

Neue Stampflehmprojekte in Thüringen

Stampflehm in Deutschland heute

Konstruktionen aus Stampflehm galten nach der Wiederbelebung des Lehmbaus in Deutschland ab 1980 lange Zeit als zu arbeitsintensiv und deshalb in der Ausführung zu teuer. Komplizierte Genehmigungsverfahren für tragende Konstruktionen aus Stampflehm, aber auch bauphysikalische Anforderungen vor allem im Bereich des Wärme- und Erosionsschutzes im Außenwandbereich lassen Architekten und Planer heute in der Regel vor diesem Material zurückschrecken. Hinzu kommt, dass das Materialverhalten von Stampflehm unter Belastung, z. B. im Vergleich zu Beton, wenig erforscht ist.

Erste Versuche mit Stampflehm im Zuge der Lehmbau-Renaissance in Deutschland gab es in den Jahren 1986-89 in der ehemaligen DDR mit Projekten, die durch die damalige Hochschule für Architektur und Bauwesen in Weimar und die Bauakademie der DDR in Berlin realisiert wurden [1, 2]. Die Zielstellungen dieser Projekte mögen uns aus heutiger Sicht sonderbar erscheinen: Zum einen sollte die äußerst angespannte Baustoffsituation der DDR durch einen zusätzlichen, nicht „bewirtschafteten“ Baustoff entlastet werden. Zum anderen bestand die Hoffnung, durch den Export von Lehmbau know-how in Entwicklungsländer dringend benötigte Devisen zu erwirtschaften. Mit dem Untergang der DDR hatten sich auch beide Zielstellungen erledigt.

Anfang der 1990er Jahre kamen Impulse für den Stampflehm in Deutschland aus einer anderen Richtung: Lehm-Ton-Erde ist auch heute noch das Programm der Arbeiten von Martin Rauch. Er zeigt als Künstler, wie man mit Stampflehm auch in Kombination mit Materialien wie Beton, Stahl, Glas, Holz und in Verbindung mit plastischer und farbiger Gestaltung eine zeitgemäße Architektur schaffen kann. Die archaische Struktur einer unverputzten Stampflehmoberfläche im Innenraum fasziniert durch ihre ganz eigene Ästhetik. Projekte wie die inzwischen im Lehmbau weltbekannte Kapelle der Versöhnung in Berlin [3] sind dafür ein Beleg.

Zwei Beispiele für aktuelle Stampflehmprojekte aus Thüringen zeigen, wie sich dieses Material in der modernen Architektur seinen Platz erobert. Die Entwürfe zu den Projekten „Himmelsleiter“ in Nordhausen und „Andacht Zentralklinikum Suhl“ stammen vom Architekturbüro Dr. Worschech & Partner, Erfurt. Die statische Berechnung erstellte das Ingenieurbüro Bauwesen Dr.

Quellmalz, Nordhausen. Die Bauausführung realisierte die Firma Jörg Zimmer, Werninghausen/Thür. Die Fachplanung Lehm-bau hatte in beiden Projekten Dr. Schroeder, Bauhaus-Universität Weimar übernommen. Dazu gehörte die Festlegung der Materialqualitäten und Prüfprozeduren für die Ausschreibung sowie Auswertung der Ergebnisse der Bauüberwachung [5, 6].

Die Stampflehmmischungen wurden nach Vorgaben des Fachplaners von der Firma Thilo Schneider, Kleinfahner/Thür. hergestellt und geliefert, die geforderten Laborprüfungen durch die IHU Nordhausen ausgeführt. Die in beiden Projekten vorgesehene Verarbeitung farbiger Lehme machte es erforderlich, entsprechend geeignete Baulehme zu identifizieren. Nach den Vorgaben des Architekten waren dies die Farbtöne hellocker, dunkelocker und ziegelrot.

Projektbeschreibungen

Himmelsleiter Nordhausen

Die „Himmelsleiter“ (nun „Neue Lesserstiege“) ist ein Projekt, das im Rahmen der Thüringer Landesgartenschau 2004 realisiert und im April 2004 zur Nutzung übergeben wurde. Bauherr war die Stadt Nordhausen.

Die „Himmelsleiter“ schafft eine neue Verbindungsachse von einem als Amphitheater gestalteten Platz an der Bahnhofstraße zur höher gelegenen Altstadt und durchschneidet dort die Stadtmauer. Sie überwindet dabei mittels einer Stahltreppe auf einer Länge von etwa 26 m einen Geländesprung von ca. 9,5 m. (Abb. 1)

Die Treppe besteht aus einer selbsttragenden Stahlkonstruktion, die bis zur Höhe des Treppenlaufs durch 0,5 m starke Seitenwände aus Stampflehm eingefasst und an der Geländekrone durch eine 1,1 m lange Stirnwand, ebenfalls aus Stampflehm, abgeschlossen wird. Etwa in den Drittelpunkten der Wandlänge ist jeweils ein Podest von 2,5 m Länge eingeschaltet. Die Mauerkronen der Seitenwände aus Stampflehm erhalten dadurch 4 Knickpunkte sowie einen fünften nach Erreichen des höchsten Geländepunktes (Abb. 2).

Im oberen Drittel der Wandlänge unter dem 2. Podest werden beide Stampflehmwände von je einer 2,6 m breiten und 3,5 m

New rammed earth projects in Thuringia, Germany

Rammed earth in Germany today

Even after the renaissance in building with earth in the early 1980s, rammed earth was still viewed as being excessively labour-intensive and therefore too expensive. Complicated building control and approval procedures for rammed earth constructions as well as hygro-thermal requirements, particularly with regard to thermal properties and protection against erosion when used outdoors, have contributed to scepticism among architects and planners. In addition, the structural performance of rammed earth under compression is, as yet, not as well documented as, for example, that of concrete.

Initial tests with rammed earth were undertaken between 1986 and 1989 at the Hochschule für Architektur und Bauwesen in Weimar and the Bauakademie in Berlin in the former DDR [1, 2]. The motives behind these two initiatives were unusual in today's terms: Firstly, the projects were intended to investigate means of alleviating the bottleneck in building supplies in the DDR through the development of a non-industrial building material. Secondly, the state hoped to be able to export earthen building know-how to developing countries as a means of generating desperately needed foreign income. The downfall of the DDR put an end to both these motives.

At the beginning of the 1990s, new impulses in rammed earth came from another direction: "Lehm – Ton – Erde" is the calling card of the Austrian Martin Rauch. As an artist, he showed how the plastic and textural colour of rammed earth could be used in combination with materials such as concrete, glass, steel and wood to create a contemporary architectural expression. The archaic structure of exposed rammed earth has a fascinating and individual aesthetic, whether employed indoors or outdoors. Many projects have followed, most notably the Chapel of Reconciliation in Berlin [3].

