

Thesen zur Dissertation

Revisiting vernacular technique:
Engineering a low environmental impact earth stabilisation method

Zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Architektur und Urbanistik der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Burhan Çiçek, M. Sc.
geboren am 15. Mai 1984 in Mazgirt

Weimar, 2021

Gutachter

.....

.....

.....

Tag der Disputation:

Problemstellung

Lehm wird seit der Antike als Baumaterial verwendet. Aufgrund einiger Nachteile wie geringe Wasserstabilität und mäßige Festigkeit wurde Lehm stabilisiert. Kalk, Puzzolan oder Gips waren die am häufigsten eingesetzten Zusatzstoffe zur Stabilisierung. In letzter Zeit ist Zement der am meisten verwendete Zusatzstoff geworden, da er die Festigkeit und Durabilität von Lehm verbessert. Die Herstellung von Zement verursacht jedoch hohe CO₂-Emissionen. Die Verwendung von Zement als Zusatzstoff verringert somit die ökologischen Vorteile des Lehms. Alternativen zur Zementstabilisierung sind derzeit weder wirksam genug, um die CO₂-Emission zu reduzieren, noch ermöglichen sie eine bessere Festigkeit und Durabilität als Zement.

Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit befasst sich mit der Wiederentdeckung eines vernakulären Ansatzes für die Lehmstabilisierungstechnik mit geringen Umweltauswirkungen, der darauf abzielt, Zement bei der Lehmstabilisierung zu ersetzen. Die Hauptforschungsfrage im Zusammenhang mit dem Forschungsziel ist:

Wie können vernakuläre Zusatzstoffe kombiniert werden, um eine umweltfreundliche und bauphysikalisch effiziente Stabilisierung zu ermöglichen, die es ermöglicht, Zement bei der Erdstabilisierung zu ersetzen?

Die folgenden Unterfragen können aus der Hauptfrage abgeleitet werden:

Kapitel 2: Welche Lehmarten eignen sich laut Baunormen für Lehmbauten und warum ist eine Lehmstabilisierung erforderlich?

Kapitel 3: Was sind die wichtigsten materiellen und forschungsrelevanten Merkmale der Methodik im Zusammenhang mit der vorgeschlagenen Stabilisierung?

Kapitel 4: Kann eine Kombination von Trass, Gips und Kalk als Zusatzstoffe als effizienter und umweltfreundlicher Weg zur Erdstabilisierung dienen?

Kapitel 5: Welche Verbesserungen werden gegenüber relevanten vergleichbaren Studien erzielt und welche Vorteile bietet die Verwendung dieser Mischung gegenüber herkömmlichen Alternativen?

Die folgenden Zusammenfassungen beschreiben die wichtigsten Ergebnisse für jedes der vier Kapitel.

Stand der Technik (Kapitel 2):

Der erste Schritt der Methode besteht in einer umfassenden Literaturrecherche zur Lehmstabilisierung (LS) insbesondere im Hinblick auf Baunormen und Bodenklassifizierung. Die wichtigsten Ergebnisse sind wie folgt:

Zement, Kalk, Flugasche (ein künstliches Puzzolan) und Gips sind übliche Zusatzstoffe, aber die Zementstabilisierung wird in der Literatur am häufigsten verwendet. Sie ist am weitestgehenden standardisiert, da sie die Festigkeit und Durabilität des Lehms erheblich verbessert. Es gibt keine einheitliche Klassifizierung, Prüfmethode oder Bestimmung der Art der Zusatzstoffe und ihrer Verwendungsbeschränkungen. In der Praxis werden hauptsächlich Zementprüfstandards verwendet. Zement zur LS ist jedoch aufgrund seiner hohen CO₂-Emissionen bei der Herstellung nachteilig. Dies ist die Hauptforschungslücke.

In den untersuchten Studien wurden hauptsächlich örtlich gewonnene und expansive Lehme verwendet was die Klassifizierung und Identifizierung des Lehmes erfordert. Dies ist die zweite Forschungslücke.

