

Erfahrungen beim Neubau und der Sanierung von Massivlehmbauten

Die gegenwärtige Situation des Lehmbaus in Deutschland ist, neben einer allgemein zunehmenden Anwendung von Lehm- baustoffen im Bauwesen überhaupt, gekennzeichnet durch immer geringere Schichtdicken – ausgereizt in der Produktform Lehmstreichputz oder Lehmfarbe. Gleichzeitig wird – nach einer vermeintlichen Phase der Ruhe – wieder vermehrt der Massiv- lehmbau angewendet. Diese nach dem Bau der Kapelle der Ver- söhnung, Berlin, eingetretene Phase war gekennzeichnet durch eine adäquate Verbreitung des Geleisteten auf der einen (u.a. [1,2]) und der ingenieurwissenschaftlichen Durchdringung wes- sentlicher Materialphänomene auf der anderen Seite. Beide As- pekte sind Basis und Anstoß für die jüngsten Bauvorhaben.

Historischer Massivlehmbau

Bei Sanierungen und Umbauten historischer Bauwerke ist die Kenntnis der verwendeten Materialien und deren Eigenschaf- ten unerlässlich. Sie bildet die Grundlage für die Bewertung und Veränderung von Konstruktionen aus statischer, bauphysikali- scher und gestalterischer Sicht. Die erforderlichen Kenntnisse waren auch für die in Deutschland dominierende Massivlehm- bauart – den Lehmwellerbau – bisher nicht vorhanden.

Aus umfangreichen Untersuchungen an Lehmwellerbauten und Sanierungsmaßnahmen sollen hier in Ergänzung zu den Ausführ- ungen von Karotke/Ziegert [3] sowie den Angaben der Lehm- bau Regeln [4] als Auszug einige wichtige Erkenntnisse aufge- führt werden. Eine umfassendere und ausführliche Beschrei- bung befindet sich in die Literatur [5].

Die Dichtebestimmung zahlreicher historischer Wellerlehme ergab mit erstaunlich geringer Streuung Werte zwischen 1450 und 1550 kg/m³. Bisher ging man bei Wellerlehm von Dichten zwischen 1500 bis 1800 kg/m³ aus. Die geringen Dichten wirken sich sowohl auf die bauphysikalischen als auch auf die mechani- schen Eigenschaften aus. So betrug die Druckfestigkeit von aus mehreren Bauten geborgenen ungeschädigten Wellerlehmen nur zwischen 0,6-1,3 N/mm². Die Lehm- bau Regeln gehen dem- gegenüber von einer Druckfestigkeit von 2 N/mm² aus, da für Wellerlehm pauschal eine zulässigen Spannung von 0,3 N/mm² angegeben wird. Überschlägige Lastermittlungen an 2-geschos- sigen Wellerbauten ergaben vorhandene Spannungen von bis zu 0,35 N/mm². Die rechnerische Sicherheit bei ungeschädigtem Wellerlehm beträgt damit lediglich $g = 1,8 \dots 3,5$ gegenüber dem

in den Lehm- bau Regeln üblichen Sicherheitsbeiwert von $g = 6,7$. Da bei einem Teil der untersuchten Bauwerke die ohnehin gerin- ge Materialfestigkeit durch aufsteigende Feuchte weiter redu- ziert war, ergaben sich rechnerisch teilweise keine Sicherheiten. Diese Ausführungen stellen kein Plädoyer für den leider sehr häufig stattfindenden Abriss von Wellerbauten dar, sondern be- legen den Bedarf einer qualifizierten Bearbeitung des Aspek- tes Standsicherheit bei der Planung und Ausführung von Sanie- rungsmaßnahmen.

