#### Jeanette Gasparini & Klaus Rückert

Lerhstuhl Tragswerksentwurf und -konstruktion, TU Berlin, D

## Tragfähige Konstruktion massiver Lehmstrukturen in Erdbebenregionen

Aus ökonomischen und traditionellen Gründen werden auch in stark seismischen Zonen massive Lehmsteinhäuser gebaut und genutzt. Die Bauweise ist dem Land angepasst und es werden vorwiegend Materialien verbaut, die mit geringen finanziellen Mitteln vor Ort zu erwerben sind. Dass diese Häuser einem Wohnkomfort nach mitteleuropäischen Maßstäben in klimatischer und hygienischer Hinsicht nicht entsprechen, wird in Kauf genommen. Dass diese Häuser durch ihren Einsturz bei einem Erdbeben Menschenleben gefährden und zu humanitären Katastrophen führen, ist nicht vertretbar.

Das Baumaterial Lehm ist schwer (16-18kN/m³), nicht duktil und hat geringe Festigkeiten. Diese Materialeigenschaften erweisen sich im Falle eines Erdbebens als ungünstig. Bei Massenbeschleunigungen aus Erdbeben induziert das Gewicht der massiven Lehmmauern und des Daches entsprechend hohe Lasten. Diese Lasten müssen über die Konstruktion in den Baugrund abgetragen werden. Die geringe Zugfestigkeit von Lehmstrukturen ( $f_t = 0,2-0,6 \text{ N/mm}^2$ ) und das nicht duktile Materialverhalten führt bei Zugbruch zu unmittelbarem Tragfähigkeitsverlust und damit rasch zum Einsturz der Gebäude. Die Weichheit des Materials Lehm (E = 250-1000 N/mm<sup>2</sup>) bewirkt, dass sehr kompakte eingeschossige Strukturen ohne große Öffnungen durch ein Erdbeben stärker angeregt werden als vergleichbare Strukturen aus Stein (E > 10000 N/mm²). Zum Beispiel liegt die bemessungsrelevante Eigenperiode eines traditionell errichteten weicheren Lehmhauses bei 0,23 s [1], die eines Steinhauses bei 0,07 s¹. Bei Lastannahme nach Normspektrum (EC8) sind bei einer Periode von 0,23s in Abhängigkeit vom Baugrund 45% bis 67% höhere Kräfte bezogen auf die Grundbeschleunigung abzutragen als bei einer ersten Eigenperiode von 0,07 s².

Seit den 80er Jahren verfolgt die Wissenschaft das Ziel, Lehmsteingebäude tragfähiger zu konstruieren. Der Einsatz von Bewehrung aus Bambus, das Vorspannen der Mauern mit Stahlseilen, das Einfassen alter Lehmmauern in Stahlbetonlagen und die Herstellung von stabilisierten Lehmsteinen in Strukturen aus umfasstem Mauerwerk sind wirksame Verfahren zur Verbesserung der Tragfähigkeit.

Das Vorspannen und das Einfassen der Mauern kommen bei der Verstärkung von vorhandenen Strukturen und der Konservierung von historisch bedeutenden Konstruktionen zum Einsatz [2] [3].

Der Einsatz der Bewehrung aus Bambus wurde für Peru entwickelt und mit Rütteltischuntersuchungen geprüft [4]. In Regionen in denen Bambus als Baumaterial natürlich vorhanden ist, ist die Bewehrung von Neubauten mit Bambus durch die kostengünstige Materialbeschaffung kaum zu übertreffen.

Die Konstruktion von umfassten Mauerwerkstrukturen mit stabilisierten Lehmsteinen wird von verschiedenen Hilfsorganisationen propagiert [5] [6] [7]. Bei diesem Verfahren wird der Grundstoff Lehm zur Herstellung der Steine mit 5%-10% Anteilen an Zement stabilisiert. Die Steine werden in einem Pressverfahren erstellt. Die zu erwartenden Festigkeiten dieser Steine sind ähnlich gering wie die von Lehmsteinen. Gegenüber Steinen aus Lehm weist der stabilisierte Stein jedoch keine plastische Verformbarkeit bei Lastaufnahme auf und das Einnisten von Insekten wird wirksam vermieden [8]. Darüber hinaus sind die so gewonnenen Steine wasserfest. Diese Steine sind jedoch nicht wiederverwendbar. Beim Herstellen der Mauer werden die stabilisierten Steine mit Zementmörtel vermauert und mit Zugelementen aus Betonstahl umfasst.