Laut den Ergebnissen der Literaturrecherche kann die Kombination aus Kalk, Puzzolan und Gips eine bedeutende Alternative sein, um Zement zur LS zu ersetzen. Es wurden jedoch nur wenige Studien mit künstlichem Puzzolan durchgeführt. Künstliches Puzzolan trägt indirekt zu CO₂-Emissionen bei und verbessert die Eigenschaften des Lehms nicht immer effizient. Dies ist die dritte Forschungslücke.

Darüber hinaus wurden in diesen Studien keine weiteren Experimente zur Bestimmung der bauphysikalischen Eigenschaften (performance tests) wie Wasserbeständigkeit, nasse Druckfestigkeit, Frost-Tau-Zyklen usw. durchgeführt.

Entwicklung des Mix-Designs (Kapitel 3):

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Entwicklung des Mix-Designs einschließlich der experimentellen Materialien und ihrer Prozentsätze ausführlich beschrieben. Das Kernkonzept für die Entwicklung besteht darin, herkömmliche Zusatzstoffe zu kombinieren, um sowohl die Festigkeit und Haltbarkeit des Rohlehmes zu verbessern als auch die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Der bei den Experimenten verwendete Lehm wurde unter Laborbedingungen hergestellt. Der Lehm besteht aus industriellem Ton und industriell standardisiertem Sand. Der industrielle Lehm ermöglichte es, die Notwendigkeit für Bodenaushub-, Klassifizierungs- sowie Bodeneignungstests zu eliminieren. Die in dieser Studie

verwendeten Zusatzstoffe werden als herkömmliche, auf dem Markt erhältliche Zusatzstoffe klassifiziert.

28 Lehmischungen mit unterschiedlichen Zusatzgehalten wurden hergestellt und verschiedene Tests durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit dieser Technik zu untersuchen. Tabelle 1 zeigt die durchgeführten Tests.

Tabelle 1: Die in dieser Studie durchgeführte Tests.

Tests	
Kenngößenprüfungen	bauphysikalische Kenngößen
- Setzversuch	- Nasse Druckfestigkeit,
- Korngrößenverteilung	- Trockene Druckfestigkeit,
- Sedimentation	- Kapillarwasseranstieg,
- Schüttdichte	- Wassererosion,
- Porosität	- Wasseraufnahme,
- Nasse Druckfestigkeit	- Frost-Tau-Zyklus,
- Trockene Druckfestigkeit	- Trockenschwindmaß,
- Biegefestigkeit	- Verzögerte Ettringitbildung,
- Trockenschwindmaß	- VICAT-Abbindezeit,
- XRD Analyse	- Wärmeleitfähigkeit

Experimentelle Ergebnisse (Kapitel 4):

Die Prüfungen wurden an Lehmproben mit unterschiedlichem Ton- und Zusatzstoffgehalt durchgeführt.

Zunächst wurden die Kenngößenprüfungen durchgeführt. Den Ergebnissen zufolge weist die Lehmischung mit 16% Trass + 2% Gips + 2,5% Kalk nach 28 Tagen Aushärtung die höchste Festigkeit auf, unabhängig davon, ob sie trocken oder nass ist. Die maximale Druckfestigkeit von 8,6 MPa wurde durch 16% Wasserzugabe erreicht. Ettringit, ein typisches Hydratationsprodukt von Portlandzement, wurde in allen Proben identifiziert. Die Bildung von Ettringit steigt während der Aushärtungszeit von 7 bis 28 Tage deutlich an. Nicht die Zunahme des Gipsgehalts, sondern die Zunahme des Trassgehalts trägt zur Bildung von Ettringit bei. Bei höherem Trassgehalt bildet sich mehr Ettringit. Festigkeitstests und XRD-Analysen haben gezeigt, dass das Mix-Design, das nur Trass und Kalk, aber keinen Gips enthält, eine sehr schwache Festigkeit aufweist. Dies bedeutet, dass Gips als Sulfatquelle beim vorgeschlagenen Stabilisierungsansatz eine Schlüsselrolle spielt.

