

# Erdbebensichere Häuser aus Lehm

Gernot Minke

In den erdbebengefährdeten Gebieten Lateinamerikas und Asiens hat der Baustoff Lehm an Ansehen verloren, vor allem deshalb, weil die modernen Lehmhäuser in ländlichen Gebieten den Erdbeben nicht widerstehen konnten. In einigen Andengebieten ist das Bauen mit Lehmsteinen (adobes) heute verboten, weil Lehm als nicht erdbebensicher angesehen wird. Trotz Verbot bauen beispielsweise in der Umgebung von Mendoza, Argentinien, 80 % der Bevölkerung ihre Hauswände mit Lehmsteinen, da sie sich keine teuren Stahlbetonskelettkonstruktionen leisten können. Es liegt aber nicht am Baustoff Lehm, dass die Häuser beim Erdbeben einstürzen, sondern an der falschen Bauweise. Denn es gibt beispielsweise in Mendoza, Argentinien, alte Häuser mit dicken massiven Lehmwänden, die alle Erdbeben des 18. und 19. Jahrhunderts ohne Schäden überstanden, während die neueren Bauten aus Lehmsteinen rechts und links davon zusammenfielen. Aber auch die Ziegelbauten stürzten ein. Bemerkenswert ist das Ergebnis einer Erhebung, die von der Regierung El Salvadors nach einem Erdbeben 2001 durchgeführt wurde, das besagt, dass Lehmhäuser nicht stärker beschädigt waren als Ziegelhäuser.

Die im folgenden dargestellten Lösungen beziehen sich auf eingeschossige Häuser, wie sie in ländlichen Regionen oder Stadträndern gebaut werden und gehen davon aus, dass sie bei den ortsüblichen Erdstößen keinen strukturellen Schaden erleiden, also auch nicht partiell einstürzen. Geringe Schäden, wie kleinere Risse oder Abplatzen von Putz, die von den Bewohnern leicht behoben werden können, werden als akzeptabel angesehen.

## Zur Grundrissform

Die Grundrissform hat einen großen Einfluss auf die Erdbebensicherheit des Gebäudes: Je kompakter der Grundriss, umso stabiler das Haus. Ein quadratischer Grundriss ergibt mehr Stabilität als ein rechteckiger, ein runder mehr als ein quadratischer (Abb. 1a). Untersuchungen, die im Rahmen einer Doktorarbeit am Forschungslabor für Experimentelles Bauen, Universität Kassel, durchgeführt wurden, zeigten, dass ein Modellhaus aus Stampflehm mit quadratischem Grundriss nach drei simulierten Erdstößen bereits teilweise einfiel (Abb. 2a), während das entsprechende Modell mit rundem Querschnitt nach 3 Stößen erst kleine Risse zeigte (Abb. 2b) und selbst 6 Stößen noch stand hielt ohne einzustürzen.

Abgewinkelte Grundrisse sind nicht empfehlenswert, die Teile sollten getrennt werden und durch ein leichtes und flexibles Bindeglied verbunden werden (Abb. 1b).

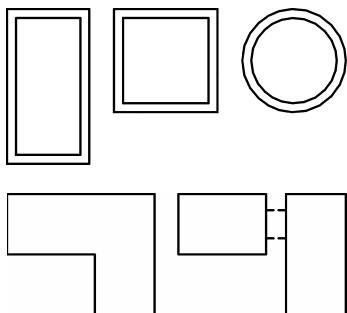


Abb. 1a, 1b



Abb. 2a, 2b

## Typische Erdbebenschäden

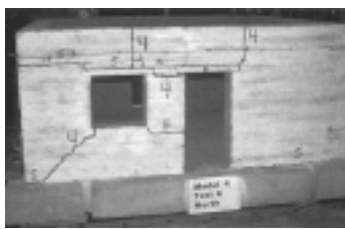


Abb. 3a, 3b

Die Abb. 3 zeigt typische Rissbildungen infolge simulierter Erdstöße an Hausmodellen mit Lehmsteinwänden. Durch die Horizontalstöße entstehen in den Wandscheiben Schubspannungen, die an Fenster- und Türecken Diagonalrisse auslösen (Abb. 3a). Nicht ausreichend eingebundene Stürze und zu schmale Wandstücke können zum Einsturz der Wand führen (Abb. 3b). In der Abb. 4 sind die 10 häufigsten Fehler dargestellt, die bei Lehmsteinhäusern auftreten und zum Einstürzen der Häuser beim Erdbeben führen können.