Der Aufwand für die Entnahme von großformatigen Material- proben zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften ist für die Baupraxis im Allgemeinen zu hoch. Die im Stampflehm- bau experimentell angewandte Entnahme von Bohrkernen [6] ist im Lehmwellerbau aufgrund der spezifischen Materialzusammen- setzung nicht möglich. Es wurde deshalb untersucht, ob die bereits im Stampflehm- bau angewandte zerstörungsfreie Festigkeitsbestimmung mit dem Pendelschlaghammer [7] auch im Lehmwellerbau anwendbar ist. Das Verfahren ist grundsätzlich brauchbar, jedoch treten größere Streuungen der Messwerte auf als im Stampflehm- bau. Durch Vergleichsmessungen konnte eine Kalibrierungsgleichung aufgestellt werden, die die Zuord- nung eines gemessenen durchschnittlichen Rückpralls zu einer Druckfestigkeit ermöglicht. Ein weiteres Verfahren zur Bestim- mung der Druckfestigkeit am Bauwerk – das aus dem Holzbau bekannte zerstörungssarme Bohrwiderstandsverfahren – konnte bisher noch nicht ausreichend erprobt werden. Das Bohrwider- standsverfahren hätte gegenüber dem oberflächlich prüfenden Rückprallverfahren den Vorteil, dass ein Festigkeitsprofil über den gesamten Wandquerschnitt erstellt werden kann. Beson- ders bei geschädigten Querschnitten ist dieser Aspekt von Be- deutung. Im Rahmen von Voruntersuchungen konnten bereits anhand des subjektiv empfundenen Bohrwiderstandes gute Ein- schätzungen über Materialschädigungen gegeben werden.

Wie bereits in Karotke/Ziegert [3] angeführt, stellen die Schä- den infolge kapillar aufsteigender Feuchte das größte Problem bei der Erhaltung des Bestandes dar. Abgesehen von raumkli- matischen und ästhetischen Auswirkungen ist bei vielen Gebäu- den die Standsicherheit beeinträchtigt bzw. nicht mehr gegeben (s.o.). Die unter dem Einfluss von Feuchte und Salzen eintreten- de Destruktion des Wellerlechmes konnte durch mineralogische Untersuchung von zahlreichen geschädigten Bauten (Abb. 1) er-

The conservation and building of monolithic earthen constructions

The current situation in the field of building with earth in Germany is characterised not only by a general increase in popularity but also a tendency towards ever thinner layers of application as epitomised by products such as fine clay render or clay-based paints. At the same time, after a period of supposed inactivity, the construction of monolithic earth constructions is being employed more frequently. Most apparent after the completion of the Chapel of Reconciliation in Berlin, this has been helped along by increased public awareness of built works [1, 2] as well as a better technical comprehension of the material characteristics. These aspects are both basis and impetus for current projects.

Historic monolithic earth constructions

A good knowledge of a material and its properties is indispensable for the renovation and conversion of historic buildings. It is a basic necessity for evaluating and adapting existing structures from a structural, thermodynamic and design point of view. For “Lehmwellerbau”, a variant of cob-walling and probably the most common form of historic earthen monolithic construction in Germany, such knowledge was until recently not available.

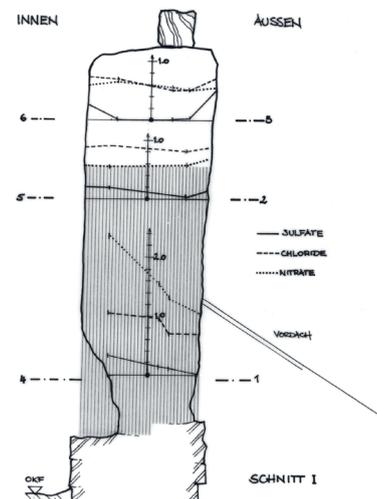
Resulting from extensive investigations into buildings and renovation measures using “weller”-technique cob walling (wellerlehm), this paper will build upon findings from previous investigations [3] and the German earthen building regulations, the “Lehmbau Regeln” [4], and will present a selection of important findings. A more comprehensive and detailed description is available in “Lehmwellerbau – Konstruktion, Schäden, Sanierung” [5].

The variation of material densities investigated in numerous historic “wellerlehm” buildings was surprisingly low, with values ranging from 1450 to 1550 kg/m³. Previously, the material density of “wellerlehm” was defined as being between 1500 and 1800 kg/m³. The comparatively low density has implications for both the thermodynamic as well as mechanical properties of wellerlehm buildings. The compression strength of intact samples taken from several different buildings ranged from only 0.6–1.3 N/mm². The Lehmbau Regeln assume a compression strength of 2 N/mm² with a permissible tensile strength of 0.3 N/mm². Estimated load levels determined for two-storey wellerlehm buildings exhibited tensile strengths of up to 0.35 N/

mm². The calculated safety load factor for undamaged wellerlehm is therefore $g = 1.8–3.5$, in comparison to a safety load factor of $g = 6.7$ as given in the Lehmbau Regeln. Many of the investigated constructions were also subject to rising damp, weakening the material stability still further and resulting in practically no safe load factor. This should not be misinterpreted as a plea to demolish wellerlehm buildings, which is too often the case. Instead I wish to demonstrate that a qualified appraisal of the structural characteristics of such buildings is imperative in the planning and execution of renovation measures.