Two current examples of rammed earth projects have been and are being built in Thuringia in Germany and testify to the current high level of interest in this material. The design of both projects, the "Himmelsleiter" (the stairway to heaven) and "Andacht Zentralklinikum Suhl" (prayer room at Suhl Central Clinic), originate from the architectural office Dr. Worschech & Partner in Erfurt supported by the structural engineers Dr. Quellmalz in Nordhausen. The projects were executed by the earthen builder Jörg Zimmer from Werninghausen in Thuringia.

Dr. Schroeder from the Bauhaus-Universität Weimar acted as technical consultant for both projects. This included determination of material quality and specification, as well as developing testing procedures for the tendering/specification and the accompanying assessment of on-site construction [5, 6].

The rammed earth mixture was prepared according to the consultant's specification by Thilo Schneider in Kleinfahner, Thuringia and laboratory testing was carried out by the IHU in Nordhausen. The envisaged use of coloured earth mixtures made it necessary to identify suitable coloured earthen mixtures: light ochre, dark ochre and brick-red were specified by the architects.

Project descriptions

The "Himmelsleiter" in Nordhausen, Thuringia, D

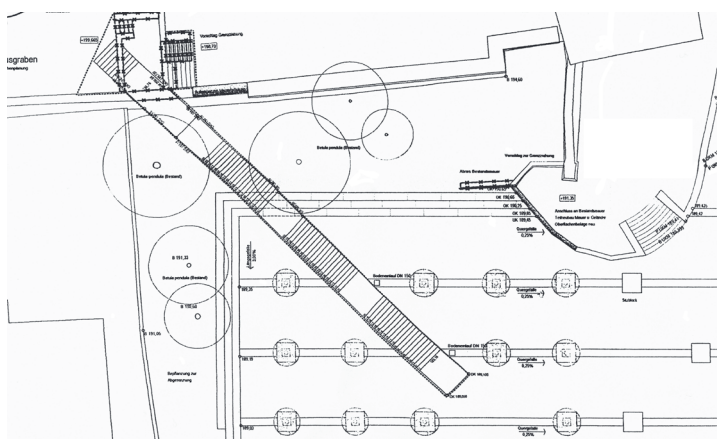
The "Himmelsleiter" (stairway to heaven), now rechristened the "Neue Lesserstiege", is a project which was built in preparation for the federal state horticultural exhibition in 2004 and was handed over to the client, the town of Nordhausen, in April 2004.

The "Himmelsleiter" connects an amphitheatre-like square adjacent to the Bahnhofstraße to the old town located on higher ground, cutting through the old city wall at its highest point. The stairway itself is a steel construction approximately 26 metres long which bridges a height difference of 9.5 metres (Fig. 1).

The self-supporting steel structure is clad on both sides by 50cm thick rammed earth walling and at the end by a 1.1 metre long end wall also made of rammed earth. The stairway is split into three flights with two landings in-between, each 2.5 m in length. The upper surface of the rammed earth walls changes inclination 5 times in all, 4 times as a result of the landings with an additional change from incline to flat at the very top of the stair (Fig. 2).

An opening, 2.6m wide by 3.5m high, is 'sliced' out of the stair walls at an angle of 45° roughly beneath the 2nd landing. The opening is clad on all sides with steel panels, with the wall continuing above the embedded steel lintel.

The rammed earth walls rest upon 60 cm deep strip foundations of water impervious concrete. Towards the rear of the stair, the foundation is stepped upwards following the natural topog-



hohen Öffnung durchschnitten. Die Achse des auf diese Weise gebildeten Durchgangs ist zur Achse der Stahltreppe um 45° geneigt. Die Öffnung ist als vollständig mit Stahlplatten umschlossener Durchgang, die Öffnungsüberdeckung als in Stampflehm eingebetteter Stahlbetonsturz ausgebildet.

Die Stampflehmwände stehen auf Streifenfundamenten mit einem ca. 0,6m hohen Sockel aus wasserdichtem Beton. Etwa ab dem 2. Podest folgt das Fundament dem natürlichen Geländeanstieg zur Altstadt durch Abtreppungen. Dadurch erreicht die Höhe der Stampflehmwände ein Maximum von 5,6m vor dem 2. Podest.

Zunächst wurde die Stahltreppe als selbst tragende Konstruktion ohne die Stufenbleche errichtet (Abb. 3). Anschließend erfolgte die Ausführung der Stampflehmwände, die die Treppenkonstruktion vollständig verhüllen. Die auf die Lehmwände einwirkenden Windlasten werden als Horizontalkräfte über waagrecht eingebaute und durch Rundstähle im Lehm verankerte Stahlbleche auf die Treppenkonstruktion übertragen. Durch die vertikale Beweglichkeit der Anschlüsse können Setzungen der Lehmwände als Folge der Austrocknung zwangungsfrei ausgeglichen werden.

Auf diese Weise wird die in den Lehmregeln [4] geforderte „Ringbalken- bzw. Deckenwirkung“ für horizontal in Ansatz gebrachte Windlasten realisiert. Die Einbauhöhen der horizontal angeordneten Stahlbleche berücksichtigen die maximal zulässigen Geschosshöhen gemäß [4]. Mit dieser Art der Verankerung wird erreicht, dass das Bauvorhaben „Himmelsleiter“ in den Gültigkeitsbereich der Lehmregeln [4] fällt und aus baurechtlicher Sicht die Einholung einer „Zustimmung im Einzelfall“ nicht notwendig ist. Auch die Festlegung der erforderlichen Prüfungen des Stampflehms ist dadurch nach [4] möglich.

Ein besonderer gestalterischer Aspekt wird durch die Verwendung farbiger Lehme erzielt, die nach Vorgabe des Architekten in eine ockerfarbige Grundmasse eingebettet sind.

„Andacht“ Zentralklinikum Suhl

Im Rahmen von Um- und Erweiterungsbaumaßnahmen am Zentralklinikum Suhl ist der Neubau eines fünfgeschossigen Bettenhauses vorgesehen, in dessen Erdgeschoss ein Andachtsraum

als separater, in Stampflehmabauweise auszuführender Baukörper integriert ist.

Das Besondere an dem Baukörper ist neben der Materialsprache seine Grundrissform: ein Ei als Symbol des Lebens, das sich in eine Wandkonstruktion umgesetzt als Spirale mit unterschiedlichen Krümmungsradien vom Kern nach außen entwickelt. Die Krümmungsradien der Spirale korrespondieren mit den Wandstärken des Baukörpers: die am engsten gekrümmten Bereiche weisen die größten Wandstärken auf, bis max. ca. 1,70m gegenüber ca. 0,45m an der schmalsten Stelle (Bild 4).

In die Bereiche mit den größten Wandstärken sind Aussparungen zur Aufnahme technischer Ausrüstungen eingelassen, sowie Nuten für eingeschobene Sitzbänke. In die Wände aus Stampflehm sind die Stahlbetonstützen der allgemeinen Tragstruktur des Bettenhauses eingebunden, allerdings vom Raster abweichend der Linienführung der Spirale angepasst.

