

# Baukonstruktionen aus Massivlehm in seismischen Gebieten Mittelasiens – Bewertung und Vorschläge zur Verbesserung ihrer Erdbbensicherheit

## Die Nutzung von Lehm als Baumaterial in historischen Baukonstruktionen Mittelasiens

Seit Jahrtausenden ist das Bauen mit Lehm in den Ländern Asiens außerordentlich weit verbreitet. In Mittelasien war viele Jahrhunderte der monolithische Lehm (Pachsa) vorherrschend, in Einzelfällen kamen aber auch Lehmsteine (Khomgisch) zur Anwendung.

In früherer Zeit wurden mit der monolithischen Pachsa-Technik überwiegend Wandkonstruktionen, aber auch Flachgründungen für bedeutende Bauten ausgeführt. Typische Konstruktionen waren homogene Wandstrukturen, Wände mit unterschiedlicher Dicke, aber auch in einem Wandabschnitt wechselnde Techniken aus monolithischem Pachsa und Lehmsteinen sowie Wandkonstruktionen in Form von rechteckförmigen Blöcken mit Anordnung im Verband, jedoch ohne Fugenmörtel.

Die blockartige Struktur der monolithischen Pachsa-Wände führte zu einem wesentlichen Mangel: Rissbildungen als Folge des Schwindens beim Austrocknen. In der Literatur [1,2] werden zwei Verfahren der Herstellung von Pachsa-Blöcken beschrieben. Im Palast von Tali-Barsu nahe Samarkand wurden im 1. Jahrhundert Pachsa-Blöcke von 1 m Höhe, 90 cm Länge und 3 m Breite nacheinander zu einem Baukörper zusammengefügt.

Im trockenen Klima Mittelasiens blieben diese Blöcke sehr lange Zeit erhalten. Der Auswahl und Aufbereitung des Baulehms für die Herstellung von Konstruktionen aus Pachsa wurde große Aufmerksamkeit gewidmet, insbesondere dem Mauken. Dies ist auch eine der Ursachen für die Dauerhaftigkeit dieses „primitiven“ Materials.

Lehmsteine als eigenständiges Baumaterial finden sich bereits in sehr alten Konstruktionen, so z. B. in Wandstrukturen der frühen städtischen Periode von Choresm, oft in Verbindung mit Pachsa. Ein weiteres Beispiel für die frühe Verwendung von Lehmsteinen ist der historische Baukomplex von Kirk-kis im Gebiet der Altstadt von Termes. Der zweigeschossige Baukomplex nimmt eine Fläche von 45×45 m ein und besitzt zwei eckige Türme.

Das Lehmsteinmauerwerk eines Teils der Stadtmauer von Afrasiyab, der Vorgängerstadt des heutigen Samarkand, sowie das der Moschee Degarron aus dem 7.-9. Jahrhundert wirkt wie ein

kompakter Monolith, unterbrochen von schmalen horizontalen Bändern aus Ziegelsteinen, die die Struktur der Lagerfugen des Mauerwerks hervorheben. Der Zustand der Erhaltung des Mauerwerks ist unterschiedlich in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen. Besonders gut erhalten ist das Mauerwerk überall dort, wo keine Einwirkung von Wasser erfolgte.

Wie haben die alten Handwerker die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Konstruktionen aus Lehmstoffen gewährleistet? Die Auswahl und Aufbereitung des Baulehms erforderten viel Zeit und wurden sehr sorgfältig durchgeführt. Diese Prozesse gehörten zu den verantwortungsvollsten Tätigkeiten. So konnte das Mauken in aufgeschütteten Haufen bis zu 2 Jahre dauern. Dabei verrotteten im Lehm vorhandene organische Substanzen und lockerten die Bodenstruktur.

Die Formgebung der Lehmsteine erfolgte auf einer ebenen Fläche in Formkästen durch Verdichtung mit speziellen Stampfern. Die Trocknung vollzog sich sehr langsam an einem luftigen, schattigen Platz. Um einen Lehmstein hoher Qualität zu erhalten, musste der Rohling vollständig ausgetrocknet sein, was 2-3 Jahre dauern konnte. Auf diese Weise hergestellte Lehmsteine verformten sich nicht bei der Verarbeitung und verbanden sich gut mit Mörtel und Putz. Lehmsteine, die nicht gründlich genug getrocknet wurden, durften nur für Baukonstruktionen mit unverputztem Mauerwerk verwendet werden [1].

In der Sonne getrocknete „Guwaljak“-Lehmbatzen aus aufbereitetem Lößlehm wurden als Füllmaterial für Fachwerkkonstruktionen von Wohnhäusern verarbeitet. Sie wurden auch bei der Sanierung von Bauwerken aus gestampftem Lehm und Lehmsteinen eingesetzt, so z. B. in Wandkonstruktionen des alten Samarkand und in Chiwa bei der Sanierung des historischen Baukomplexes „Ichan-Kali“.

„Lehmbeton“ der historischen Baukonstruktionen besteht aus einer Mischung von Kies, Sand und einem ton- oder lösshaltigen Baulehm teigartiger Konsistenz. Bekannt sind Verwendungen für Gründungen historischer Baukomplexe aus dem 8. Jahrhundert auf dem Berg Mug am linken Ufer des Sarafschan-Flusses, in der Stadtmauer von Schachri-Wajron mit Zuschlägen von ungebranntem kristallinem Gips und in den Fundamenten von Gebäuden, die den Hof des Mausoleums von Gur-Emir in Samar-

# Earthen building constructions in earthquake-prone regions of Central Asia – an evaluation and strategies for reducing their earthquake vulnerability

## The use of earth as a building material in historic building constructions in Central Asia

The use of earth as a building material is extremely widespread throughout the Asian continent. Most common in Central Asia is the monolithic earthen building technique known as Pachsah, which has been used for many hundreds of years, although constructions made with adobe blocks (Khomgisch) can also be found.

