepolitik Förderinstrumente einzusetzen, damit dem Vorurteil, dass es sich beim Lehm- und Zementbau um eine antiquierte Bauweise mit vielen Risiken handelt, erfolgreich entgegen getreten werden kann und einer breiten Öffentlichkeit die Vorteile der innovativen und ressourcenschonenden Bauweise näher gebracht werden können.

Literatur

- 1 Arango GonzaDlez, J.R. 1999, Uniaxial deformation-stress behavior of the rammed-earth of the Alcazaba Cadima, *Materials and Structures* 32 (215), pp. 70–74
- 2 Güntzel, J.G. 1986, Zur Geschichte des Lehm- und Zementbaues in Deutschland, Dissertation Universität Kassel
- 3 Hall, M., Swaney, B. 2005, Stabilised rammed earth (SRE) wall construction – Now available in the UK, *Building Engineer* 80 (9), pp. 12–15
- 4 Hall, M., Djerbib, Y. 2004, Moisture ingress in rammed earth: Part 1 - The effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction, *Construction and Building Materials* 18 (4), pp. 269–280
- 5 Lilley, D.M., Robinson, J. 1995, Ultimate strength of rammed earth walls with openings, *Proceedings – ICE: Structures & Buildings* 110 (3), pp. 278–287
- 6 Minke, G. 1985, Lehm- und Zementbau – Erfahrungen und Prognosen, *Deutsche Bauzeitschrift* 33, S. 1025–1027.
- 7 Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Landwirtschaft des Landes Schleswig-Holstein, 2004, Studie „Bauen mit Lehm – Perspektiven für Schleswig-Holstein“
- 8 Taylor, P., Luther, M.B. 2004, Evaluating rammed earth walls: a case study, *Solar Energy* 76 (1-3), pp. 79–84
- 9 Walker, P.J., Dobson, S. 2001, Pullout tests on deformed and plain rebars in cement-stabilized rammed earth, *Journal of Materials in Civil Engineering* 13 (4), pp. 291–297
- 10 Van Burroughs, S. 2001, Quantitative criteria for the selection and stabilisation of soils for rammed earth wall construction, Phd at the University of New South Wales, Australia