Durch drei raumhohe, fest verglaste Wandöffnungen wird der äußere Spiralring, der den „Raum der Begegnung“ umgibt, natürlich belichtet. Der Spiralkern, der den „Raum der Stille“ umhüllt, erhält natürliches Licht durch eine ebenfalls raumhohe Wandöffnung, die in einer Achse mit der mittleren der drei Öffnungen der Außenwand liegt. Diese Achse X-X bildet zugleich die Längsachse des „Eis“ im Grundriss. Auf der Querachse Y-Y liegen die beiden anderen Öffnungen in der Außenwand einander gegenüber. Ein „Durchblick“ wird jedoch durch den Spiralkern verdeckt. Durch dieses „Lichtkreuz“ erhält der mit der Längsachse X-X nach SW gedrehte Baukörper einen den ganzen Tag über veränderlichen natürlichen Lichteinfall.

Die Wände der Spirale bilden einen Wandelgang, der vom „Raum der Stille“ in ihrem Kern über den „Raum der Begegnung“ nach außen in das in diesem Bereich in Stützen aufgelöste Erdgeschoss des Bettenhauses führt (Ebene F). Unter dem Erdgeschoss befindet sich eine Kellerebene G, in dem die Technikzentrale untergebracht ist. Das Niveau der Stahlbetondecke des Kellergeschosses wurde im Bereich des Stampflehmabaukörpers gegenüber der Ebene F (Erdgeschoss) um 1,26m abgesenkt, um dem Fußboden des Wandelgangs, der ebenfalls in Stampflehm ausgeführt wird, eine Neigung geben zu können, die durch variable Höhen der Unterbettung erreicht wird. Die vom Niveau die-

1 Projekt „Himmelsleiter“ Nordhausen, Lageplan
Project: „Himmelsleiter“ Nordhausen, Plan, Thuringia, D

2 Projekt „Himmelsleiter“ Nordhausen, Juli 2004
Project: „Himmelsleiter“ Nordhausen, Thuringia, D, July 2004



raphy of the site. The highest section of rammed earth wall is therefore 5.6 metres high, shortly before the 2nd landing.

The steel structure of the stairway was erected first as a self-supporting construction without the stair treads (Fig. 3). The rammed earth walls were then constructed in a second step and began gradually to enclose the steel construction. Horizontal wind loads are transferred from the wall to the steel structure via horizontal steel plates anchored in the rammed earth walls via round steel bars. Where materials meet, an open movement joint allows for the wall to settle without constraints as it dries.

These plates form the equivalent of the “ring beam or horizontal bracing” as stipulated in the Lehmbau Regeln [4]. The height at which the horizontal plates are included is in accordance with the maximum permissible storey height [4]. This combination of measures to ensure structural stability means that the “Himmelsleiter” fulfils the stipulations given in the Lehmbau Regeln [4] and thus avoids the need to obtain “special building permission” from the building control authorities. This also means that the necessary testing procedure for rammed earth can also be undertaken according to the Lehmbau Regeln.

A particular aesthetic effect was achieved with this project through the embedding of coloured earth striations within the ochre-coloured base colouring.

The “prayer room” at Suhl Central Clinic

As part of the conversion and extension of the Central Clinic in Suhl, a five story bedding wing has been built which is raised on columns from the ground. A separate freestanding prayer room is to be constructed in rammed earth at ground level.

In addition to its materiality, what is also special about the prayer room is its form: it has a loosely egg-shaped form, symbolising the source of life, which unwinds from within as a spiral with continually changing radii. The radii correspond to the changing thickness of the wall: areas with the tightest radii have the largest wall thickness (up to max. thickness 1.70 m) compared to gently curving sections with a thinner wall thickness of 45 cm (Fig. 4).

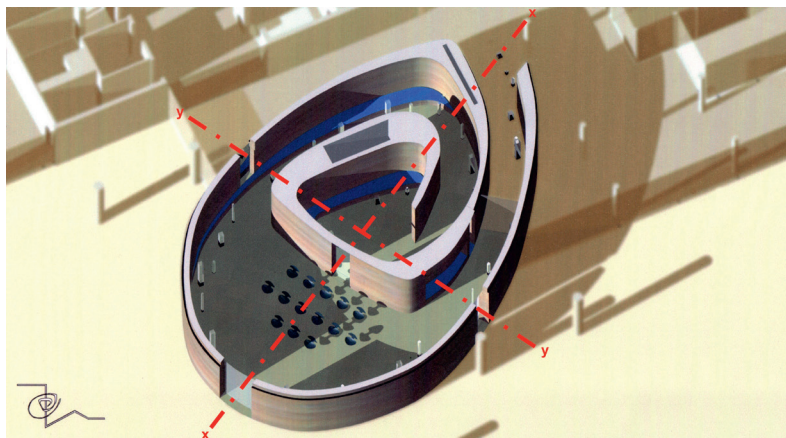
Hollow sections within the thickest portions of the wall are designed to accommodate technical infrastructure and slots are to be left into which seating benches will be inserted. The reinforced concrete columns of the five-storey building structure are shifted slightly off grid so as to be enclosed entirely by the rammed earth walls of the prayer room and the entire volume of the prayer room is rotated in a SW direction.

Three room-height fixed glazed openings in the outer part of the spiral which encloses the “communal space” provide natural lighting. The core of the spiral, the “room of stillness”, receives light from a further room-height opening in the same axis as the one of the outer openings. These openings are arranged on the longitudinal X-X axis of the “egg”, the other two openings are in the outer spiral along the transverse Y-Y axis, though the view along the transverse axis is interrupted by the core of the prayer room. This “cross of light” provides continually changing natural lighting throughout the day.

The walls of the spiral form a “perambulatory” leading from the “room of stillness” at its core outwards through the “communal space” to the entrance/exit at ground level beneath the new bedding wing of the clinic (level F). An underground storey (level G) houses the technical installations for the wing. The reinforced concrete floor in the area beneath the prayer room has been lowered an additional 1.26 metres in order that the floor of the “perambulatory”, which is also to be constructed of rammed-earth, can be given a gentle but perceptible inclination. The height of the spiralling rammed earth walls from this lowered floor level is 4.43 metres.

The length of the centreline of the “perambulatory” from its deepest point in the “room of stillness” to the entrance is 47 metres with a height difference of 1 m, which corresponds to an inclination of 2%. Furthermore, the floor of the “perambulatory” is also inclined in cross-section inwards towards the centre of the “egg”. This inclination is also continued in both wider spaces, i.e. the “room of stillness” and “communal space”.

The prayer room is to be built after the structural skeleton of the rest of the building has already been erected. As a result it is not possible to realise the full height of the walls in rammed earth. The uppermost section of the wall (approx. the last 70 cm



ser Stahlbetondecke aufgehende Lehmwand-„Spirale“ hat eine Höhe von 4,43 m.