In earlier times, the monolithic Pachsah technique was used primarily for walls, on occasions also for the flat plinths of important buildings. Typical constructions include homogenous wall structures, walls with differing thicknesses and walls employing varying techniques such as Pachsah and adobe or wall constructions using large blocks of pachsah arranged in coursing but without mortar.

A typical problem of the block-like structure of the monolithic Pachsah walls is that it is susceptible to cracking as it dries out. Two different methods of making Pachsah are described in the reference literature (1,2). The Palace of Tali-Barsu near Samarkand, built in the 1st century, used Pachsah blocks with the dimensions 0.90m×3m and a height of 1m. In the dry climate of Central Asia, these blocks survived many hundreds of years. Great attention was paid to the selection of a suitable earth source and its preparation, particularly the tempering process, and this is a further reason for the durability of this “primitive” material.

Adobe constructions can likewise be found in ancient constructions, for instance in the wall structure of the early formation period of Choresm, and were often employed in combination with Pachsah. A further example of the early use of adobe is the historic complex of Kirk-kis in the old city of Termes. The two-storey complex occupies an area 45m×45m with two rectangular towers. It forms a complex system of interlocking arches and domed roofs made of earthen bricks with the dimensions 30×30×5.5cm.

The earthen walling of a portion of the city walls of Afrasiyab, the predecessor to today's Samarkand, as well as of the Degaron Mosque built in the 7th-9th centuries gives the impression of a compact monolith delineated by narrow horizontal brick

banding which emphasises the horizontal jointing of the structure. The current condition of the walling depends very much on the external conditions it has been exposed to. It is particularly well preserved where it has not been subject to water damage. The structural strength of the historic earthen walling has not been ascertained.

How did the workmen of old ensure sufficient strength and durability of the earthen constructions? The selection and preparation of the earth mixture was undertaken with great care and took a considerable amount of time. This process necessitated great responsibility. The tempering process could involve a maturing process of up to 2 years. Organic substances within the earth decomposed and loosened the basic structure.

The earthen bricks were formed using moulds arranged on an even surface and were compressed using special ramming tools. The blocks were then left to dry slowly in a well-aired and shady location. The drying process could take up to 2-3 years in order to obtain earthen blocks of the highest quality. This resulted in bricks with excellent form-stability which could be arranged in coursing with mortars and rendered. Earth blocks which had not fully dried could only be used for building constructions which were not rendered [1].

“Guwaljak”, which are sun-dried clods of prepared loess soil, is a further earthen material used as fill material for timber frame constructions, particularly for dwellings, or as repair material for rammed earth or adobe constructions. This technique was used in the renovation of walls in old Samarkand and in Chiwa for the renovation of the “Ichan-Kali” building ensemble.

“Earthcrete”, a historical technique consisting of a mixture of gravel, sand and a clay or loess-rich earth had a doughy consistency. Historical instances of its use include the foundations for historic building ensembles in the 8th century on the Mug mountain on the left-hand banks of the river Sarafschan, the city walls of Schachri-Wajron with unfired crystalline gypsum used as an additive, and the foundations of buildings which surround the courtyard of the Gur-Emir Mausoleum in Samarkand (end of the 14th, beginning of the 15th century). In this case the mortar was composed of a mixture of 1 part loess soil to 2 parts sand mixed with smaller grains of gravel.



kand (Ende 14.-Anfang 15. Jahrhundert) umrahmen. Hier wurde der Mörtel in einer Zusammensetzung 1:2 (Löß:Sand) mit kleineren Kieskörnern gemischt, deren Anteil nicht feststellbar ist.

Massive Lehmbauten „überlebten“ viele Jahrhunderte ohne Dachtraufe und Putz und besaßen weder Fundamente noch Sockel. Als Beispiel wird ein viergeschossiges Gebäude „Tschodri howli“ in Chiwa aus dem 15. Jahrhundert angeführt, das heute die Funktion einer Pension erfüllt. Das Gebäude ist 17m hoch, der Grundriss umfasst eine Fläche von 16×8m. Die Wände sind in Pachsah-Technik ausgeführt. Sie besitzen an der Basis eine Stärke von 80cm und verjüngen sich bis zur 4. Etage auf 40cm.

Bis heute sind zahlreiche palastartige Konstruktionen nahe Sarafschan erhalten sowie Wandreste aus dem 10. Jahrhundert bei Kampir-Diwan nahe der Oasenstadt Buchara. Bis in unsere Tage erhielten sich auch einzelne Gebäude der Festung Gaur-Kala in der Nähe der Stadt Hod-jajli aus dem 9.-10. Jahrhundert. Vollständig erhalten blieb ein Gehöft aus dem 18.-19. Jahrhundert in der Nähe von Samarkand.

### Ingenieurmäßige Schadensanalyse von Gebäuden aus Lehm (Pachsa) nach starken Erdbeben

Die verheerenden Erdbeben der letzten Jahre in unserem Lande und den Ländern der GUS (Aschhabad 1948, Taschkent 1946 und 1966 [3], Sangusar 1948, Dagestan 1970 und 1975, Kirgisien 1970, Dshambul 1971, Petropawlowsk - Kamtschatsk 1971, Gasli 1976 und 1984 [4], Nasarbek 1980 [5], Papsk 1984, Kairakum 1985, Armenien 1988) sprechen für die ausreichende Zuverlässigkeit der seismischen Stabilität der Baukonstruktionen, die entsprechend den Forderungen der Normen entworfen und errichtet wurden. Die Analyse der Folgen dieser Erdbeben bestätigte jedoch auch die Ansicht über die nicht ausreichende Erdbebensicherheit von vorhandenen oder im Bau befindlichen Baukonstruktionen aus Lehm (Pachsah) in den Erdbebengebieten.