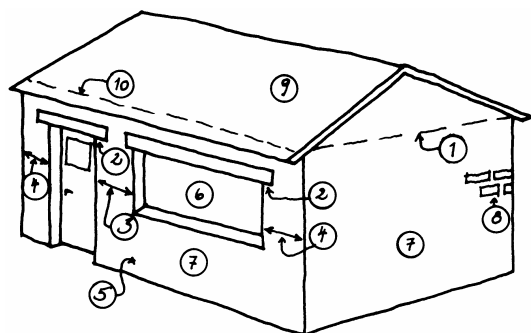


Abb. 4: Zehn typische Fehler

- 1: Ringbalken fehlt
- 2: Stürze greifen nicht weit genug ins Mauerwerk ein
- 3: Die Wand zwischen Tür und Fenster ist nicht breit genug
- 4: Die Wand zwischen Tür und Hausecke ist nicht breit genug
- 5: Sockel fehlt
- 6: Das Fenster ist zu breit
- 7: Die Wand ist im Verhältnis zur Länge zu dünn
- 8: Die Festigkeit des Lehmörtels ist zu gering, die Fugen sind zu dick und nicht vollfugig gemauert
- 9: Das Dach ist zu schwer
- 10: Die Verbindung zwischen Dach und Wand ist nicht stabil genug

## Allgemeine konstruktive Aspekte

Häuser sind insbesondere durch die horizontalen Stöße des Erdbebens gefährdet. (Die vertikalen Bewegungen sind sehr viel weniger stark.) Die Gefahr für die Menschen besteht darin, dass die Wände dabei nach außen kippen und das Dach einstürzt. Das Umfallen der Wände kann durch entsprechend starke Eckausbildung sowie durch ausreichende Fixierung an Fundament und Ringbalken verhindert werden. Um die Schubkräfte und die Querkräfte in der Wand abzuleiten, muss diese ausreichend dick bzw. zusätzlich stabilisiert sein. Dabei ist zu beachten, dass Fenster- und Türöffnungen deren Stabilität schwächen.

Bei den Horizontalkräften müssen zwei Arten unterschieden werden: Kräfte, die parallel zur Wandausbildung wirken und Scherkräfte in der Wand erzeugen und Kräfte, die quer zur Wand wirken und eine Biegebeanspruchung ergeben (Kräfte, die in einem Winkel zur Wand wirken, lassen sich in die beiden vorher genannten Kräfte zerlegen). Da Lehmwände nur geringe Biegebeanspruchungen aufnehmen können, müssen sie entweder sehr dick oder durch Stützpfeiler, Querwände oder innere Stabilisierungselemente versteift werden. Die parallel zur Wand wirkenden Kräfte sind weniger gefährlich, können aber bei Fensteröffnungen oder schlecht vermauerten Lehmsteinen die typischen Diagonalrisse erzeugen (Abb. 2a). Ferner ist zu beachten, dass das Schwingungsverhalten des Daches im Erdbeben anders

ist als das der Wände und dass das Dach sich deshalb häufig von der Wand löst. Deshalb besteht die sinnvollste Lösung darin, das Dach auf separate Stützen getrennt von der Wand aufzustellen, wie im folgenden näher erläutert wird.

Ein sehr wesentliche Aspekt der Erdbebensicherheit ist die Verformbarkeit (Duktilität) des Gebäudes. Es gibt 3 grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten ein eingeschossiges Haus erdbebensicher zu bauen:

1. Die Wände sind so dick und stabil, dass im Erdbeben keinerlei Verformungen auftreten können. Das Dach ist ebenfalls verformungssteif und fest mit den Wänden verbunden.

2. Die Wände sind flexibel genug, um die kinetische Energie der Erdstöße durch Verformung zu absorbieren. Dabei muss ein Ringbalken vorhanden sein, der Biegebeanspruchungen aufnehmen kann und der mit Wand und Dach fest verbunden ist.

3. Die Wand ist wie unter 2. beschrieben ausgebildet, das Dach ruht aber nicht auf der Wand, sondern auf getrennten Stützen innerhalb oder außerhalb der Wand, so dass sich Dach und Wand unabhängig voneinander bewegen können.