Auch für diese Lösung wird weiterhin die Frage nach der Optimierung der Konstruktion verfolgt. Die Einsatzstoffe sind häufig knapp und damit die Einsatzmengen an Betonstahl und Zement zu optimieren. Darüber hinaus ist zu prüfen, welche Tragfähigkeit mit einer solchen Konstruktion unter Verfolgung der traditionellen Bautechniken erreicht werden kann.

Bei der Untersuchung von Lehmstrukturen mit einer computergestützten dynamischen Analyse [1] wurden mittels FEM Lehmsteinhäuser mit verschiedenen Abmessungen nachgebildet und die Tragfähigkeit im Erdbebenfall ermittelt. Die Feststellung, dass durch die Limitierung der absoluten Abmessungen und durch das Einfügen einiger einfacher konstruktiver Elemente ein tragfähiges Lehmsteinhaus erstellt werden konnte, führte zu folgenden konstruktiven Regeln mit beispielhafter Ausführung von Musterhäusern:

 Der Gebäudegrundriss ist gedrungen und symmetrisch zu entwerfen.

### Jeanette Gasparini & Klaus Rückert

Chair for Structural Design and Construction, TU Berlin, D

# Stable construction methods for solid clay structures in earthquake regions

For reasons of economics and tradition, clay block houses are also built and used in heavily seismic zones. The construction method is adapted to the land and the materials used are mainly those that can be obtained locally at low cost. It is accepted that these houses do not have the standard of comfort expected in central Europe with regard to climate and hygiene. It is quite unacceptable, however, that these houses can cost lives when they collapse in an earthquake and lead to humanitarian catastrophes.

The building material clay is heavy (16-18kN/m³), not ductile and of low strength. These characteristics of the material are unfavourable in earthquake situations. Mass acceleration induced by earthquakes subjects the dead weight of the clay walls and roof to correspondingly high loads. These loads must be transferred through the structure to the ground. The low tensile strength of clay structures (ft = 0.2-0.6 N/mm<sup>2</sup>) and the nonductile material behavior leads, through tensile failure, to immediate loss of integrity and thus to the sudden collapse of the building. The softness of clay (E = 250-1000 N/mm<sup>2</sup>) means that very compact single-story structures without large openings are more acutely agitated by earthquake activity than structures built of stone (E > 10000 N/mm<sup>2</sup>). For example, measurement of the relevant natural period of vibrations of a clay house is in the region of 0.23 s [1], the same for a stone house is around 0.07 s1. With an assumed load based on norm spectrum (EC8), the forces that have to be dispersed with a period of 0.23s, depending on the substratum, are 45% to 67% higher than with an initial vibration period of 0,07 s<sup>2</sup>.

Since the 1980s, science has pursued the aim to make clay blockwork buildings more stable. The use of reinforcement made of bamboo, embracing walls with steel cables, the inclusion of reinforced concrete courses into old clay walls and the production of stabilised clay blocks erected within enclosing masonry structures are effective methods of improving stability.

The pre-stressing and framing of walls are techniques used to strengthen existing structures and conserving buildings of historic importance [2] [3].

The use of bamboo reinforcement was developed in Peru and tested in shaking investigations [4]. In regions where bamboo

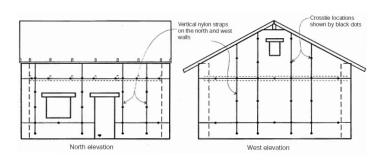
as a building material is naturally available, its use for the reinforcement of new buildings can hardly be bettered, because of low cost for which it can be procured.

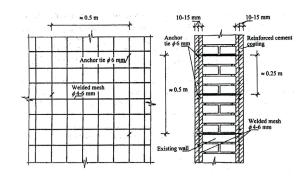
The construction of enclosed wall structures of stabilised clay blocks is propagated by several relief organizations [5] [6] [7]. With these methods, the basic clay material used for producing the blocks is stabilised by the addition of 5%-10% cement. The blocks are compression formed. The expected strength of these blocks is similar to that of all-clay blocks. Compared with all-clay blocks, the stabilized blocks possess no ductile distortion characteristics under load and the nesting of insects is effectively avoided. [8] In addition, blocks produced in this way are waterresistant. They cannot, however, be reused. When constructing walls, the stabilized blocks are laid in cement mortar and embraced in tensile elements of reinforcing steel.

Even for this solution the search continues for ways of optimising the construction method. The added materials are often scarce and therefore ways of optimising the quantities of reinforcement steel and cement are being sought. In addition, it must be examined, what load bearing capacity can be achieved with this type of construction using traditional building techniques.