Bei der Analyse der Zerstörungen von Gebäuden nach dem Erdbeben in Taschkent wurde festgestellt, dass sowohl im Epizentrum, als auch in den Zonen geringerer Intensität Baukonstruktionen aus Lehm durch das Erdbeben Schäden erlitten hatten. Für die Lehmbauten waren Schadensbilder wie kreuzartige, waagerechte und senkrechte Risse an den tragenden und nicht

tragenden Wänden charakteristisch. Die Holzbalken der Decken sind oft aus den Auflagerverbindungen herausgerissen worden, was zuweilen zum Einsturz der Geschossdecken und der Wände führte. Die homogenen Wände hatten waagerechte Risse auf allen Ebenen, wobei diese auch zusammen mit schräg kreuzenden Rissen beobachtet wurden. Schräge und sich kreuzende Risse waren in den meisten Fällen sowohl an den Längs- als auch an den Querwänden zu registrieren.

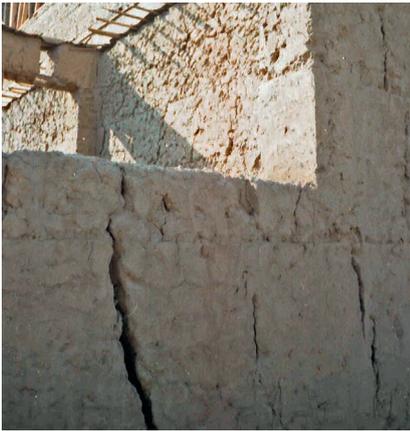
Die Analyse der Folgen der Erdbeben vom 8. April und 17. Mai 1976 in Gasli und Buchara zeigte folgende Schäden an den Lehm-bauten aus Pachsah: senkrechte durchgehende Risse bis 20mm breit, Durchbrüche an Mauern, Abbruch von Gesimsen, Ofenzügen, Ofenrohren und Öfen, Abreißen von Quer- und Längswänden mit teilweise Zusammenbruch. Nach dem Erdbeben vom 17. Mai 1976 waren diese Lehm-bauten meist völlig zerstört.

Acht Jahre später, am 19.(20). März 1984, wurde Gasli wieder von einem starken Erdbeben heimgesucht. Die Schadensanalyse [4] nach dem Erdbeben in Buchara zeigte ganz ähnliche Beschädigungen der Gebäudeteile aus Lehm (Pachsa) wie nach dem Erdbeben 1976.

Beim Erdbeben in Isfar-Batkent am 31. Januar 1977 [7] erlitten die meisten Lehm-bauten starke Beschädigungen. Die Wohnbebauung auf dem Lande wurde überwiegend aus Lehm errichtet. Typisch für diese Art der Wohnhäuser ist ein schweres, mehrschichtiges Flachdach mit einer Tragstruktur aus Rundhölzern, auf die mehrere Schilflagen verlegt sind und auf die abschließend ein Lehmschlag aufgebracht wird. Die Dicke der Flachdächer beträgt 40-50 cm.

In der Siedlung Nasarbek nahe der Stadt Taschkent ereigneten sich am 11. und 30.12.1980 zwei starke Erdbeben. Die Siedlung ist überwiegend nach 1970 erbaut worden. Die Bebauung besteht hauptsächlich aus einstöckigen Gebäuden mit Lehmwänden in Pachsah-Technik.

Die Bautechnologie dieser Gebäude führte beim Trocknen zur Bildung von durchgehenden Rissen. Beim Erdbeben haben sich die bestehenden Risse wesentlich verbreitert. In den Hausecken waren die Längswände von den Querwänden abgerissen. Außerdem gab es Fälle, bei denen komplette Gebäudeecken aus der Hausstruktur herausgefallen waren. Der überwiegende Teil die-



Monolithic earthen buildings have “survived” here for many hundreds of years without roof eaves, external render, proper foundations or plinths. For example, the four-storey “Tschodri howli” building in Chiwa built in the 15th century, is today still open as a guest house. With a footprint of 16×8 m and a height of 17 m, its “Pachsah” walls become gradually thinner starting at 80 cm at ground level to 40 cm on the fourth floor.

Numerous palace-like constructions near Sarafschan can still be seen today as well as wall remains from the 10th century in Kampi-Diwan near the oasis city of Buchar. Likewise individual buildings from the Gaur-Kala fortress near to the city of Hodjajli survive from the 9th and 10th centuries. More recent examples include the 18th-19th century farmstead near Samarkand.

### **An engineering assessment of earthquake damage to buildings made of earth (Pachsah)**

The frequency with which our country and other GUS countries have suffered from considerable earthquakes in the last fifty years (Aschhabad 1948, Taschkent 1946 und 1966 [3], Sangusar 1948, Dagestan 1970 und 1975, Kirgisien 1970, Dshambul 1971, Petropawlowsk-Kamtschatsk 1971, Gasli 1976 und 1984 [4], Nasarbek 1980 [5], Papsk 1984, Kairakum 1985, Armenia 1988) suggest that the seismic stability of building constructions constructed according to the norms is sufficient. However an analysis of the earthquake damage of existing buildings made of earth (Pachsah) or earth buildings under construction also corroborates the view that such structures are not sufficiently resistant to seismic activity.

An analysis of the pattern of distribution of earthquake damage suffered by buildings in Tashkent shows that buildings made of earth suffered damages not only in the epicentre but also in the zones where seismic activity was less intense. Characteristic damage to buildings made of earth included horizontal, vertical or diagonal cracking in both load-bearing and non-load-bearing walls. The timber joists of the floors were sometimes dislodged causing the ceiling and sometimes the walls to collapse. Homogenous walls exhibited horizontal cracking at all levels often in combination with diagonal cracking or cracks which crossed over. Diagonal and crossing cracks were visible on both long and short sides of the buildings.

An analysis of damages after the earthquakes from 8th April and 17th May 1976 in Gasli and Buchar. An analysis of damages to Pachsh structures: vertical cracks of up to 20 mm wide, holes broken in walls, broken cornices, sheared flues and stoves and breaking apart (and occasional collapse) of wall junctions between both cross walls and long sides. After the second earthquake on the 17th May 1976 most of the previously damaged buildings were completely destroyed.

Eight years later on the 19th and 20th March 1984, Gasli was once again hit by an earthquake. An analysis of damages [4] resulting from the earthquake in Buchar. An analysis of damages [4] resulting from the earthquake in Buchar exhibited similar patterns to those experienced after the earthquake in 1976.