Die Länge der gedrehten Lauflinie des Wandelgangs vom tiefsten Punkt im „Raum der Stille“ bis auf das Niveau der Ebene des Erdgeschosses beträgt ca. 47 m und überwindet dabei eine Höhendifferenz von 1 m, was einem Gefälle von 2% entspricht. Der Wandelgang selbst ist im Querprofil entlang der gesamten Lauflinie als gedachte Längsachse nochmals geneigt, und zwar mit Gefälle zur jeweiligen Innenwand des Gangs, oder, wenn man der Lauflinie vom tiefsten Punkt nach außen folgt, von rechts nach links. Die Fußböden der beiden durch den Wandelgang verbundenen Räume der „Begegnung“ und „Stille“ sind in diese Neigung einbezogen.

Vom Bauablauf her wird der Baukörper in die Ebene F des bereits fertiggestellten Stahlbetonrohbaus eingefügt. Eine Ausführung der Wände in Stampflehm über die volle Geschosshöhe ist deshalb technologisch nicht realisierbar. Aus diesem Grund wird die Mauerkrone ab ca. 70 cm unter der Stahlbetondecke der Ebene F als Lehmsteinmauerwerk ausgeführt. Dieser Bereich ist durch eine abgehängte Decke aus Lehmplatten verdeckt. Die Stürze der raumhohen Wandöffnungen liegen ebenfalls in dieser Ebene und werden durch die abgehängte Decke verhüllt. Sie werden aus lehmummanteltem Stahlbeton hergestellt.

Generelle Anforderungen an Bauteile aus Stampflehm

Stampflehm ist „erdfeucht“ aufbereiteter Lehmbaustoff mit einer Bindekraft der Kategorie „mindestens mager“ und in der Zusammensetzung „gemischtkörnig bis steinig“ [4]. Die Eigenschaften „Bindekraft“ und „Körnung“ kann der Baulehm bereits in sich vereinen, oder ein als Stampflehm nicht geeigneter Baulehm wird entsprechend modifiziert.

Die generellen Anforderungen an ein Bauteil aus Stampflehm sind im einzelnen in [4] genannt. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- hohe mechanische Stabilität, sichere Aufnahme der vorgesehenen Lasten
- Stabilität gegen Erosion
- Vermeidung von Schwindrissen bei der Austrocknung sowie Minimierung des vertikalen Schwindmaßes

Für den Fall max. Wandhöhe > 4 m sind folgende Nachweise für den Stampflehm zu führen:

- Schwindmaß
- Druckfestigkeit (ohne Hinweis auf Alter des Prüfkörpers).

Für „tragende“ Wände aus Stampflehm wird darüber hinaus noch die Bestimmung der Bindekraft/Plastizität des Baulehms gefordert.

Ein Bauteil aus Stampflehm muss insbesondere auch ästhetischen Anforderungen genügen. Diese lassen sich nicht normativ regeln. Sie sind weitgehend durch die Vorgaben des Architekten bestimmt. Bei den vorliegenden Projekten waren dies Festlegungen zur farblichen Gestaltung und zur Schichtdicke der Stampflehm-lagen.

Spezifizierte Anforderungen für beide Projekte

Für beide Projekte wurden zwei Kategorien von Prüfungen festgelegt:

1. Eignungsprüfungen:

In einem Probewandabschnitt mussten vom Hersteller/Verarbeiter des Stampflehms dessen Eignung nachgewiesen und dazu folgende Materialeigenschaften ermittelt werden:

- Kornverteilung
- Rohdichte (Probe bei Einbauwassergehalt)
- Schwindmaß
- Trockendruckfestigkeit nach 6 Wochen (Normklima, keine künstl. Trocknung)

Abbildung 5 zeigt den Probewandabschnitt auf der Baustelle „Himmelsleiter“ in Nordhausen.

Für die verwendeten Baulehme wurde zusätzlich der Nachweis der Bindekraft/Plastizität gefordert. Aufgenommen wurde weiterhin der PROCTOR-Test.

Erst mit Einhaltung der vorgegebenen Kriterien wurden die Stampflehmmischungen zum Einbau frei gegeben.



beneath the ceiling of level F) will therefore be realised as earthen brickwork and concealed by a suspended ceiling hung from the concrete floor above. Likewise the lintels of the room-height openings in the spiral walls are concealed by the suspended ceiling and will be made of reinforced concrete enclosed in earthen material.

General requirements for building elements executed in rammed earth

Rammed earth is a “moist” earthen mixture with a binding force with a category of “at least lean” and composition “mixed grain to stony” [4]. Certain earth types may have suitable “binding strength” and “grain distribution” properties as sourced, other less-suitable earth soils can be modified as required to fit the required material characteristics.

The general requirements for building elements made in rammed earth are described in detail in the Lehmbau Regeln [4] and can be summarised as follows:

- High mechanical stability, good load-bearing characteristics
- Good erosion resistance
- Low vertical shrinkage and low cracking susceptibility during drying out.

In the case of walls > 4 m high, the following must be monitored and ensured

- Degree of shrinkage
- Compression strength (without regard to age of test sample)

In addition, walls designed to bear loads must adhere to guidelines governing the binding strength/plasticity of the base earthen mixture.

Beyond these structural requirements, most rammed earth constructions which remain exposed must fulfil aesthetic criteria. These cannot be regulated using norms and are generally stipulated by the architect. In these two projects the architects specified colour variations within the earthen material as well as the thickness of rammed earth layers.

Specific requirements for both projects

For both projects, two categories of testing procedures were determined:



1. Material suitability:

The manufacturer/builder of the rammed earth wall must demonstrate the suitability of the material in a test wall section and provide details of the following material properties:

- Grain distribution
- Bulk density (tested at moisture content level during placing)
- Shrinkage
- Compression strength after 6 weeks drying (norm climate conditions, no artificial drying)

(Fig. 5) shows the test wall section on the site of the “Himmelsleiter” in Nordhausen.

For both cases the additional proof of binding strength/plasticity was required. In addition the PROCTOR test was carried out.

Only after demonstrating that the prescribed criteria could be fulfilled was the rammed-earth mixture used permitted for use in construction.

2. Building construction quality control:

In order to ensure quality levels during the building works, an accompanying test programme was devised and carried out. The building works were only accepted and handed over after the different criteria had been fulfilled and respective proofs provided.

All further details relate to the “Himmelsleiter” project in Nordhausen. At the time of writing, the prayer room in Suhl is still under construction (Fig. 6).