Fall 1 kann beispielsweise durch dicke Stampflehmwände erreicht werden (wie historische Beispiele belegen) oder durch Stahlbetonskelett-Konstruktionen mit biegesteifen Eckausbildungen und Ausmauerungen. Holzkonstruktionen mit Diagonalaussteifungen können auch zu Fall 1 gerechnet werden. Dabei besteht aber die Gefahr, dass an den Ecken, wo die Diagonalaussteifungen ansetzen, so starke Kraftkonzentrationen auftreten, dass die Elemente versagen und einen Einsturz auslösen.

Die Systeme entsprechend Fall 2 und 3 können ohne Stahl und Stahlbeton errichtet werden und sind in der Regel wesentlich wirtschaftlicher. Leichte Holzgeflechtwände mit Lehmbewurf (englisch: „wattle and daub“; spanisch: „bahareque“ oder „bareque“ oder „quincha“) zeigen eine hohe Verformbarkeit bzw. Flexibilität und damit eine große Erdbebensicherheit.

## Fenster und Türöffnungen

Fenster- und Türöffnungen schwächen die Stabilität der Wand. Deshalb sollten die in Abb. 5 dargestellten Abmessungen unbedingt eingehalten werden. Zusätzlich muss die richtige Ausbildung der Stürze beachtet werden. Diese müssen zumindest 40 cm in die Mauerwand hineinreichen, oder über die ganze Fassade verlaufen und dabei fest mit dem Mauerwerk verankert sein (beispielsweise durch senkrechte Anker). Am besten ist es, wenn kein Sturz vorhanden ist und der Ringbalken gleichzeitig die Funktion des Sturzes übernimmt (Abb. 6). Es sind stets je eine Tür in entgegengesetzten Wandflächen als Fluchtweg vorzusehen.

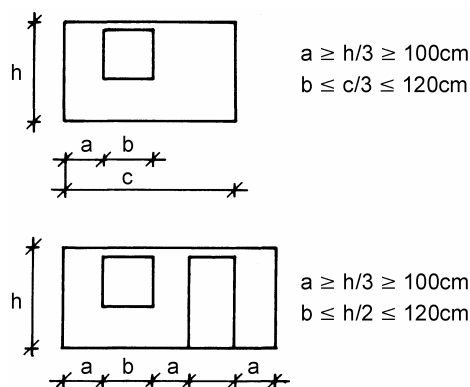


Abb. 5: Empfohlene Abmessungen



Abb. 6: Ausbildung von Stürzen

## Zur Dachausbildung

Dächer sollten so leicht wie möglich sein und sich verformen können, ohne dass Teile davon einstürzen. Ziegeldächer sind ungünstig und allenfalls akzeptabel, wenn eine stabile abgehängte Decke oder Unterkonstruktion vorhanden ist.

Da Giebel leicht einfallen und schwer zu stabilisieren sind, sind Dächer ohne Giebel, wie Pyramiden- oder Pultdächer, vorzuziehen. Bei Pultdächern ist darauf zu achten, dass der Ringbalken an zwei Seiten schräg (unter der Dachfläche) verlaufen muss. Kuppel- und Tonnengewölbe sind bedingt erdbebensicher, näheres dazu am Ende dieser Abhandlung.

## Zur Stabilisierung von Lehmsteinwänden

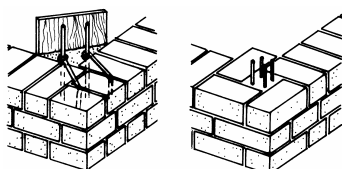


Abb. 7: Stabilisierung der Ecken

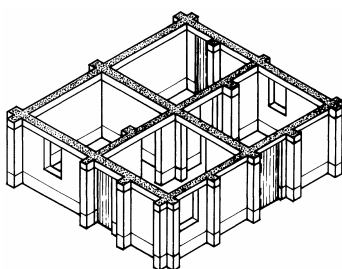


Abb. 8: Stabilisierung durch Versteifungsrippen

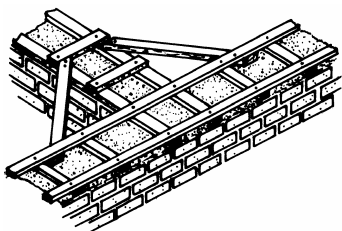
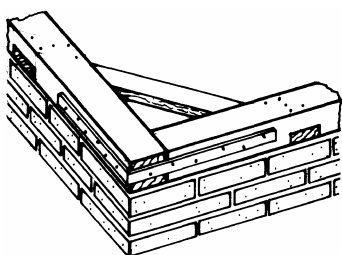