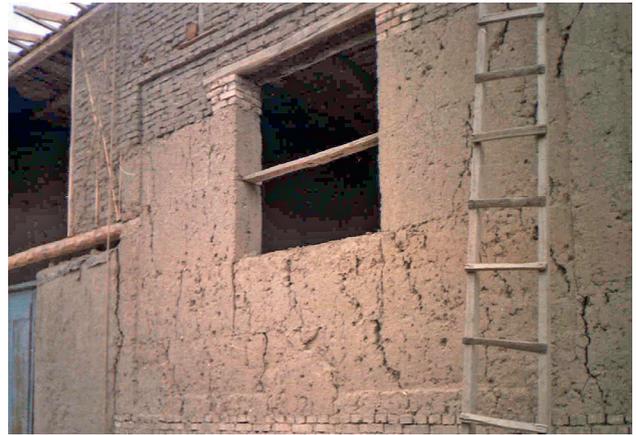
In the earthquake in Isfar-Batkent on the 31st January 1977 [7] most earthen buildings were badly damaged. Most dwellings in this rural region are made of earth. Typically the roofs of such buildings are a heavy construction consisting of several layers: a bearing structure of round timber joists, covered in several layers of reed upon which a layer of earth is applied. The thickness of the roofs can often reach 40-50 cm.

The monolithic earth dwellings in the settlement of Oftobroi were most badly damaged. Many earthen walls were completely or partially destroyed and freestanding walls also collapsed.

The village of Nasarbek near to Tashkent, was also hit by two strong earthquakes on the 11th and 30th December 1980. Most of the village was built after 1970 with single-storey buildings made of earth using the Pachsh technique.

The technology used often lead to cracks throughout the entire structure as the material dried. An earthquake exacerbated the existing cracks considerably. Walls meeting at the corners of the buildings were dislodged from one another. In some cases the entire corner of a building had fallen away from the building. Most of the buildings suffered grade 3 damages, in part grade 4 (MSK-64 scale).

After the second earthquake on the 30th December 1980 the existing cracks were widened still further, often doubling. Some corners of buildings fell apart. The buildings suffered grade 4 and 5 damages.



ser Gebäude erlitt Beschädigungen des Schadensgrades 3, z. T. 4 nach Skala MSK -64.

An vielen Querwänden öffneten sich senkrecht und schräg verlaufende, durchgehende Risse, wobei die senkrechten im Vergleich zu den schrägen Rissen wesentlich größer waren. Die senkrechten Risse dominierten auch beim Erdbeben in Taschkent 1966. Diese Schadensstrukturen sind offenbar charakteristisch für diesen Gebäudetyp in der Zone des Epizentrums und in deren unmittelbarer Nähe.

Die Analyse der Folgen der starken Erdbeben, die in Mittelasien stattfanden, zeigte folgende Schadensbilder an massiven Lehmbauten: am typischsten sind senkrecht, waagrecht und schräg verlaufende sowie X-förmige Risse; das Abreißen von Längs- und Querwänden; der Zusammensturz von Fensterbrüstungen, Sims, Ofenzügen, Vordächern und einzelnen Wandabschnitten und Geschossdecken.

### Messtechnische Erfassung der dynamischen Parameter für Gebäude aus Materialien mit geringer Festigkeit

Bei der Projektierung von Gebäuden und Anlagen in Erdbebengebieten müssen in der statischen Berechnung bekanntlich seismische Einwirkungen erfasst werden. Für die Ermittlung von seismischen Beanspruchungen, die in den Bauwerken bei den Erdbeben entstehen, müssen ihre Beanspruchungsparameter – Perioden und Formen von freien Schwingungen – ermittelt werden.

Gebäude bilden aus ingenieurtechnischer Sicht komplizierte räumliche Strukturen aus verschiedenartigen Baustoffen, die nach einer bestimmten Technologie zu einer Konstruktion zusammen gesetzt werden. Bei den dynamischen Berechnungen werden jedoch gewöhnlich Verfahren angewendet, die ein vereinfachtes Modell des Bauwerkes darstellen. Diese vereinfachten Annahmen betreffen vor allem die räumliche Steifigkeit, den Ausfüllungsgrad der Gefache bei Skelettkonstruktionen, die tatsächlichen Baugrundbedingungen u.a.m. Dadurch können sich die dynamischen Eigenschaften der Gebäude wesentlich von den tatsächlichen Werten unterscheiden. Deshalb sind die Probleme der Präzisierung von Istwerten und dynamischen Bauwerksparametern sowie ihre Bestimmung unter natürlichen Bedingungen aktuell und dringend.

Es ist unmöglich, die dynamischen Kenngrößen, die das reale Verhalten des Bauwerkes in den verschiedenen Spannungs-Verformungszuständen charakterisieren, ohne experimentelle Prüfungen zu erfassen. Deshalb wurden reale Untersuchungen zur Bestimmung von dynamischen Kenngrößen an Lehmbauten aus Pachsah durchgeführt.

Bei den realen Untersuchungen an Gebäuden wurden Schwingungsmessungen von mikro-seismischen Störungen des Baugrundes durchgeführt, welche durch den Stadtverkehr verursacht wurden und die senkrechte und waagerechte Schwingungen hervorriefen, die in den Bebauungsgebieten in den Baugrund und anschließend in die Gebäude übergingen. Als Folge der Einwirkung der dynamischen Beanspruchungen entwickelten sich im Baugrund Prozesse, welche zu Verformungen an den Gebäuden führten.