The effort involved in removing large-scale material samples with which to determine mechanical properties is usually too extensive to be carried out in building practice. The taking of drill core samples as used in tests with rammed earth constructions [6] is not possible for wellerlehm buildings due to the special material properties. Instead experiments were undertaken to determine the suitability of non-destructive tests using a pendulum impact tester [7] for wellerlehm constructions. This approach is in principle possible, however the measured values vary considerably more than those obtained for rammed earth. Through comparative measurements, a calibration equation was established for converting the mean measured pendulum rebound into values for compression strength. A further method used in timber structures to determine the material strength of built constructions, the drilling resistance method with relatively low associated damage, could as yet not be tested sufficiently. This method would have the advantage of being able to measure the material characteristics across the whole cross-section of a wall, and not just at the wall's surface. This is of particular value where building damage is evident within the structure of the wall. However, preliminary investigations have shown that material damage can be estimated fairly well based upon one's own subjective estimation of the drilling resistance.

As described in previous publications [3], damages resulting from capillary rising damp is the biggest problem associated with renovating monolithic earthen structures. Leaving aside thermodynamic and aesthetic aspects for the moment, for many buildings the structural stability of many buildings is much reduced or effectively no longer given (see above). The destructive effects of damp and salts on wellerlehm buildings could be demonstrated through mineralogical investigations of samples



klärt werden. Es kommt zu komplexen Um- und Neubildungen von Tonmineralen sowie zur Bildung von Treibmineralen. Die in den Lehmregeln im Kapitel Beständigkeit getroffene Aussage, dass Lehm als Endprodukt geologischer Verwitterung von Umwelteinflüssen nicht berührt werden kann, ist damit unzutreffend. Die starken Querschnittsverluste bei von aufsteigender Feuchte betroffenen Wellerwänden sind vor allem auf den geringen Widerstand des Wellerlehms gegen die durch Kristallisations- und Hydratationsprozesse hervorgerufenen Poreninnendrucke zurückzuführen. Im Gegensatz zu anderen Massivbaustoffen ist bei feuchtegeschädigten Lehmwellerwänden auch der Restquerschnitt in seiner Tragfähigkeit erheblich eingeschränkt. Dieser Umstand ist zum einen auf die feuchteabhängige Festigkeit von Lehmstoffen zurückzuführen, zum anderen tritt in dem dauerhaft durchfeuchteten Wandkern eine Humierung des Strohs ein. Dessen armierende Wirkung ist damit nicht mehr gegeben und die bei der Zersetzung des Strohs entstehende Huminsäure begünstigt die Umwandlung von Tonmineralen und die Bildung von Treibmineralen, was zu einer weiteren Entfestigung des Kornverbandes beiträgt.

Die Sanierung von salzbelastetem Wellerlehm kann nur über einen Materialaustausch erfolgen, da alle gängigen Entsalzungsverfahren für die Entsalzung von Wellerlehm nicht geeignet sind. Aus statischer Sicht können als Schwellenwerte für einen notwendigen Materialaustausch nach bisherigen Erfahrungen ein Nitratgehalt von 0,8 % bzw. eine Gesamtkonzentration von Nitraten, Sulfaten und Chloriden von 1,3 % genannt werden. Da der Aufwand für eine Salzgehaltsbestimmung hoch ist, wurde nach einer einfacheren Methode gesucht, um den Schädigungsgrad einer Massivlehmwand hinreichend genau einschätzen zu können. Als geeignet hat sich die Bestimmung der hygroskopischen Feuchte erwiesen. Dabei wird bei Normalklima die Feuchte einer potentiell salzbelasteten Probe der Feuchte einer nicht salzbelasteten Probe gegenübergestellt. Die Differenz der Feuchtegehalte ergibt den hygroskopisch bedingten Feuchteanteil – also den Teil der Materialfeuchte, der durch das hygroskopische Verhalten einer bestimmten Menge Salz hervorgerufen wird. Durch Vergleichsmessungen an Lehmwellerbauten konnte die Wechselbeziehung zwischen Salz- und Feuchtegehalt quantifiziert werden (Abb. 2 und 3). Mit Hilfe dieser Korrelationen kann jetzt allein durch die Messung der Feuchten an einem beliebigen Wellerbau ein hinreichend genauer Rückschluss auf den Salzgehalt getroffen werden.