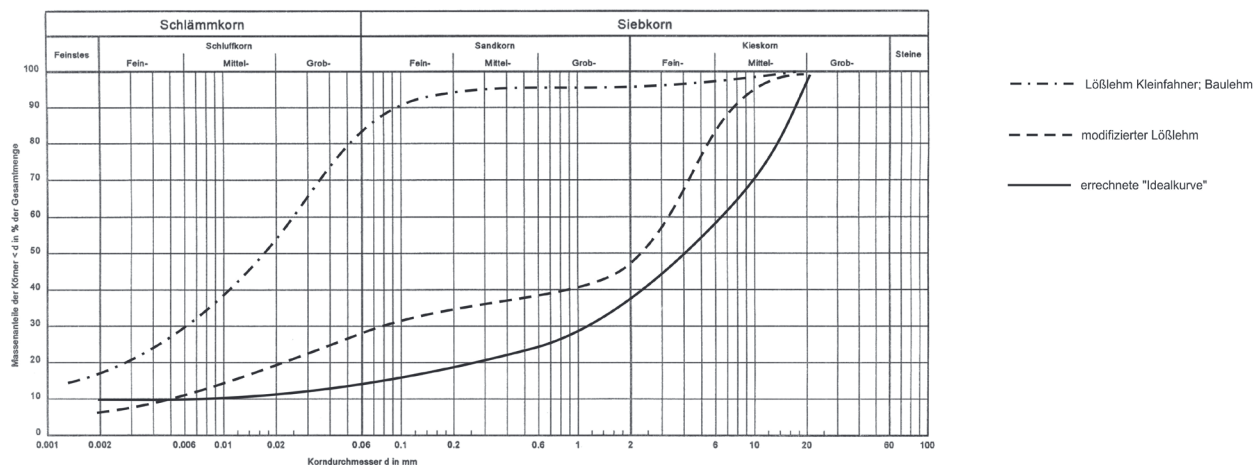
Material suitability

Grain distribution

Rammed earth must fulfil certain criteria with regard to material grain distribution and binding strength/plasticity in order to provide the necessary compression strength and erosion resistance once built. This is achieved through compaction of the earth mixture so that the finer grain material fills the cavities between the coarse grain material as tightly as possible, thereby ensuring the highest possible bulk density. Clay minerals within the finest grain fraction act as a binding agent for the larger particles. They are responsible for the material plasticity, which is

5 Projekt „Himmelsleiter“ Nordhausen, Probewand
Test wall made in preparation for the “Himmelsleiter” project in Nordhausen, Thuringia, D

6 Projekt „Andacht“ Suhl, Bauausführung August 2004
Construction works for the project: “Suhl Central Clinic Prayer Room”



2. Bauüberwachende Prüfungen:

Zur Überwachung der geforderten Einbauqualität des Stampflehms wurde ein baubegleitendes Testprogramm mit erforderlichen Prüfungen erarbeitet und ausgeführt. Erst mit Nachweis der vorgegebenen Kriterien galt das Projekt entspr. der Ausschreibung durch den Auftragnehmer als erfüllt.

Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf das Projekt „Himmelsleiter“. Das Projekt „Andacht Zentralklinikum Suhl“ befand sich zum Zeitpunkt der Manuskriptlegung noch in der Phase der bauvorbereitenden Prüfungen bzw. Bauausführung (Abb. 6).

Eignungsprüfungen

Kornzusammensetzung

Stampflehme müssen bzgl. der Materialparameter Körnung und Bindekraft/Plastizität die o.g. Kriterien erfüllen, um nach ihrer Verarbeitung die geforderte Druckfestigkeit und Erosionsstabilität im Bauteil zu gewährleisten. Dies wird durch entsprechende Verdichtung dann erreicht, wenn die kleineren Körnungen die Hohlräume, die von den jeweils größeren gebildet werden, möglichst vollständig ausfüllen und dadurch eine dichteste Teilchenpackung und damit größte Rohdichte erzielen. Die in der kleinsten Kornfraktion enthaltenen Tonmineralien bilden dabei das Bindemittel zwischen den gröberen Körnern. Sie verleihen der Arbeitsmasse plastische Eigenschaften, die von der Qualität und Quantität der Tonmineralien des Baulehms abhängen und mit der Bindekraft/Plastizität als Stoffparameter beschrieben werden.

Eine dem Modell der „dichtesten Teilchenpackung“ am ehesten entsprechende Kornzusammensetzung ist die von „gemischtkörnigen bis steinigen Lehmen (Berg- oder Gehängelehm)“ [4]. Bei den verfügbaren Baulehmen handelte es sich jedoch um magerer Thüringer Lößlehme mit typischem Überkorn in der Schlufffraktion und z.T. nicht ausreichender Bindekraft. Sie mussten deshalb durch Zugabe von Grobkorn im Sand- und Kiesbereich, z.T. aber auch durch Tonmehl, modifiziert werden. Zum Verfahren geben die Lehmbau Regeln [4] keinen Hinweis. Für die Kornzusammensetzung der Stampflehmmischungen beider Projekte wurde deshalb als Orientierung das für die Zusammensetzung der Zuschlagstoffe im Betonbau entwickelte, aber auch für Verdichtungsaufgaben im Erd- und Straßenbau übliche Modell der FULLER-Kurve gewählt.

Entsprechend den Vorgaben des Architekten kamen für das Projekt „Himmelsleiter“ drei unterschiedlich farbige Baulehme zum Einsatz: Baulehm ocker und dunkelocker aus der Lehmgrube Kleinfahner sowie Baulehm ziegelrot aus Gispersleben. Bei der Aufbereitung zu Stampflehm wurden diesen passend gefärbte Zuschläge im Sand - Mittelkiesbereich sowie Strohfasern zur Begrenzung von Schwindverformungen beigemischt.

In Bild 4 sind folgende Kornverteilungslinien gegenüber gestellt:

- 1 Baulehm hellocker (Lößlehm) aus der Grube Kleinfahner
- 2 modifizierte Stampflehmmischung hellocker (in den bauvorbereitenden Prüfungen nachgewiesen)
- 3 errechnete Idealkurve nach FULLER

Bindekraft/Plastizität

Die Lehmbau Regeln [4] lassen zur Beschreibung der Verarbeitungskenngrößen von Baulehmen zwei alternative Verfahren zu: die „Bindekraft“ nach NIEMEYER und die „Plastizität“ nach DIN 18122. Zwischen den Ergebnissen beider Verfahren bestehen korrelative Bezüge [7]. Als einzuhaltende Kriterien gelten danach:

- NIEMEYER: Bindekraft mindestens „mager“ bzw. $\geq 110 \text{ g/cm}^2$ oder
- DIN 18122: „leicht-mittel plastisch“ mit $w_L > 0,2$ und $< 0,35$; $I_p > 0,04$ und $< 0,2$ bezogen auf $d < 0,4 \text{ mm}$.

Obwohl in den Lehmbau Regeln [4] für „nicht tragende“ Wände aus Stampflehm – und um solche handelt es sich, abgesehen von den Windlasten, in beiden Projekten – ein Nachweis der Bindekraft/Plastizität explizit nicht gefordert wird, wurde diese Prüfung dennoch in das Testprogramm aufgenommen. Denn wie sonst soll die Forderung „Bindekraft mindestens mager“ für Baulehme überprüft werden.