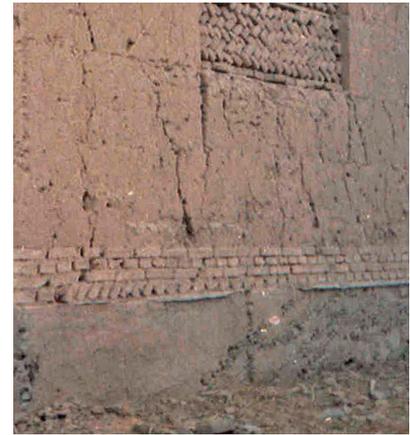
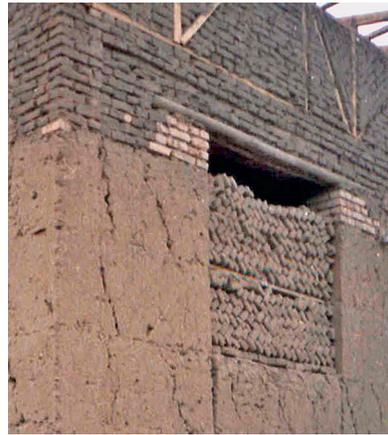
Für die Registrierung der mikro-seismischen Störungen wurde eine ingenieur-seismische Standardapparatur genutzt. Die Baugrundschiebungen wurden durch Seismografen WEGIK registriert und durch einen Oszillografen H-700 in Kombination mit einem Galvanometer GB-III mit der Frequenz 5 Hz aufgezeichnet.

Registriert wurden zwei waagerechte Komponenten mit Quer- und Längskomponente. Die Seismografen waren wie folgt angeordnet: auf der Ebene des Fensterbrettes und auf der Ebene des Fußbodens, d. h. auf der Oberkante der Decke.

Die Auswertung der erhaltenen Werte erfolgte nach der üblichen Methodik. Diese Schemata sahen die Registrierung der Gebäudeschwingungen in Längs- und Querrichtung auf der Ebene des Fensterbrettes und der Decke vor.

Vor Beginn der Messungen wurden visuelle Untersuchungen der Testobjekte durchgeführt, um sichtbare Defekte und Beschädigungen der Bauwerkskonstruktionen zu erfassen. Diese Angaben sind nachfolgend zur Analyse und Gegenüberstellung von Berechnungs- und Messwerten unentbehrlich. Zur Abschätzung der Zuverlässigkeit der erhaltenen Daten wurden in jedem Testobjekt vier Seismografen in je zwei Richtungen aufgestellt.

Die Tests wurden an insgesamt acht eingeschossigen Lehmgebäuden aus Pachsah (Baujahr 1988 und später) mit Streifenfun-



Many bracing walls broke apart and vertical or diagonal cracks formed throughout the depth of the entire wall, with the vertical cracks considerably larger than the diagonals. Again this vertical cracking was most common as a result of the 1966 earthquake in Tashkent. The congruence of this pattern of damage suggests that this is typical for these kinds of buildings in the zone of earthquake epicentres and vicinity thereof.

An analysis of damages resulting from strong earthquakes in Central Asia again exhibit the following pattern: vertical, horizontal and diagonal cracks as well as X-shaped cracking; the breaking apart of crosswalls from longitudinal walls; the collapse of window parapets, cornices, oven flues, projecting roofs and individual wall sections and floors.

**Metrological determination of dynamic parameters for buildings made with low-stability materials**

In the design and structural engineering of buildings and building complexes in areas of earthquake zones, the influence of seismic activity must be considered. In order to determine the influence of seismic forces that occur in buildings during an earthquake one first needs to establish its particular parameters – the period and form of free oscillations.

From an engineer's point of view, buildings are complex spatial structures made out of a variety of building materials assembled using particular technologies. In the dynamic calculation of the structural stability of buildings a simplified model of a building is typically used. The simplifications can effect the rigidity of the structure, the degree in which panels of framed constructions are filled, the actual ground conditions etc. In reality, the dynamic properties of the building can differ considerably from the actual values. It is therefore very important that the actual values and dynamic properties be obtained as precisely as possible and determined in natural conditions as far as practicable.

Without experimental testing it is impossible to determine the dynamic characteristic values which illustrate the actual behaviour of the building in the different deformation conditions it may be subject to. As a result, real investigations are being carried out on earthen buildings constructed using Pachshah to determine the dynamic characteristic values of earth buildings.

Oscillation measurements were taken of micro-seismic disturbances of the subsoil produced by heavy traffic in the city. Vertical and horizontal vibrations produced by the traffic are transmitted via the subsoil to the building. As a result of these dynamic effects, the subsoil is subject to vibrations which in turn lead to deformations within the buildings.

The investigations were carried out using the MUGS method (multi-channel assessment of building vibrations) which was developed at the Institute of Geophysics at the Academy of the Sciences in the USSR.

Standard seismic engineering apparatus was used to register the micro-seismic disturbances. Vibrations in the subsoil were registered with the frequency 5Hz using a WEGIk seismograph and an H-700 oscillograph together with a GB-III galvanometer.

Two horizontal components were registered with transverse and longitudinal aspects. The seismographs were arranged at the level of the window sill and on first floor level, i.e. the upper surface of a floor.

The assessment of the captured data followed typical methodologies. This arrangement could measure the longitudinal and transverse components of vibrations at the level of the window sill and at floor level.

Before the measurements began, visual investigations of the test building were undertaken to establish existing damage to the building and possible defects in the building's construction. This information is absolutely necessary for the subsequent analysis and comparison of calculated values and measured values.

In order to estimate the reliability of the data captured, each test object was equipped with four seismographs set up in two directions each.

Test were undertaken on a total of eight single-storey earthen buildings constructed using Pachshah (built since 1988) on strip foundations. The walls of the buildings were between 40 and 50cm, the footprint of the building 13×20 m, the height 3m with timber floors and roofs of asbestos panels fixed to timber rafters. The oscillograph was able to detect self-oscillation val-



damenten ausgeführt. Die Gebäudeabmessungen betragen: Wandstärken 40-50cm, Grundfläche 14×20m, Geschosshöhe 3,0m, Holzdecken, Dächer aus Asbestzementplatten an den Holzdachsparren befestigt.

Die Bearbeitung mit dem Oszillografen zeigte, dass die Periode der Eigenschwingungen in der Längsrichtung 0,11-0,12s, in die Querrichtung 0,11-0,15s beträgt.

Die Ergebnisse der Tests sind in Tabelle 1 angegeben.

### Konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Erdbebensicherheit von Lehmbauten

Das Problem der Gewährleistung der Erdbebensicherheit von Gebäuden beschäftigte schon unsere Vorfahren. Der Zustand der bis heute erhaltenen Baudenkmale in Mittelasien zeugt davon, dass bereits im 19.-20. Jahrhundert unserer Zeitrechnung die Bauplaner mit dem Charakter der Erdbebeneinwirkungen auf Gebäude bekannt waren [6]. Für die Gewährleistung der Erdbebensicherheit verwendeten sie eine einfache, aber wohl-durchdachte und effektive Bauweise. Eine anschauliche Bestätigung dafür sind die bis in unsere Tagen gut erhaltenen Baudenkmale, die Erdbeben mehrfach standgehalten haben. Eines der Hauptmittel für die Erhöhung der Erdbebensicherheit war die Nutzung von elastischen Materialien und Konstruktionen (Gründungspolster, Schilflagen entlang der Oberkante des Fundaments, manchmal auf zwei Ebenen u.a.m.). So wurde z. B. im Mausoleum von Ali-Sultan in Kunja-Urgentsch das Schilfpolster in die fünfte Schicht des Ziegelmauerwerks über der Geländeoberfläche eingelegt. Hoch liegende Schilfeinlagen dienten auch

als antiseismische Maßnahme in einem namenlosen Mausoleum in Tchor-Bachr [6]. Das ermöglichte dem konstruktiv starren Bauwerk die Erdbebeneinwirkungen abzdämpfen. Dieses Prinzip blieb im Laufe von mehreren Jahrhunderten das einzige und unverändert.

Aus über Generationen weiter gegebenen Sagen ist bekannt, dass man beim Bau von Lehmmauern der Festung Itschan-Kala in Choresm das Prinzip der thermischen Verfestigung anwandte, indem heiße Luft über innere Kanäle die gesamte Wand bis zur Sinterung erhitze. Dadurch erhielt die Konstruktion die notwendige Festigkeit und Langlebigkeit[6].

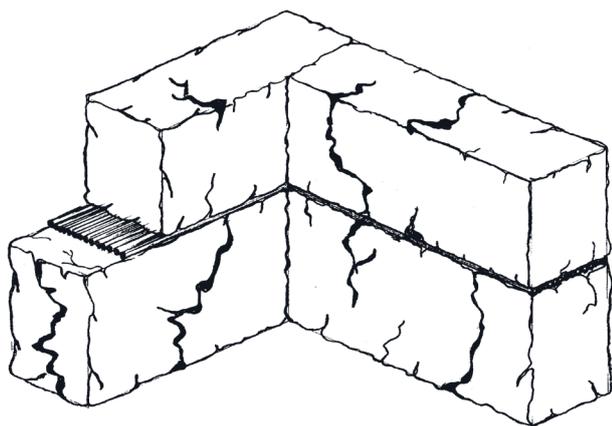
Zu den wesentlichen Ursachen für den vorzeitigen Verfall von Gebäuden aus Lehm gehören unzulässig hohe Salzkonzentration im Baulehm sowie Bodenfeuchtigkeit und Niederschläge. Indirekt wirken negativ auf die Lebensdauer von Lehmbauten unregelmäßige Baugrundsenkungen, starke Erdbebenschwingungen, fehlerhafter Entwurf und Bauausführung. Bei fehlerloser Technologie und Nutzung können massive Lehmbauten bis zu 100 Jahren und länger betrieben werden.

Die stürmische Industrialisierung der Bauprozesse und der breite Einsatz von Stahlbeton verdrängte die Lehmbaumstoffe aus dem Bereich des Investitionsbaus. Lehmbaumstoffe werden noch im privaten Wohnungsbau in kleinem Umfang eingesetzt, wobei einige Elemente schon industriell gefertigt werden. Das hat dazu geführt, dass die im traditionellen Bauen angesammelten Erfahrungen über den Lehmbau allmählich in Vergessenheit geraten.

Nr.	Wandbaustoff Testobjekt	Baujahr	Grundfläche (m)	Ermittelter Grad der Erdbebenintensität	Perioden der freien Schwingung(s)	
					Querrichtg.	Längsrichtg.
1	Pachsah	1988	13,8×19,6	8	0,14	0,12
2	Pachsah	1991	12×15	8	0,12	0,11
3	Pachsah	1989	16×20	8	0,15	0,12
4	Pachsah	1990	12×15	8	0,13	0,11
5	Pachsah	1992	12,3×18	8	0,14	0,11
6	Lehmsteine	1989	12×13	8	0,12	0,11
7	Pachsah	1989	10×12,4	8	0,14	0,12
8	Pachsah	1990	15×18	8	0,15	0,12

TABELLE 1 Ergebnisse aus mikroseismischen Messungen an Gebäuden aus Massivlehm (Pachsah)

Einzelanwendung von Fachwerk in Gebäuden  
Use of timber frame construction in earthen buildings



ues (natural vibration) of 0.11-0.12 s in a longitudinal direction and 0.11-0.15 s in a transverse direction. The results of the test are given in table 1.

**Constructive measures for improving the earthquake resistance of earthen buildings**

The problem of protecting against the effects of earthquakes on buildings was also tackled by our predecessors. The existence and condition of historic monuments in Central Asia show that the master builders of old from the 19th and 20th centuries were already well aware of the effects of earthquakes on buildings [6]. To ensure the stability of buildings in the event of earthquakes they used simple but carefully considered building methods. A primary reason for the stability of buildings was the use of elastic building materials and constructions (e.g. foundation pads, layers of reed laid upon the foundations, sometimes at two levels of the building etc.). For instance, in the mausoleum of Ali-Sultan in Kunja-urgentsch the reed bedding was laid in the fifth course of brickwork above the surface of the earth. A high-level reed layer was used as an anti-seismic measure in a nameless mausoleum in Tchor-Bachr [6]. This softened the effect of an earthquake on the rigid construction of the building. This method was used unchanged for many hundreds of years.