Abb. 9: Ringbalken aus Holz

Bei massiven Lehmsteinwänden sind die Ecken besonders gefährdet, da hier die Längskräfte der einen Wand Querkräfte in der abgewinkelten Wand erzeugen. Abb. 7 zeigt einfache Lösungen der Stabilisierung, Abb. 8 eine noch bessere Stabilisierung durch Versteifungsrippen, die sowohl an den Ecken als auch bei Zwischenwänden, Türöffnungen und bei sehr langen Wänden vorzusehen sind. Wichtig ist der Sockel, der als Spritzwasserschutz dient, und der Ringbalken (in diesem Falle aus Stahlbeton) der die Wände am Umkippen hindert.

Die Ringbalken können auch aus Holz gebildet werden, Abb. 9 zeigt zwei Lösungen. Wichtig ist in jedem Fall, dass Ringbalken und Mauerwerk kraftschlüssig miteinander verbunden sind. Bei einem Holzringbalken muss dieser über vertikale Verbindungselemente mit dem Mauerwerk verbunden werden, bei Stahlbetonringbalken müssen zumindest die Fugen der obersten Lehmsteinschicht bei Mauern offen bleiben, damit der Beton diese ausfüllen kann.

Aus Peru ist ein System bekannt, bei dem die Lehmsteine Löcher bzw. Ausbuchtungen aufweisen, in die Bambusstäbe gesteckt und mit dünnem Zementmörtel vergossen werden (Abb. 10).

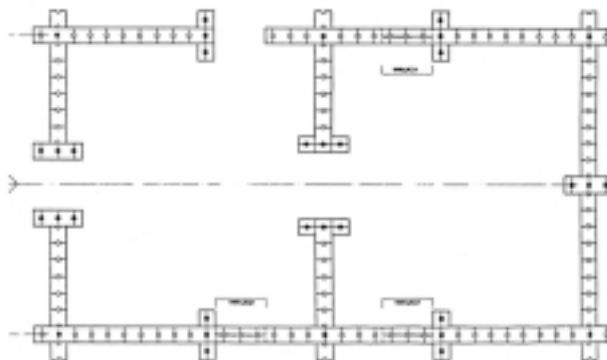


Abb. 10: System ININVI, Peru

## Durch Winkel stabilisierte Stampflehmwände

Eine einfache Methode erdbebenstabile Wände aus Stampflehm herzustellen besteht darin, winkelförmige Elemente zu verwenden, die allein durch ihre Formgebung weniger leicht umkippen (Abb. 11).

Die Länge der einzelnen Schenkel muss aber mindestens ein Drittel der Wandhöhe betragen, um die Scherkräfte in das Fundament ableiten zu können (Abb. 12).

Dabei ist auch zu beachten, dass bei Horizontalstößen an den Ecken Kraftkonzentrationen durch Biegebeanspruchung auftreten, die zum Aufplatzen der Ecke führen können. Deshalb ist es vorteilhaft, die Außenecke abzufasen und die Innenecke abzuwinkeln, wie in Abb. 13 dargestellt.

Die Abb. 14 zeigt einige Vorschläge für einfache Grundrisslösungen mit stabilisierten Stampflehmelementen.

Eine zusätzliche Stabilisierung kann durch innere vertikale Elemente aus Holz oder Bambus erzeugt werden. Wichtig dabei ist, dass diese am Ringbalken oben und an Sockel und Fundament unten kraftschlüssig eingebunden sind, vgl. Abb. 19.