Das Verfahren wurde inzwischen auch bei der Beurteilung eines Bauwerks in Kalk-Pisé-Bauweise erfolgreich angewandt [8]. Die Bestimmung der hygroskopischen Feuchte ist dabei nicht nur für die Einschätzung der Standsicherheit hilfreich. Erhöhte hygroskopische Feuchtegehalte weisen darauf hin, dass auch nach dem Einbau von Sperrschichten am Wandfuß – und der damit eigentlich richtigen Sanierungsstrategie, nämlich der Beseitigung der Schadensursache – eine erhebliche, hygroskopisch bedingte Feuchte im Bauteil verbleibt und damit auch nach der Sanierung die Gefahr von unzuträglichen raumklimatischen Bedingungen bestehen bleibt. In Abhängigkeit von der Nutzung ergeben sich aus dieser Sicht für die Salzkonzentration Schwellenwerte, die erheblich unter den Werten liegen können, die im Hinblick auf die Materialfestigkeit kritisch sind.

Insgesamt kann auch für die in diesem Beitrag nicht angesprochenen Schäden, wie Risse, Schädlingsbefall und Abwitterung, erklärt werden, dass diese auf nicht hinreichend an die Standort- und Nutzungsbedingungen angepasste Konstruktionen zurückzuführen sind. Hier sind vor allem die unzureichenden Gründungstiefen, die Verwendung kapillar leitfähiger Materialien im Fundament- und Sockelbereich, fehlende Sperrschichten sowie ungenügend ausgebildete Elemente der Gebäudeaussteifung zu nennen. Diese konstruktiven Mängel bewirken an Lehmbauten oft größere Schäden als bei Bauten aus anderen Materialien. Historische Massivlehm Bauten mit sauberer konstruktiver Ausführung sind oft vollkommen schadensfrei (Abb. 4).

Moderner Massivlehm

Bei der Planung und Ausführung von mehreren Massivlehmbauten (Projekte 1, 2 und 3) wurden zum Teil neue und von den Lehmregeln abweichende Lösungen umgesetzt.

Bemessung

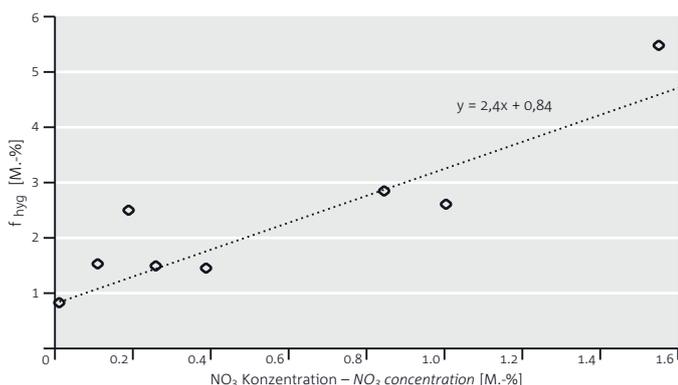
Beim Bauvorhaben „Haus Hein“, Ihlow (Projekt 1), sollte in mehreren Punkten von den in Brandenburg bauaufsichtlich eingeführten Lehmregeln abgewichen werden. Die Abweichungen betrafen:

- die Errichtung von 2-schaligen Außenwänden in Stampflehm-Bauweise mit Kerndämmung,
- die teilweise Überschreitung des nach den Lehmregeln zulässigen Abstands von aussteifenden Querwänden
- und die Erhöhung der zulässigen Auflagerpressung in Anlehnung an DIN 1053-1, Mauerwerksbau.