Die drei verarbeiteten Baulehme wurden im akzeptablen Bereich für das Kriterium „leicht – mittel plastisch“ nach DIN 18122 nachgewiesen [8]:

Baulehm	w_L	I_p
ziegelrot	0,403	0,192
hellocker	0,424	0,235
dunkelocker	0,423	0,229

7 Kornverteilungslinien des Baulehms „hellocker“, der modifizierten Stampflehmmischung sowie der rechnerisch ermittelten fuller-Kurve

Grain distribution curves for the earthen mixtures "light ochre", the modified rammed earth mixture as well as the calculated fuller-curve.



dependent upon the quality and quantity of clay minerals within the original earth used. This is expressed through the material property binding strength/plasticity.

The grain distribution that comes closest to the ideal of “most densely packed particles” is the “mixed grain to stony earth” found in mountainous or hilly regions [4]. The earth sourced for these projects is, however, a relatively lean Thuringian loess soil which exhibits a typical over-proportion of silt content and partially insufficient binding strength. As a result the mixture needed to be modified by the addition of coarse sand and gravel particles on the one hand and a certain amount of powdered clay on the other. The Lehmbau Regeln [4] do not provide any guidelines for this. For the grain distribution for the rammed earth mixtures for both Thuringian projects, the model provided by the FULLER-curve was used as a guideline. The Fuller-curve was originally developed for describing the composition of aggregates in concrete as well as for earthworks and road building.

According to the architects' specifications, the “Himmelsleiter” uses earth mixtures in three different colours: light ochre and dark ochre from the earth pit in Kleinfahner and brick-red earth sourced in Gispersleben. These were used as the basis for the rammed earth mixture, to which appropriately coloured aggregates were added (sand-medium-grade gravel) as well as straw fibres to reduce shrinkage deformations during drying.

Figure 4 shows the grain distribution for:

- 1 Soil, light-ochre from the pit in Kleinfahner
- 2 Modified light-ochre rammed earth mixture (test mixtures from the preparatory phase)
- 3 Calculative ideal FULLER-curve

Binding strength/plasticity

The Lehmbau Regeln [4] allow two alternative approaches to describing characteristic values of earthen mixtures: the “binding strength” according to NIEMEYER and the “plasticity” according to DIN 18122. A correlative relationship exists between both approaches [7]. The necessary criteria are as follows:

NIEMEYER Binding strength must be at least “lean” $\geq 110 \text{ g/cm}^2$ or

DIN 18122 “light to medium plasticity” with $0.2 > w_L < 0.35$ and $0.04 > I_p < 0.2$ for $d < 0.4 \text{ mm}$.

Although the Lehmbau Regeln [4] do not foresee the necessity of determining binding strength/plasticity for non-load-bearing walls in rammed earth (excepting wind loads, none of the walls in either project are load bearing), this test procedure was incorporated into the test programme. How else can the necessity of “binding strength must be at least lean” be otherwise determined?

For each of the three sourced earths, the criteria “light to medium plasticity” was fulfilled according to DIN 18122 [8]:

Sourced earth	w_L	I_p
Brick-red	0.403	0.192
Light-ochre	0.424	0.235
Dark-ochre	0.423	0.229

Shrinkage

According to the Lehmbau Regeln [4], the shrinkage experienced by rammed earth walls must not exceed 2%.

For each of the three prepared earthen mixtures, test samples were allowed to dry for 72 hours under norm climate conditions. A maximum shrinkage of $\leq 0.4\%$ was measured, far below the maximum level given in the Lehmbau Regeln.

Compression strength and bulk density

The ideal model of the “most densely packed particles” illustrates the relationship between the material characteristics “bulk density” and stability property “compression strength”: the smaller the pores between the individual grains in the mixture, the more tightly packed the particles are = the higher the bulk density and therefore the compression strength. In order to bring the particles as close to each other as possible, they must be compacted. The addition of water helps the particles shift into the “tightest” possible arrangement. Using the PROCTOR test (DIN 18127) it is possible to determine what water content levels are necessary to achieve the maximum bulk density for a specific degree of compaction and the maximum compression strength after drying out. The speed at which the mixture is allowed to dry determines the pattern in which the material gains in stability, and these are in turn dependent upon the drying conditions and the water content level at the time of building works. The permissible levels of compression strength as



Schwindmaß

Nach den Lehmbau Regeln [4] darf das Schwindmaß des verdichteten Stampflehms nicht mehr als 2% betragen.

Für die drei einbaufertigen Stampflehmmischungen wurden nach 72h Lagerung der Prüfkörper bei Normklima Schwindmaße von max. $\leq 0,4\%$ ermittelt. Diese Verformungen lagen damit deutlich unter den in [4] als Kriterium festgelegten.

Druckfestigkeit und Rohdichte

Das Modell der „dichtesten Teilchenpackung“ macht den Zusammenhang zwischen der Masse-Kenngröße „Rohdichte“ und der Festigkeits-Kenngröße „Druckfestigkeit“ deutlich: Je geringer der zwischen den Körnern gebildete Porenraum, desto größer die Rohdichte und desto größer auch die Druckfestigkeit. Um die Körner in die beschriebene Position zu bringen, ist eine Verdichtung der in die Schalung eingebrachten Stampflehmmischung notwendig. Durch Zugabe von Wasser wird dabei das Aneinandervorbeigleiten der Körner in die „dichteste“ Position erleichtert. Mit Hilfe des PROCTOR-Tests nach DIN 18127 kann für einen bestimmten Lehm bzw. eine Stampflehmmischung der Wassergehalt bestimmt werden, der bei definierter Verdichtungsarbeit die maximale Rohdichte und nach Austrocknung eine entsprechende Druckfestigkeit ergibt. Dabei ist der zeitliche Verlauf des Festigkeitszuwachses abhängig von der Austrocknungsgeschwindigkeit und diese wiederum vom Einbauwassergehalt und den Klimabedingungen. Die in [4] genannten zulässigen Druckfestigkeiten im Bauteil gelten für trockenen Stampflehm bei Restfeuchte oder „praktischem Feuchtegehalt“. Die dazu erforderlichen Trocknungszeiten werden an gleicher Stelle als „Erfahrungswerte“ angegeben. Sie liegen deutlich höher als bei Beton.

Für in der Ausführung befindliche Stampflehmkonstruktionen wäre danach ein Bauzustand denkbar, in dem die Pressung aus Eigenlast des noch nicht ausgetrockneten Stampflehms in der Wandsohle seine dort vorhandene Festigkeit überschreitet. Die Einschaltung einer „technologischen Pause“ würde dann notwendig. Sinnvoll könnte deshalb zusätzlich zur Langzeitfestigkeit nach 6 Wochen eine Prüfung der „Kurzzeitfestigkeit“ nach 7 Tagen sein.