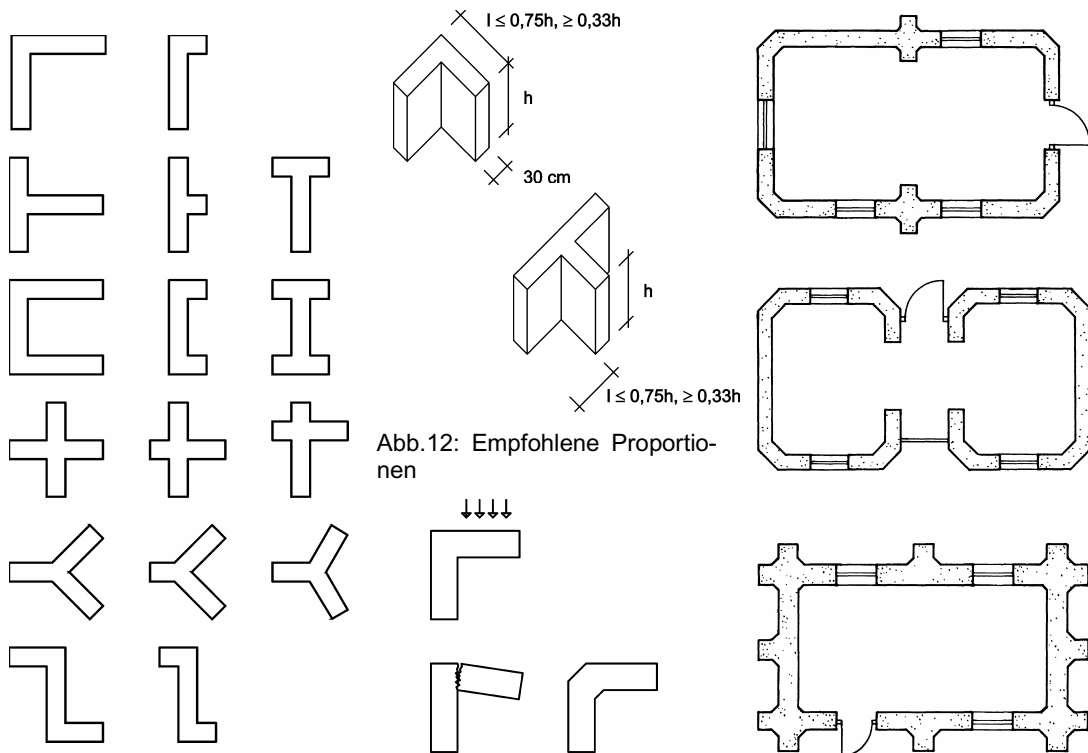


Abb. 11: Winkelförmige Stampflehmelemente

Abb. 13: Verbesserte Eckausbildung

Abb. 14: Grundrisslösungen mit stabilisierten Winklelementen

## Bambusarmierte Stampflehmwände

1978 wurde auf dem Experimentiergelände des Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) der Universität Kassel eine neuartige bambusarmierte elementierte Stampflehm-Bauweise bei einem Prototyp getestet und im selben Jahr bei einem Low-cost-housing-Projekt in Zusammenarbeit mit der Universität Francisco Morroquin und der CEMAT (Zentrum für angepasste Technologie) in Guatemala erfolgreich angewendet.

Im Gegensatz zu traditionellen Stampflehmtechniken, die mit horizontalen Taktverfahren arbeiten, werden dabei die 80 cm breiten Wandelemente kontinuierlich geschosshoch in einer speziellen T-förmigen Metallschalung gestampft (Abb. 15).

Die Lehmischung wird erdfeucht in 10 cm hohen Lagen eingefüllt und mit einfachen Stampfhölzern auf 60 – 70 % des Ausgangsvolumens verdichtet. Ist die Schalungsform gefüllt, so wird sie seitlich, dort wo die vordere und hintere Fläche mit Klappverschlüssen miteinander verbunden ist, geöffnet und die beiden Bleche nach oben abgezogen. Nachdem die Innenflächen gereinigt und eingefettet sind, kann die Schalung erneut verwendet werden.

Die Stabilität der einzelnen Wandelemente wird durch eine Armierung aus 4 vertikalen, etwa 2-3 cm dicken Bambusstäben und durch den T-förmigen Querschnitt gewährleistet. Die Standsicherheit ist durch die Befestigung der vertikalen Bambusstäbe unten im Sockel (der durch einen Bambusinganker stabilisiert ist) und oben an einen flexiblen Ringanker gegeben, vgl. Abb. 16.



Abb. 15

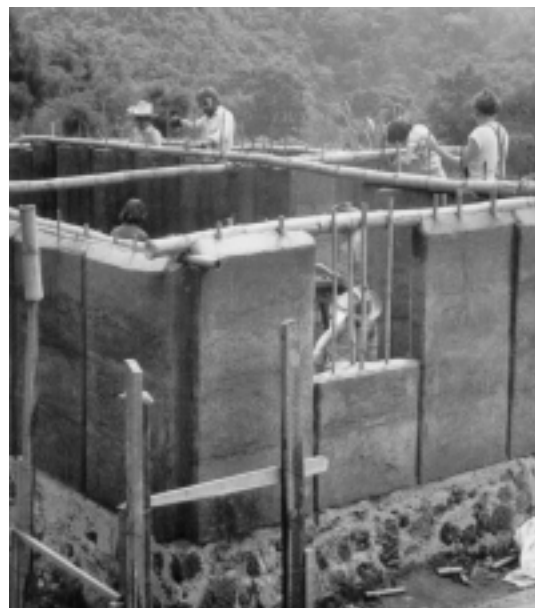


Abb. 16

Die entwickelte Schalung hat folgende Vorteile:

- durch den T-förmigen Querschnitt ist bei gleichem Lehmverbrauch die Bruchstabilität der Wand wesentlich höher als bei einer nicht profilierten Wand,
- durch die Begrenzung der Elementbreite auf 80 cm entstehen bei richtiger Lehmaufbereitung keine Schwindrisse während des Austrocknungsprozesses (sollten doch feine Haarrisse entstehen, so können diese mit einer Kelle leicht zugeedrückt werden),
- die Schalung lässt sich schnell abnehmen und neu aufbauen.

Das auf diese Art erstellte geschosshohe Wandelement mit T-förmigem Querschnitt ist vom Nachbarlement durch eine 2 cm breite Fuge getrennt, die später mit Lehm ausgefüllt wird. Diese Fuge dient als eine Art Sollbruchstelle und ermöglicht während eines Erdbebens eine Bewegung der einzelnen Wandelemente unabhängig voneinander. Die Wandelemente sind durch den T-förmigen Querschnitt und durch die vertikale Bambusbewehrung ausreichend stabil gegen entstehende Biegebeanspruchungen. Sie sind über die eingebauten vertikalen Bambusstäbe unten im Sockel verankert und oben an einem elastischen Ringbalken aus Bambus oder Holz befestigt (Abb. 17). Dadurch ist gewährleistet, dass die Wandelemente

untereinander flexibel verbunden sind und dass ein Umfallen einzelner Wandelemente verhindert wird.

Somit wurde zum ersten Mal eine massive Wandkonstruktion entwickelt, die eine ausreichende Duktilität (Verformbarkeit) aufweist und die in der Lage ist die kinetische Energie der Erdbebenstöße durch Formänderung abzubauen. Entscheidend für die Erdbebensicherheit dieser Konstruktion ist außerdem, dass das Dach auf Stützen ruht, die im Abstand von 50 cm von der Wand im Innern des Gebäudes stehen. Somit können sich Dach und Wand im Erdbeben unabhängig voneinander bewegen.

Bei einem weiteren Forschungsprojekt des FEB wurde im Jahr 2001 in Kooperation mit der Universidad de Santiago de Chile in Alhué, Chile, eine armierte Stampflehm-bauweise angewendet, bei der die Stabilisierung der Wände in erster Linie durch die winkelförmige Formgebung ihrer Elemente erfolgt, (Abb. 18),

zusätzlich enthalten die 40 cm dicken Stampflehmwände eine vertikale Armierung durch 2-3 cm dicke Stäbe aus „colligue“ einem bambusähnlichen lokalen Material. Diese sind unten im ringförmigen Streifenfundament aus Zyklopenbeton und oben an einem leiterartigen Ringbalken aus Holzprofilen befestigt (Abb. 19). Die winkelförmigen Elemente sind durch Fenster- bzw. Türöffnungen voneinander getrennt, die wie Gelenke bei horizontalen Erdstößen wirken. Die Brüstungselemente unter den Fenstern sind als flexible Leichtwand mit Lehmewurf ausgebildet.

Das Dach ruht nicht auf den Wänden, sondern auf Stützen, die außerhalb der Wand stehen. Somit können sich Dach und Wand im Erdbeben unabhängig voneinander bewegen.