While investigating clay structures with a computer supported dynamic analysis [1], using FEM, clay block houses of varying dimensions were simulated and their stability in earthquake scenarios ascertained. The observation that, through the limiting of the absolute dimensions and through the insertion some simple constructive elements, a clay block house could be erected, led to the following constructive rules with exemplary realisation of sample houses.

- The design of the building plan should be stout and symmetrical.
- In regions of high seismic activity, the upper edge of the wall should be set at 2.5 m.
- The clay walls should be held in position by a stiff slab. Reinforced concrete or a timber ring beam would fulfill this role.
- The roof should be light, shallow and well stiffened. Roofs that are steep, high and covered with heavy materials should be avoided. Gables should be closed up with light materials.
- The wall openings should be towards the centre of the wall and only one per wall.





- a Seilvorspannung [2]
  Pre-stressing with cables [2]:
- In Regionen hoher Seismizität sollte der obere Wandabschluss bei 2,5 m liegen.
- Die Lehmwände müssen an ihrem Kopf durch eine steife Scheibe gehalten werden. Stahlbeton oder Holzringbalken können bei entsprechender Ausführung diesen Zweck erfüllen.
- Das Dach sollte leicht, flach und gut ausgesteift ausgeführt werden. Steile, hohe und mit schweren Materialien gedeckte Dächer sind zu vermeiden. Giebel sind mit leichten Materialien zu schließen.
- Die Wandöffnungen sind in der Wandmitte anzuordnen und auf eine Öffnung pro Wand zu beschränken.
- Die Lehmwände sind auf durchgehenden Streifenfundamenten zu gründen, die vorzugsweise einen Rost ausbilden. Einzelfundamente sind zu vermeiden. Die Gründung muss auf gewachsenem Boden erfolgen. Hanglagen sind zu vermeiden.
- Die Schlankheit der Wand ist mit h/t≤5 zu begrenzen. Die Wandlänge*l* ist auf das 10-fache der Wanddicke*t* zu begrenzen.
- Anbauten, wie zum Beispiel große Vordächer, sind zu vermeiden und vom eigentlichen Baukörper mit einem Abstand von 20 cm zu entkoppeln.
- Das Lehmsteinmauerwerk sollte die Mindestfestigkeiten eines einfachen Lehmsteinmauerwerks aufweisen. Die Druckfestigkeit ist mit mindestens 1,5 N/mm² und die Biegefestigkeit mit 0,15 N/mm² nachzuweisen.
- Bewehrungen, insbesondere horizontale, erhöhen die Duktilität und Tragfähigkeit des Mauerwerks. Sicherzustellen ist die ausreichende Verbundwirkung zwischen Bewehrung und Lehm [9].

Die maximalen Abmessungen von erdbebenwiderstandfähigen Lehmhäusern in einfacher Konstruktionsweise sind eng gesteckt. Die meisten errichteten Lehmsteinhäuser entsprechen diesen Anforderungen nicht [10]. Trifft ein bemessungsrelevantes Beben eine Stadt aus traditionell errichteten Lehmsteinhäusern, wie Bam im Iran im Jahr 2003, ist mit hohen Mortalitätsquoten zu rechnen.

Bei Evaluierung, Wiederaufbau und Instandsetzung in diesen Gebieten bedarf es Behörden, Architekten und Ingenieuren, die sich ihrer Verantwortung bewusst sind. Nur so werden die notwendigen Gesetze erlassen und in die Praxis umgesetzt, die den regionalen Bedürfnissen entsprechen und zugleich das Leben der Menschen dauerhaft schützen.

1 Erdbebensichere Konstruktionen in Lehm [2], [3], [4], [5], [6], [7]
Earthquake proof construction methods in clay [2], [3], [4], [5], [6], [7]

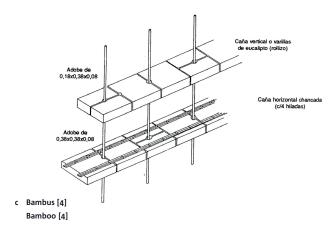
b Prinzip Einfassen nach [11]Enclosure principle, as [11]

Das Institut Tragwerksentwurf und -konstruktion, TEK an der Technische Universität Berlin, hat für Erdbebengebiete wie Mexiko, Ecuador und Afghanistan in Projekten vor Ort erfolgreiche Bauweisen entwickelt und in der Praxis bis hin zur Bauausführung vor Ort umgesetzt. Dieses Wissen des Fachbereichs trifft auf eine hohe Nachfrage in der Praxis und daher wird dieser Forschungsschwerpunkt langfristig einen festen Platz in der Forschung und Lehre des Instituts einnehmen.