In Laborprüfungen haben Dierks & Ziegert [9] nachgewiesen, dass selbst Schwankungen der Luftfeuchte und Frosteinwirkungen die Festigkeit des Stampflehms negativ beeinflussen können. Messungen des Austrocknungsverlaufes an realen Stampflehmkonstruktionen sind bisher nicht bekannt. Sie wurden für beide Projekte vorgeschlagen, konnten aus Kostengründen aber nicht realisiert werden. Im Rahmen von zur Zeit an der Bauhaus-Universität Weimar laufenden Untersuchungen zur zeitabhängigen Festigkeitsentwicklung von feucht eingebautem Stampflehm soll eine Vorstellung über die Qualität dieses Prozesses entwickelt werden (Abb. 8) [10].

Nach den Lehmbau Regeln [4] ist die Druckfestigkeitsprüfung an Würfelproben mit 20 cm Kantenlänge vorzunehmen. Der Einbauwassergehalt soll dabei dem auf der Baustelle entsprechen. Über die Art des Einbaus und der Verdichtung, aber auch über das Alter der Proben sowie das Verfahren der Trocknung werden keine Angaben gemacht. Wie oben gezeigt, ist aber gerade dieser Aspekt für die praktische Ausführung von Stampflehmkonstruktionen von Bedeutung.

Für die Herstellung der Probewürfel im Rahmen der Eignungsprüfungen wurden deshalb folgende Festlegungen getroffen:

- Kantenlänge Probewürfel 20cm
- Einbauwassergehalt wie auf der Baustelle
- Einbau des Stampflehms in drei Lagen, Verdichtung wie bei PROCTOR-Test
- nachzuweisende Würfeldruckfestigkeit des zu verarbeitenden Stampflehms nach [4]: $\geq 2\text{N/mm}^2$
- Prüfung nach Erreichen des praktischen Feuchtegehaltes nach [4] bei Normklima, ca. 6 Wochen Lagerung in Normklima zum Erreichen des praktischen Feuchtegehaltes, keine künstliche Trocknung.

Die Prüfergebnisse der Probewürfel zeigten für die nach der FULLER-Kurve modifizierten Mischungen hellocker, dunkelocker und ziegelrot die Einhaltung des Kriteriums der Druckfestigkeit von 2N/mm^2 bei Rohdichten von $1,85\text{g/cm}^3$. Die gleichen Mischungen verfehlten im nicht modifizierten Zustand das Festigkeitskriterium.

9 Witterungsschutzes für die Mauerkronen. Zu erkennen weiterhin ist das Stahlskelett mit Horizontalverankerung.

Weather protection of the wall coping. The steel construction of the stair is visible with the horizontal wall anchors.

given in the Lehmbau Regeln are for dry rammed earth or with a degree of remaining moisture (practical moisture content). The necessary drying times are given as “empirical values” and are considerably longer than those of concrete.

It is feasible that during the construction of rammed earth works, the situation could arise in which the self-weight load of the still moist rammed earth mixture exceeds the compression strength at the base of the construction. This would necessitate a “technological break” to allow the base to dry and attain greater stability. It would therefore be advisable to test for “short-term stability” after 7 days as well as the longer-term stability after 6 weeks.

Dierks and Ziegert [9] have proven in laboratory tests that variations in the relative air humidity and frost effects can have a negative influence on the stability of the rammed earth. Measurements of the pattern of drying out have, however, not been undertaken on real rammed earth constructions. These were suggested for both projects but rejected due to cost constraints. Current investigations at the Bauhaus-Universität Weimar into the temporal development of material stability for moist rammed-earth should provide a better idea of material quality levels during such processes. (Fig. 8) [10].

According to the Lehmbau Regeln [4], the compression strength is to be tested using a cube sample with an edge-length of 20cm. The water content level should match that of the conditions on site. The Lehmbau Regeln do not provide stipulations regarding the kind of application and compression nor the age of the samples or drying procedures. As explained above, this aspect is however of particular importance for rammed earth construction in practice.

For the creation of cube samples during material suitability test, the following conditions were determined:

- Edge length: 20 cm
- Water content: to match on-site conditions
- Application of rammed earth in three layers, compression according to PROCTOR-test.
- Sample compression strength should exceed $\geq 2\text{N/mm}^2$ according to the Lehmbau Regeln [4]

The test results fulfilled the above criteria in all the coloured mixtures when modified according to the FULLER-curve, with a bulk density of 1.85g/cm^3 . Test of all sourced earths without modification did not fulfil the criteria.

PROCTOR-Tests

In addition to the tests prescribed by the Lehmbau Regeln [4], three rammed earth mixtures were also tested according to the PROCTOR-test as given in the DIN 18127. This test enables the determination of the ideal water content at the point of construction which will result in a maximal bulk density when dry, ρ_{Pr} . In practice, a value below the maximum is typically sufficient for most compaction situations. For the “Himmelsleiter”, a value of $\text{erf } \rho_{Pr} = 0.95 \rho_{Pr}$ was chosen. Using this value, the permissible water content level for this degree of compaction could be determined.

As it is not possible to directly “translate” between laboratory conditions and on-site conditions, the determination of such a value can only serve as a guideline.

Building construction quality control procedures

The rammed earth works took place in the months of September and October 2003 and were completed before the first winter frost period set in. In order to allow the inner surface of the rammed earth walls to be aired for as long as possible during the initial drying period, the stair treads were not affixed until the end of December. During this period the upper surface of the walls were protected against wind and weather.

The volume of the rammed earth walls is 90m^3 . In loose form, this amounted to $\frac{1}{3}$ extra mass i.e. 120m^3 and this volume served as the basis for determining the number of tests to be carried out as given in the Lehmbau Regeln (with some slight variations). The following tests were undertaken as part of the building construction control procedures by the IHU Nordhausen [8]:

The quality control testing procedures were able to demonstrate that all necessary quality parameters were fulfilled and that the completed building works met the initial specifications. The “brick-red” mixture did not entirely fulfil all the parameters with regard to compression strength. However, the proportion

PROCTOR-Tests

Zusätzlich zu den in den Lehmbau Regeln [4] geforderten Prüfungen wurden für die drei Stampflehmmischungen noch PROCTOR-Tests nach DIN 18127 ausgeführt. Dieser Test bietet für den Einbau des Stampflehms die Möglichkeit der Festlegung eines optimalen Einbauwassergehaltes, bei dem die maximale Trockenrohdichte ρ_{Pr} erreicht wird. Für praktische Verdichtungsaufgaben ist i.d.R. ein Wert unterhalb des Maximums ausreichend. Für das Projekt „Himmelsleiter“ wurde der Wert $\rho_{Pr} = 0,95 \rho_{Pr}$ gewählt. Mit dieser Festlegung kann mittels der PROCTOR-Kurve der zulässige Wassergehaltsbereich für diese Verdichtungsaufgabe festgelegt werden.

Da zwischen der genormten Verdichtungsarbeit im Labor und jener auf der Baustelle keine direkte „Übersetzungsmöglichkeit“ besteht, kann eine solche Festlegung jedoch nur als Orientierung dienen.