Legends tell the story of the building of the fortress of Itschan-Kala in Choresm. The story tells of the application of hot air passed through internal channels until the material sintered. This process of thermal stabilisation hardened the material of the construction and increased its durability [6].

One of the most common reasons for the premature deterioration of buildings made of earth is a too high concentration of salts in the earth, as well as moisture in the footings or rainfall. Further aspects which have a negative effect on the permanence of an earthen building include movement in the subsoil, strong seismic activity and poor design and execution of the building. Using appropriate construction methods and with appropriate functions, monolithic earthen buildings can last hundreds of years and more.

The rapid industrialisation of the building process and the widespread use of reinforced concrete have displaced the use of the earthen materials in commercial buildings. Earthen building materials are however still used for private dwellings to a small degree although some elements are now also industrially produced. This has led to a gradual forgetting of traditional experience with earthen building materials.

The need to ensure earthquake resistant methods of building with earth is becoming ever more relevant as new land in earthquake-prone areas is made available for building upon (e.g areas around Buchara, Nawoj, Samarkand, Tashkent city and surroundings). Private dwellings are even being erected in zones with earthquake intensities of 9-10, inappropriate conditions from an engineering geology point of view.

In addition, little attention has been paid to ensuring the earthquake stability of private houses in traditional methods. The lack of scientific research into the earthquake stability of such build-

Nr.	Wall material	Built	Floor area (m)	Degree of earthquake intensity	Free oscillation period	
					Transverse	Longitudinal
1	Pachsah	1988	13.8 × 19.6	8	0.14	0.12
2	Pachsah	1991	12 × 15	8	0.12	0.11
3	Pachsah	1989	16 × 20	8	0.15	0.12
4	Pachsah	1990	12 × 15	8	0.13	0.11
5	Pachsah	1992	12.3 × 18	8	0.14	0.11
6	Lehmsteine	1989	12 × 13	8	0.12	0.11
7	Pachsah	1989	10 × 12.4	8	0.14	0.12
8	Pachsah	1990	15 × 18	8	0.15	0.12

TABLE 1 Results of micro-seismic measurements taken on monolithic earthen buildings using the Pachsah technique

Anordnung von Schilfeinlagen zwischen den Pachsah-Blöcken  
Arrangement of reed reinforcement between Pachsah-blocks

Die Gewährleistung der Erdbebenbeständigkeit von Lehmbauwerken aus Pachsa wird im Zusammenhang mit der intensiven Erschließung von Neuland u.a. in Regionen mit hoher Erdbebenintensität (Gebiete von Buchara, Nawoj, Samarkand, Taschkenter Gebiet und Stadt Taschkent) immer aktueller. Private Wohngebäude werden sogar in Zonen mit Erdbebenintensitäten von 9-10 und unter ungünstigen ingenieurgeologischen Bedingungen errichtet.

Außerdem hat man der Gewährleistung der Erdbebenbeständigkeit von Privathäusern in traditionellen Bauformen bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Das oben Gesagte wird bekräftigt durch das Fehlen wissenschaftlicher Untersuchungen zur Erdbebenstabilität von Wohngebäuden aus lokalen Baustoffen. Die meisten wissenschaftlichen Arbeiten konzentrieren sich auf ingenieurtechnische Untersuchungen zu Schadensbildern der Gebäude aus lokalen Baustoffen nach starken Erdbeben. Dabei sind die Bedingungen für die Errichtung von Privathäusern aus lokalen Baustoffen derzeit besonders günstig.

Selbst bei Verstärkung durch effektive antiseismische Maßnahmen sind Gebäude aus Massivlehm nicht in der Lage, Erdbeben der Stärke 9 zu widerstehen. Deshalb ist in Regionen mit Erdbebenintensitäten 9 der Bau dieser Gebäude nicht zu empfehlen. Ihre Schwachstellen sind die Hausecken und Anschlüsse der Längs- und Querwände. Die Verstärkung dieser Schwachstellen erhöht die Gesamtsteifigkeit des Gebäudes. Deshalb empfehlen die Fachleute, die schwachen Gebäudeteile mit Einlagen aus Schilf, Reisig, Stroh u.a. zu verstärken.

Zur Ermittlung des tatsächlichen Spannungs-Verformungszustandes sowie der dynamischen Parameter an üblichen, thermisch verfestigten Wänden aus Pachsa sowie zum Vergleich dieser Angaben mit theoretischen Ergebnissen, wurden 1996 an der Hochschule für Architektur und Bauwesen Taschkent, Lehrstuhl "MD und PS" von Isabajew experimentelle Untersuchungen an massiven Lehmwänden ausgeführt [8]. Im Ergebnis dieser Versuche wurde festgestellt, dass die thermische Verfestigung der Lehmwände die Steifigkeit der Konstruktionen erhöht.

Für die Wiederherstellung der Tragfähigkeit von beschädigten Bauteilen von Lehmgebäuden aus Pachsa werden folgende konstruktive Verfahren der Bauwerksertüchtigung empfohlen:

- Ersetzen der stark beschädigten Konstruktionsteile durch neue;
- Aufstellung von Holzskeletten aus Kanthölzern und Bohlen an beiden Seiten der beschädigten Wände;
- Montage von senkrechten Stahlrahmen aus Winkeleisen und Bügeln aus Flach- oder Rundstahl;
- Zur Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung zwischen den Wänden in senkrechter Richtung werden Stahlbandagen sowohl an der äußeren als auch an der inneren Seite auf der Ebene der Geschossdecke angebracht.
- Die Verstärkung eingeschossiger Gebäude mit fehlerhaftem Konstruktionsschema wird in der Regel mit Hilfe von äußeren Widerlagern aus gebrannten Ziegeln in Zementmörtel ausgeführt.
- Injektion von Zementmörtel und/oder Polymerharzen in die Risse;
- Veränderung des Berechnungsschemas des Bauwerkes unter Einbeziehung der nachträglich angebrachten Verstärkungen.