- 1 Bachmann: 0,05 s, Die Struktur des herkömmlichen Lehmhauses und des einfachen Steinhauses sind identisch, 0,07 s ergibt sich aus der FEM-Berechnung der Struktur eines Hauses von 2,4×4×8 m mit 0,4 m starken Wänden nach [1].
- 2 45% bei steifem Boden, 67% bei weichem Boden mit der Annahme, dass Lehm nicht duktil ist und ein Verhaltensfaktor von q = 1,0 angesetzt wird

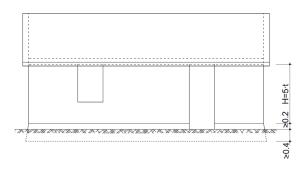
#### Literatur

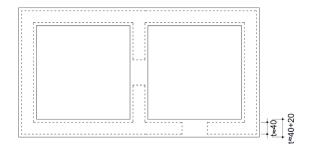
- Studie zum Tragverhalten von Lehmsteinbauten unter Erdbebenlasten;
   Jeanette Gasparini, Klaus Rückert; Moderner Lehmbau 2003
- [2] Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures- Final Report of the Getty Seismic Adobe Projekt; E. Leroy Tolles, Edna E. Kimbro, Frederick A. Webster, William s. Ginell; The Getty Conservation Institute, Los Angeles. 2000
- [3] Manual technico para el reforzamiento de las viviendas de adobe existentes en la costa y la sierra; Zegarra, Luis; San Bartolome, Angel; Quiun, Daniel; Giesecke, Alberto; Pontificia Universidad Catolica del Peru (PUCP), GTZ, Ceresis, 1997
- [4] Ensayos de simulacion sismica de viviendas de adobe; Ottazzi P., Gianfranco; Yep L., Juan F.; Blondet S., Marcial; Villa-Garcia, Gladys; Ginocchio C., J.F.; Pontificia Universidad Catolica del Peru (PUCP), 1989 Peru
- [5] Compressed earth blocks: Manual of production; Vincent Rigassi; Craterre-EAG, GATE-GTZ-BASIN 1995
- [6] Compressed Earth Blocks: Manual of design and construction; H. Guillaud , T. Joffroy, P. Odul; Craterre-EAG, GATE-GTZ-BASIN 1995
- [7] Protection of Educational Buildings against Earthquakes, A manual for designers and builders; Arya, A.S.; Published by the Unesco Principal Regional Office for Asia and the Pacific, Bankok, Thailand, Educational 1987
- [8] z.B. Chargas Disease http://www.cdc.gov/ncidod/dpd/parasites/chagasdisease/factsht\_chagas\_disease.htm
- [9] Bewehrung aus Sisalstricken im Lehmsteinbau Untersuchung des Verbundverhaltens; Jeanette Gasparini, Klaus Rückert, Thomas Stiller; Moderner Lehmbau 2003, Frauenhofer IRB Verlag 2003, Herausgeber P. Steingass, die Wille GmbH
- [10] Lehmbautradition im mexikanischen Hochland und deren baukonstruktive Weiterentwicklung; Jeanette Gasparini, Klaus Rückert; Moderner Lehmbau 2002, Frauenhofer IRB Verlag 2002, Herausgeber P. Steingass, KirchBauhof qGmbH
- [11] Earthquake-resistant design of masonry buildings; Miha Tomazevic; Imperial College Press, 1999

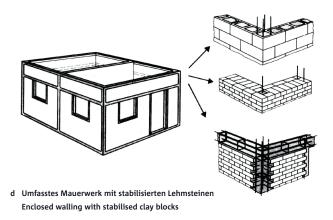


- The clay walls should be constructed on continuous strip foundations, preferably as a grid. Point foundations should be avoided. Foundations should be laid on consolidated ground. Sloping sites should be avoided.
- The slenderness of the wall should not exceed h/d ≤ 5. The length of the wall should not exceed 10 times its thickness.
- Extensions such as large canopies are best avoided or separated from the main building by a distance of 20 cm.
- The clay blockwork should have a minimum firmness equivalent to clay brickwork. The compressive strength should be at least 1.5 N/mm² und have a torsional stiffness of 0.15 N/mm².
- Reinforcement, particular horizontal, increases the ductile properties and supporting performance of the wall. It is important to ensure that there is sufficient composite integrity between reinforcement and clay [9].

The maximum dimensions for earthquake resistant clay-built houses of simple construction are kept modest. Most clay houses that are built fail to fulfill these criteria [10]. Should a town consisting of traditional clay block houses be hit by a measurable quake, such as Bam in Iran in 2003, one must reckon with a high mortality rate.