Lehm mit Trass+Gips+Kalk (ETGL) zeigt 80% weniger Schwinden als Rohlehm. Das durchschnittliche lineare Trockenschwindmaß von getesteten stabilisierten Lehmproben mit 16% Wasser beträgt 0,36% und ist damit dreimal höher als das von normalfestem Beton. Die

Ergebnisse haben gezeigt, dass das Schwinden umso geringer ist, je höher der Gipsgehalt ist. Durch den hohen Gipsgehalt wird die Abbindezeit von der Hydratation des Gipses dominiert. Die Endhärtung (final setting) der Proben mit hohem Trass, aber geringerem Gipsgehalt beträgt ca. 15 Stunden. Im Gegensatz dazu war Lehmpaste ohne Zusätze nach 48 Stunden noch weich. Die Ergebnisse zeigen, dass 2% Zitronensäure die Endhärtung bis zu 25 Stunden verzögern kann. Zusätzlich nimmt mit zunehmendem Gipsgehalt die Trockendichte von stabilisierten Lehmproben ab. Je höher der Gipsanteil, desto poröser die Proben.

Zweitens wurden die Tests zur Ermittlung der bauphysikalischen Eigenschaften durchgeführt. ETGL ist zu 99,95% in Wasser unlöslich. Im Vergleich dazu hatten die Rohlehmproben bei der Tauchprüfung innerhalb von 10 Minuten 38,5% der Masse verloren. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Kapillarabsorption umso geringer ist, je höher der Trassgehalt ist. Darüber hinaus wurden nach Frost-Tau-Zyklen eine Expansion von etwa 0,005% verzeichnet. Zunehmender Gips- und Kalkgehalt führte zu einer Zunahme der Expansion. Dieses Verhalten kann auf eine verzögerte Ettringitbildung zurückgeführt werden. Die Zusammenfassung der Eigenschaften von ETGL mit 20% Wasserzugabe ist in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Eigenschaften von ETGL mit 20% Wasserzugabe

Schüttdichte (g / cm ³)	1,69-1,86
Biegefestigkeit (MPa), 28d	0,15-0,30
Druckfestigkeit (MPa), 28d	2,50-6,0
Trockenschwindmaß (%), 56d	0,39-0,65
Kapillare Wasseraufnahme	bei hohem Trassgehalt niedriger
Abbindezeit (h)	0,28-14,75
Wärmeleitfähigkeit	ca. 1,16

Diskussionen (Kapitel 5):

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Festigkeit und Durabilität von Lehm mit Trass, Gips und Kalk (ETGL) viermal höher ist als die von Rohlehm. Wie die Literaturrecherche der Zementstabilisierung gezeigt hat, sollte der Zementzusatz zur Lehmstabilisierung zwischen 5 und 10% liegen. Ein mit 5-10% Zement stabilisierter Lehm zeigt eine Druckfestigkeit von 4-8 MPa. Mit der ETGL-Mischung kann jedoch eine Druckfestigkeit von 8,6 MPa erreicht werden. Die Studie von Lopez et al. (2011) ist für die Einordnung der Ergebnisse am relevantesten. In dieser Studie wurde eine Druckfestigkeit von 1,75 MPa mit der Kombination Flugasche (Puzzolan) + Gips + Kalk erreicht, was deutlich niedriger ist als die Ergebnisse von ETGL. Darüber hinaus liegt die mit der TGL-Stabilisierung erzielte Druckfestigkeit deutlich über den Ergebnissen von 1,7-4 MPa von Studien, die auf der Stabilisierung von Gips + Kalk basieren. Der wesentliche Vorteil gegenüber den vorherigen Studien besteht darin, dass die TGL-

Stabilisierung mit 2% Gips und 2,5% Kalk nur 1,9 kg CO₂ verursacht und das 71,3% weniger ist als zementstabilisierter Lehm mit gleicher Druckfestigkeit.

Das Schwinden von ETGL ist 80% geringer als das von Rohlehm, jedoch dreimal höher als das Schwinden von normalfestem Beton und sollte daher weiter verbessert werden. Die Endhärtung von ETGL mit 8,6 MPa Druckfestigkeit wird nach ca. 15 Stunden erreicht. Im Vergleich dazu ist diese bei Gips+Kalkstabilisierungen nach ca. 8-20 Minuten und bei Zement nach 3-10 Stunden erreicht. Dies macht ETGL für Transport und Gießen vorteilhaft. Es gibt keine vergleichbaren Testdaten für bauphysikalische Eigenschaften, einschließlich Tauchprüfung, Frost-Tau-Zyklus oder verzögertem Ettringit-Test.