Die oben genannten konstruktiven Verstärkungen geschädigter Gebäude bewährten sich bei der Überwindung der Erdbebenfolgen in Taschkent (1966) [3], Petropawlowsk-Kamtschatsk (1971), Isfar-Batkensk (1977) [7] und Gasli (1976 und 1984) [4].

### Schlussfolgerungen und Empfehlungen

1. Die Analyse der Baustoffe von durch starke Erdbeben geschädigten oder zerstörten Gebäuden erlaubt die Feststellung, dass massive Lehmgebäude aus Pachsa starken Erdbebeneinwirkungen nicht widerstehen können. Werden Bauwerke aus Pachsa nicht durch spezielle konstruktive Maßnahmen verstärkt, können sie sogar bei Erdbeben der Stärke 7 erheblich beschädigt werden.
2. Die Ergebnisse der ingenieurtechnischen Analyse der Folgen von den starken Erdbeben gestatten es, das Maß der Beschädigungen eines Gebäudes zu bewerten und die seismische Gefährdung qualitativ über den Schadensgrad auszudrücken.
3. Die Analyse der Ergebnisse von realen Untersuchungen an den Lehmgebäuden mittels der beschriebenen Messtechnik zeigt, dass die Reduzierung der Steifigkeit und die Vergrößerung der Verformungen des Gebäudes bei Einwirkung von schwachen Erdbeben der Stärke 4-6, darunter auch bei technischen Einwirkungen der Stärke 3, 41% betragen.

ings proves this point. Most research concentrates on the engineering assessment of building damages as a result of earthquakes. The use of local building materials for the construction of private dwellings is however most opportune.

Even with reinforcement using effective anti-seismic measures, buildings made of earth are not able to withstand earthquakes with an intensity of 9. It is therefore quite simply not recommended to build such buildings in regions potentially subject to this intensity of earthquake. The weak points are the junctions between walls, at the corners and joins between internal and external walls. Strengthening these junctions helps contribute to the rigidity of the entire building. Experts suggest that weak parts of the building should be strengthened through the insertion of reed reinforcements, brushwood, straw etc.

In 1996 a series of experiments were initiated to determine the tensile forces and deformations as well as the dynamic parameters of thermally-strengthened walls made with Pach-sah. The experiments were conducted by Isabajew at the chair "MD and PS" at the School of Architecture and Building Construction in Tashkent. The results of these tests described how the thermal strengthening of earthen walls increases their rigidity and ability to withstand seismic activity.

In order to improve the structural stability of damaged building elements made of earth using the Pach-sah technique, the following improvement measures are recommended:

- replacement of heavily damaged constructions,
- erection of a bracing timber-frame structure on both sides of a damaged wall,
- the application of vertical steel frameworks of angle irons and flat or round steel plates
- to ensure a direct connection between walls in vertical direction, steel connecting bands should be applied internally as well as externally spanning between storeys.
- The strengthening of single-storey buildings of poor construction is usually achieved through the addition of abutments made of fired-brick in cement mortar.
- Injection of cement mortar / polymer resins into the cracks,

The employment of such reinforcement strategies for damaged buildings has proven successful in the past, for instance in sur-

viving the earthquakes in Tashkent (1966, source 3), Petropaw-lowsk-Kamtschatsk (1971), Isfar-Batkensk (1977, source 7) and Gasli (1976 and 1984) (4).

### Conclusion and recommendations

1. An analysis of the building materials of buildings heavily damaged by earthquakes suggests that monolithic earthen buildings made with Pach-sah are not able to withstand very severe earthquakes. If Pach-sah buildings are not additionally stabilised by the application of appropriate reinforcement measures, they can be severely damaged by earthquakes of the intensity grade 7.
2. The results of engineering analyses of the consequences of strong earthquakes allows us to assess the level of damage to a building and to express its seismic vulnerability in terms of the degree of damage sustained.
3. The analysis of real investigations on earthen buildings using measuring techniques as described above, show that a 41% reduction in rigidity and increased deformation of a building can occur as a result of comparatively weak earthquakes with a strength of 4-6.

### Reference literature

- [1] Grajdankina, N. S.: Drevnie stroitelnie materialy Usbekistana (Historische Baustoffe Usbekistans). In: „Stroitelnie materialy Usbekistana (BaustoffeUsbekistans)“. Taschkent, 1951, p. 5-37.
- [2] Rusiew, K. I.; Hadjiew, I. M.: Usilenie architekturnich glinosirzowich pamajatnikow (Konstruktive Verstärkung von Baudenkmalen aus Lehmsteinen); Usbekiston architekturna edgorliklarini asrasch muam-molari bujitscha ilmij-amalij konferenziy. Taschkent, 2003, p. 16-17
- [3] Abduraschidow, K. S.: Reale Untersuchungen der Schwingungen von Baukonstruktionen und die Art ihres Wiederaufbaus; Verlag "Fan", Taschkent 1974, p. 216.
- [4] Abduraschidow, K. S.; Wedernikow, A. A.; Habilow, B. A. u.a.: Die Folgen des Erdbebens in Gasli; "Baukunst und Bauwesen in Usbekistan", 1984, Heft 8, p 12 - 17.
- [5] Abdukarimow, Z.: Die Folgen des Erdbebens in Nasarbek. In "Erdbeben von Nasarbek vom 11 Dezember 1980"; Verlag "Fan", Taschkent, Us.S.S.R, 1984, p. 133 - 142.
- [6] Batschinski, N.M.: Antiseismische Maßnahmen in den Baudenkmalen Mittelasiens. M. L., 1949.
- [7] Hamburg, J. A.; Rshewski, B. A.; Zipenjuk, J. F.; Schirin, W.W. u.a.: Ingenieuranalyse der Folgen des Erdbebens vom 31 Januar 1977 bei der Stadt Isfara; "Bauwesen und Baukunst in Usbekistan", 1977, Heft 9, p. 39-41.
- [8] Isabajew, S.U.: Festigkeit und Erdbebenstabilität von massiven Lehm-wänden; Autorreferat zum Erwerb des akad. Grades Kandidat der technischen Wissenschaften, Taschkent 1996.