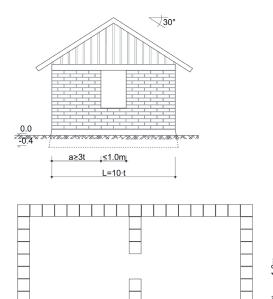




When evaluating, rebuilding and renovating, authorities, architects and engineers must be aware of their responsibilities. Only then will the necessary regulations be imposed and implemented in practice that are appropriate to regional needs and, at the same time, permanently protect the lives of people.

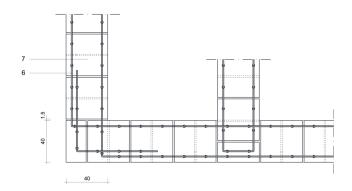
The Institute of Structural Design and Construction, TEK, at the Technical University, Berlin, has developed successful methods of construction for earthquake zones such as Mexico, Ecuador and Afghanistan in local projects, right up to running projects on site. This experience in this specialised subject has seen great demand in practice and this area of research has therefore gained a permanent place in the research and teaching of the institute.

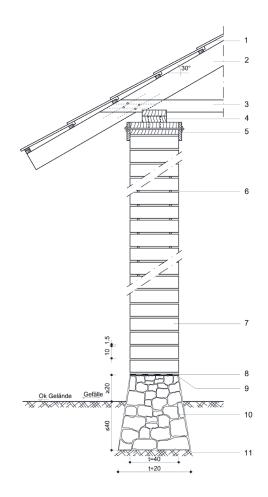
- 1 Bachmann: 0.05s, the structures of traditional clay-built houses and of simple stone houses are identical, 0.07s is the result of the FEM-calculation of a 2.4×4×8 m house with 0.4 m thick walls according to [1].
- 2 45% on firm ground, 67% on soft ground, assuming that clay is not ductile and based on a behavior factor of q = 1,0.





Limitation of Slenderness - Plan - Elevations - Foundations





- 1 Zementdachsteine
- 2 Sparren des Dreiecksbinders
- 3 Zugband
- 4 Ringbalken aus Holz
- 5 Seitliche Bretter
- 6 Lehmmörtelfuge mit Sisalstrickbewehrung
- 7 Lehmstein
- 8 Feuchtigkeitssperre
- 9 Raue Oberfläche
- 10 Natursteinfundament in Zementmörtel
- 11 Gewachsener Boden
- 12 Holzstein, feste Verbindung
- 13 Holzfenster
- 14 Holzstein Langlochverbindung
- 15 Fuge mind.1cm, Luft
- 16 Verzahnungsblock aus Holz mit Gewindestange

Cement roof tiles

Truss rafters

Structural tie

Timber ring beam
Timber siding boards

Earth mortar joint with

sisal rope reinforcement

Adobe blocks

Vapour barrier

Rough surface

Stone rubble foundation in cement mortar

Soil

Wood block for firm connection

Wood-frame windows

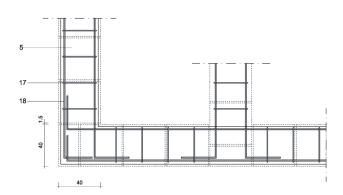
Wood block slotted

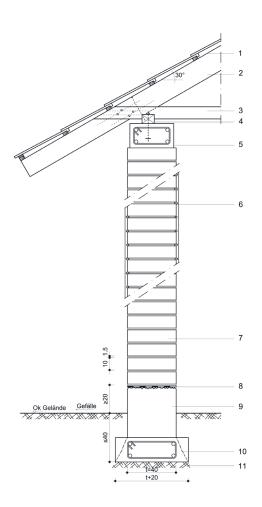
hole connector

Gap, min. 1cm, ventilated

Connector block made of wood with threaded rod

3 Ausführungsbeispiele Implementation examples





2 Sparren des Dreieckbinders Truss rafters 3 Zugband Structural tie Timber sole plate 4 Schwelle aus Holz Ringbalken aus Stahlbeton RC ring beam Gebrochene Steine als Put-Gravel as plaster base 7 Lehmstein Adobe blocks 8 Feuchtigkeitssperre Vapour barrier Betonfundament mit gebro-RC foundation with rubble chenen Steinen 10 Bewehrungskorb Steel reinforcement cage 11 Gewachsener Boden Soil 12 Fuge mind.1 cm, Luft Gap, min. 1 cm, ventilated 13 Tür Door 14 Ziegel, Langloch-verbindung Brick with slotted hole connector 15 Ziegel und feste Verbindung Brick for firm connection

1 Zementdachsteine

Cement roof tiles