Bauüberwachende Prüfungen

Die Stampflehmarbeiten erfolgten in den Monaten September/Oktober 2003 und waren vor Beginn der ersten Frostperiode abgeschlossen. Um den inneren, zur Stahlkonstruktion gerichteten Wandoberflächen eine bessere Belüftung während der Anfangsphase der Austrocknung zu ermöglichen, wurde die Befestigung der Treppenbleche am Tragskelett aus Stahl bis Ende Dezember hinausgezögert. In dieser Zeit wurden die Mauerkronen der Stampflehmwände mit einem Wetterschutz versehen.

Das Volumen der Stampflehmwand betrug ca. 90m³. Bei einer Auflockerung der einzubauenden Massen von 1/3 ergab sich daraus ein Volumen von 120m³ für die Ermittlung der Probenumfänge nach [4], die bei einigen Prüfungen noch modifiziert wur-

den. Im einzelnen wurden im Rahmen der Bauüberwachung folgende Prüfungen von der IHU Nordhausen ausgeführt [8]:

Mit den bauüberwachenden Prüfungen konnte die Einhaltung aller wesentlichen Qualitätsvorgaben nachgewiesen und damit die Baumaßnahme entspr. der Ausschreibung abgeschlossen werden. Die Mischung „ziegelrot“ erfüllte nicht in vollem Umfang die Vorgaben bzgl. der Druckfestigkeit. Da der Anteil dieser Mischung bezogen auf das Gesamtvolumen des Bauwerks nur bei etwa 10% liegt, kann von einer lastverteilenden Wirkung der beiden übrigen Mischungen ausgegangen werden.

Zusammenfassung

Beschrieben werden zwei aktuelle Stampflehm-Projekte, die in den Jahren 2003 und 2004 in Thüringen realisiert wurden bzw. werden. Erläutert werden die Testprogramme für die Eignungsprüfung und Bauüberwachung. Auf diesbezüglich bestehende Defizite in den Lehmbau Regeln wird hingewiesen. Defizite bestehen zweifellos aber auch auf dem Gebiet der Forschung. Universitäre Einrichtungen haben seit Jahrzehnten Forschungen auf dem Gebiet der mineralischen Baustoffe auf den Beton konzentriert, Lehm war „kein Thema“.

Der Baustoff (Stampf-)lehm erfordert bei seiner Aufbereitung und Verarbeitung besondere Aufmerksamkeit. Architekten und Planer, Statiker, besonders aber auch bauausführende Firmen üben sich noch in Zurückhaltung gegenüber diesem interessanten Material. Dieser Beitrag soll helfen, Informationslücken über diesen Baustoff zu schließen und zu seiner Anwendung ermutigen. Der Lohn sind attraktive Projekte in einer einzigartigen Materialsprache, Projekte, die „Bauen“ noch in ursprünglichem Sinne verstehen.

Prüfung	Vorschrift	Anzahl d. ausgeführten Tests	nach LR [4] erforderlich
Druckfestigkeit	LR [4]	18	1 je 10 m ³ Masse
Schwindmaß	LR [4]	12	1 je 10 m ³ Masse
Plastizität	DIN 18122	3	keine Angabe
Kornverteilung	DIN 18123	3	keine Angabe
PROCTOR-Dichte	DIN 18127	3	keine Angabe
Einbaudichte	DIN 18125	30	keine Angabe

of this mixture with regard to the volume was only approx. 10%, and as such the other mixtures are able to distribute compression loads throughout the rest of the material.

Conclusion

In this paper I have described two current rammed earth projects carried out in 2003 and 2004 in Thuringia, Germany. I have described the test programmes for material suitability and building quality control and identified deficits in the current earthen building legislation which have arisen. A more major deficit can be observed in the field of research. For decades, university research in the field of mineral materials has concentrated on concrete. Earth has very rarely been considered.

The material (rammed) earth necessitates particular care in its preparation and construction. Architects, planners, structural engineers and especially construction companies still have doubts with regard to this most interesting building material. This paper attempts to alleviate such doubts and encourage the use of rammed earth. The reward is most definitely worthwhile: attractive projects with a unique materiality, projects which express the process of building in its most essential form.

Reference Literature

- [1] Ein Jugendklub aus Lehm - Baureport Herbsleben, Fischer, F.; Mönnig, H.-U.; Mücke, F.; Schroeder, H.; Wagner, B., *Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes. A.*, Weimar 35 (1989) 3/4, p 162-168
- [2] Weiterentwickelte Lehmstampfbautechnik – erprobt an einem Experimentalobjekt, Persike, m.; Dehmel, W.; Albert, A.; Golembiewski, R., *Bauzeitung* 40 (1986)12, p 572-575
- [3] *Rammed earth/Lehm und Architektur/Terra cruda*, Rauch, m.; Kapfinger, O., Birkhäuser Basel; Boston; Berlin: 2001
- [4] *Lehmregeln – Begriffe, Baustoffe, Bauteile*, Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.), Vieweg-Verlag Braunschweig/Wiesbaden: 2002, 2nd Ed.
- [5] *Empfehlungen für die Aufbereitung und Verarbeitung von Stampflehm für das Projekt „Himmelsleiter“* Nordhausen, Schroeder, H., unpublished report, Weimar 2003
- [6] *Empfehlungen für die Aufbereitung und Verarbeitung von Stampflehm für das Projekt „Andacht Zentralklinikum Suhl“*, Schroeder, H., unpublished report, Weimar 2003
- [7] *Klassifikation von Baulehmen – korrelative Bezüge zwischen geotechnischen und lehmbautechnischen Parametern*, Schroeder, H., *LEHM 2000*, Beiträge zur 3. Internationalen Fachtagung Lehm- und Dachverband Lehm e.V., p 57 - 63, Overall-Verlag: Berlin 2000
- [8] *Geotechnische Betreuung und baubegleitende Überwachung Baumaßnahme „Himmelsleiter“* Nordhausen, Teil II: Baubegleitende Betreuung, HU Nordhausen, unpublished test series, Nordhausen 2004
- [9] *Tragender Stampflehm – ein betonverwandtes Konglomerat mit Vergangenheit und Zukunft*, Dierks, K.; Ziegert, C., In: Avak, R.; Goris, A.: *Stahlbeton aktuell* 2002, p G.39-G.63, Berlin 2001
- [10] *Ermittlung von Parametern zur Bestimmung der Festigkeit von Stampflehm*, Heller, T.; Sowoidnich, T.; Schnellert, T., study project Bauhaus-Universität Weimar, 2004

Test	Regulation	No. of tests carried out	Prescribed in LR [4]
Compression strength	LR [4]	18	1 per 10 m ³ material
Shrinkage	LR [4]	12	1 per 10 m ³ material
Plasticity	DIN 18122	3	–
Grain distribution	DIN 18123	3	–
PROCTOR-density	DIN 18127	3	–
Construction density	DIN 18125	30	–