Fazit und Ausblick:

Die in dieser Studie entwickelte Methode ermöglicht die Stabilisierung des Lehms mit den vernakulären Bindemitteln Trass, Gips und Kalk (TGL). Die Lehmstabilisierung durch Verwendung von TGL verbessert die Festigkeit und Durabilität von rohem Lehm erheblich. ETGL ist wasserunlöslich und kann den Frost-Tau-Zyklen standhalten. Somit wurden die beiden kritischsten Nachteile von rohem Lehm, geringe Festigkeit und geringe Wasserstabilität überwunden. Darüber hinaus konnte mit der TGL-Stabilisierung eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um mindestens 72% erreicht werden. Die entwickelte Mischung eignet sich als erste ihrer Art zur Herstellung von stabilisierten Lehmbauplatten. Ein solches Paneel ist nun praktisch umsetzbar und könnte in Lehmbaunormen im Allgemeinen und im Besonderen in die DIN 18948 integriert werden, die sich auf Lehmbauplatten bezieht und 2018 veröffentlicht wurde. Die trockene ETGL-Mischung mit verbesserter Festigkeit und Durabilität ermöglicht nicht nur die Herstellung von stabilisierten Paneelen, sondern auch weiteren ungebrannten Baumaterialien. Schließlich werden die Ergebnisse dieser Studie einen neuen Weg zur Lehmstabilisierung eröffnen und die Implementierung dieses Materials in der konventionellen Bauindustrie ermöglichen.

Thesen

1. Der als Baumaterial verwendete Lehm wird aufgrund einiger Nachteile wie geringe Wasserstabilität und mäßige Festigkeit stabilisiert.
2. Zement ist heutzutage der am meisten verwendete und weitestgehend standardisierte Zusatzstoff bei der Lehmstabilisierung, da er die Festigkeit und Durabilität von Lehm verbessert.
3. Die Herstellung von Zement verursacht hohe CO₂-Emissionen. Die Verwendung von Zement als Zusatzstoff verringert somit die ökologischen Vorteile des Lehms.
4. Die Kombination aus Kalk, Puzzolan und Gips kann Zement zur Lehmstabilisierung ersetzen. Es wurden jedoch nur wenige Studien mit künstlichem Puzzolan durchgeführt. Künstliches Puzzolan trägt indirekt zu CO₂-Emissionen bei und verbessert die Eigenschaften des Lehms nicht immer effizient, weshalb eine Optimierung der Zusatzstoffkombination nötig ist.
5. In den Studien werden oft örtlich gewonnene und expansive Lehme verwendet. Jedoch eignet sich nicht jeder Lehm als Baumaterial. Daher sollen solche Lehme zuerst klassifiziert und identifiziert werden, was allerdings zeitaufwändig ist.
6. Der industrielle Lehm ermöglicht es, die Notwendigkeit für Bodenaushub-, Klassifizierungs- sowie Bodeneignungstests zu vermeiden und verhindert somit den Zeitaufwand.
7. Trass, der auf dem Markt erhältlich ist, wird als natürliches und herkömmliches Puzzolan klassifiziert und eignet sich somit sehr gut als Ersatz für künstliches Puzzolan als Zusatzstoff.
8. Trass, Gips und Kalk als Zusatzstoffkombination steigert die Festigkeit und Durabilität von Lehm bemerkenswert und eignet sich somit hervorragend als Ersatz von Zement zur Lehmstabilisierung.
9. Die Trass-, Gips- und Kalkkombination reduziert die CO₂-Emissionen im Vergleich zu Zement um 72% und bietet dadurch die Möglichkeit den Lehm umweltfreundlicher zu stabilisieren als zementstabilisierter Lehm mit gleicher Druckfestigkeit.
10. Die trockene Lehm+Trass+Gips+Kalk-Mischung mit verbesserter Festigkeit und Durabilität ermöglicht nicht nur die Herstellung von stabilisierten Lehmpaneelen, sondern auch die Herstellung weiterer ungebrannter und stabilisierter Baumaterialien.