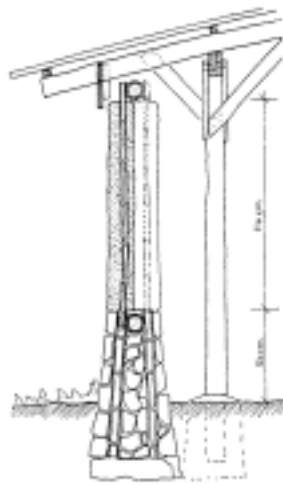


Abb. 17

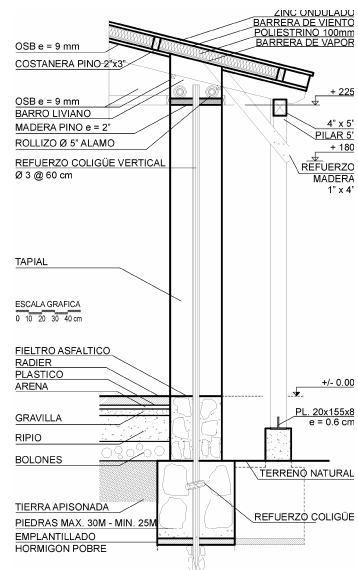


Abb. 19

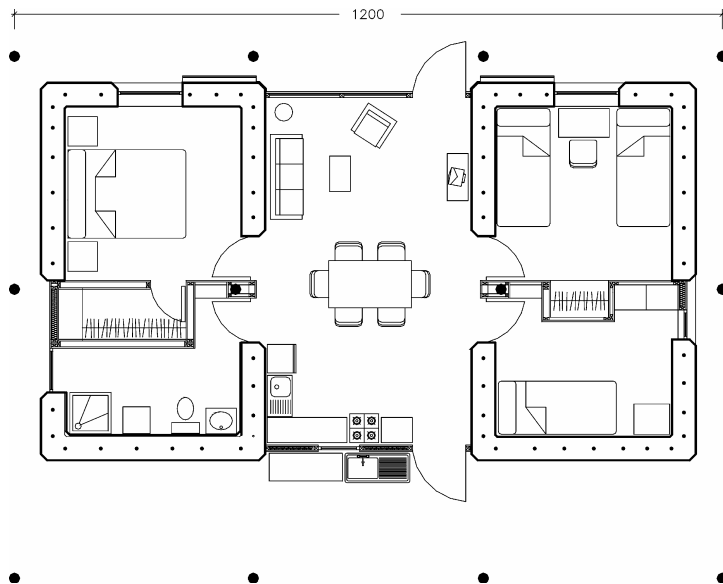


Abb. 18

## Lehmsteinkuppeln



Abb. 20



Abb. 21



Abb. 22



Abb. 23

Erdbebensichere Kuppelgewölbe müssen zwei Bedingungen erfüllen: Ihre Querschnittsform muss so gestaltet sein, dass aus dem Eigengewicht keine Ringzugkräfte und allenfalls geringe Ringdruckkräfte im Gewölbe entstehen. Sie müssen den optimalen Stützlinienquerschnitt aufweisen (näheres bei: (1), S.236 ff.). Außerdem müssen die schräg nach außen verlaufenden Schubkräfte aus der Kuppel in ein Ringfundament eingeleitet werden, das die entstehenden Ringzugkräfte aufnehmen kann. Dabei ist es wichtig darauf zu achten, dass die Gewölbekräfte auch im Sockelbereich im inneren Drittel der Wand verlaufen.

Für das Goetheinstitut in La Paz, Bolivien, wurde vom Autor eine Lehmsteinkuppel mit 8,80 m lichter Weite und 5,70 m Höhe entworfen. Sie dient als Veranstaltungsort mit 75 m<sup>2</sup> Nutzfläche für Konzerte, Ausstellungen und Dichterlesungen (Abb. 22,23). Die Kuppel wurde mit Hilfe der vom FEB entwickelten Rotationslehre errichtet (Abb. 20), die die statisch optimierte Querschnittsform ohne Ringkräfte ergibt. Die speziellen vor Ort handgeformten Akustik-Lehmsteine (Abb. 21) weisen durch ihre abgerundete Seite einen Schallstreuungseffekt, durch ihre geneigte Lage eine Schallablenkung und durch die ausgekratzten Fugen

und die im oberen Bereich der Kuppel sichtbar werdenden Löcher einen Schallschluckeffekt auf (Abb. 22). Ein zentrales Acrylglas-Oberlicht sorgt für ausreichende Belichtung.

Um den Wetterschutz zu gewährleisten wurde die Kuppel mit einem Lehmputz und anschließend mit einem wetterfesten Anstrich („Kemperol“) überzogen. Da der Bau



in 3800 m Höhe liegt und extremer Sonnenstrahlung ausgesetzt ist, wurde er anschließend noch mit einem reflektierenden Aluminium-Anstrich versehen. Um die Erdbebensicherung zu gewährleisten wurde im 1 m hohen Sockel ein Stahlbetonringanker eingepflanzt.

## Lehmsteintonnen

Für das Erdbebengebiet in Gujarat, Indien, wurde vom Autor eine Notunterkunft in Form einer Lehmsteintonne entworfen (Abb. 24). Bei diesem Projekt ging es darum eine einfache Behausung zu schaffen, die von den Nutzern weitestgehend selbst errichtet werden kann und die neben der Erdbebensicherheit auch einen ausreichenden thermischen Komfort bietet. Tonnengewölbe sind zwar im Prinzip weniger erdbebensicher als Kuppelgewölbe aber sehr viel leichter herstellbar und als Notunterkunft besser nutzbar.

Die Stirnflächen sind aus Holzgeflecht mit Lehmbewurf ausgebildet, um eine gewisse Verformbarkeit zuzulassen. Die gegenüberliegenden Streifenfundamente müssen durch Zugbänder miteinander verbunden sein, um ein Auseinanderweichen der Fundamente infolge von Erdstößen zu verhindern.

Eine zusätzliche Möglichkeit Lehmsteintonnen zu stabilisieren wurde am FEB realisiert. Dabei werden spezielle u-förmige Lehmsteine (Abb. 25) auf Bambusbögen aufgereiht und untereinander vermörtelt (Abb. 26). Die Bambusbögen, die die Form einer Kettenlinie aufweisen, bestehen aus 3 Lagen gespaltenem Bambusrohr und sind zugfest am Streifenfundament befestigt. Über das Gewölbe wird eine Membrane gespannt, die einerseits als Regenschutz dient und andererseits das Lehmgewölbe etwas auf Druck vorspannt. Sollte sich das Gewölbe infolge der Erdstöße verformen, so können die Mörtelfugen aufbrechen, die Lehmsteine aber nicht abfallen, da sie nach unten durch den flexiblen Bambusbogen und nach oben durch die gespannte Membrane gehalten sind. Dies ist eine intelligente Möglichkeit einem massiven Tonnengewölbe ausreichend Verformbarkeit zu ermöglichen und die kinetische Energie des Erdbebens abzubauen, ohne dabei einzustürzen.

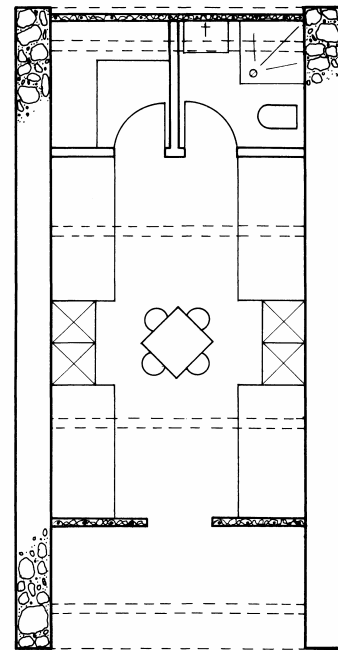
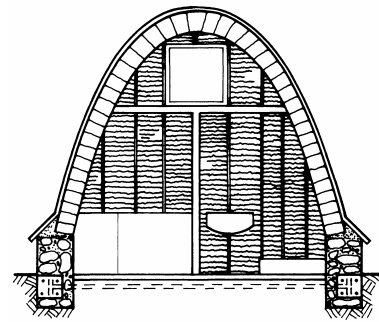


Abb. 24



Abb. 25



Abb. 26

## **Anmerkung**

Dieser Bericht stellt eine Zusammenfassung einer Veröffentlichung des Autors dar, die bislang nur auf Spanisch und auf Englisch (2) existiert und Erkenntnisse und Ergebnisse zusammenfasst, die im Rahmen von drei Forschungsprojekten zum Thema „Erdbebensicheres Bauen mit Lehm“ am Forschungslabor für Experimentelles Bauen der Universität Kassel unter Leitung des Autors entstanden und zur Realisierung von fünf Prototypen in Guatemala, Ekuador, Bolivien und Chile führten. Der vollständige Text kann aus dem Internet heruntergeladen werden unter [www.gtz.de/basin/publications/](http://www.gtz.de/basin/publications/)

## **Literaturhinweise**

Minke, G.: Das neue Lehmhandbuch – Baustoffkunde, Konstruktionen, Lehmarchitektur. Ökobuch Verlag Staufen 2001, 345 S., über 400 Abb.

Minke, G.: Construction manual for earthquake resistant houses built of earth. Eschborn 2002, 52 S.

## **Abbildungsnachweis**

Abb. 3a, 3b: aus Tolles, Kimbro et al.: Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures, Los Angeles, USA, 2000

Alle weiteren Abbildungen stammen vom Autor