1a & 1b Salzverteilung in einer durch aufsteigende Feuchte geschädigten Wellerwand in Neukirchen-Wyhra/Sachsen

Distribution of salts in a wellerlehm wall damaged by rising damp in Neukirchen-Wyhra, Saxony

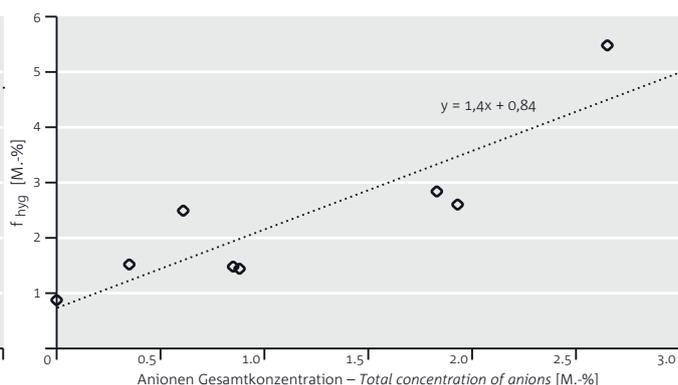
Korrelation zwischen d. Konzentration an Nitraten m. d. hygroskopischen Feuchte
Correlation between concentration of nitrates and the hygroscopic moisture content



from the numerous damaged buildings (Fig. 1). Both the transmutation and re-formulation of clay minerals occurs as well as the formulation of minerals which weaken the structural grain distribution. In the chapter “Beständigkeit” (material resilience) of the Lehmbau Regeln, it states that clay as the primary end product of geological formulation is not subject to environmental influences. The above appears to disprove this. The significant reduction in the structural cross-section of wellerlehm walls affected by rising damp is primarily due to wellerlehm’s low resistance against internal pore pressures caused by crystallisation and hydration processes. In contrast to other monolithic building materials this leads to a significant reduction of the structural cross section of wellerlehm walls. This is due in part to the moisture-dependent strength characteristic of earth, as well as the decomposition of the straw as a result of sustained exposure to moisture. The reinforcing effect of the straw disappears, and the humic acids resulting from the decomposition of the straw contribute to the transmutation of clay minerals and the formation of minerals which further weaken the structural grain distribution within the material.

The renovation of salt-damaged wellerlehm can only be achieved by replacing the material entirely. None of the available salt demineralisation techniques can be used for wellerlehm constructions. From a structural point of view, a salt content value of 0.8% nitrate content or a total concentration of nitrates, sulphates and chlorides of 1.3% should be taken as a threshold value above which the material should be replaced. As the method for determining salt content concentration is complex, a simpler more straightforward method of determining the damage level of monolithic earthen constructions is required. One suitable method is the determination of hygroscopic moisture content. In normal climatic conditions, the moisture content of a potentially salt-damaged sample is compared with the moisture content of an intact sample. The difference between the two moisture content levels is the hygroscopic proportion of the moisture content, i.e. the amount material moisture content resulting from the hygroscopic nature of a certain level of salts content. By taking comparative measurements from different wellerlehm constructions, the relationship between salt and moisture content could be quantified (Figs. 2 & 3). With the help of this correlative relationship, it is now possible to estimate the salt content of any wellerlehm construction without the need

Korrelation zw. d. Gesamtkonzentration an Anionen m. d. hygroskopischen Feuchte
Correlation between total concentration of anions and the hygroscopic moisture



for further comparative measurements. This approach has also been applied successfully to assess the structural condition of lime-pisé constructions [8].

The determination of hygroscopic moisture levels is not only helpful in determining the structural stability of a construction. High hygroscopic moisture levels indicate that, even after the incorporation of a damp-proof course (as a means of isolating the cause of moisture) a high level of hygroscopic moisture can remain in the construction and so still have a negative affect on the internal climate conditions after renovation works have been completed. For these purposes a series of further threshold levels for salt concentration levels for different intended uses can be established. These lie significantly below those threshold levels for structural stability of the material.

In general, most building damages for monolithic earthen constructions such as material damage, cracks, insect infestation and weathering can be traced back to inappropriate construction methods for the respective location and function of the building. Most notably, these include insufficient foundation depth, the use of capillary conductive materials in the foundation and plinth, absence of damp-proof courses as well insufficient structural bracing and reinforcement methods. Such construction defects often cause more significant damages to wellerlehm buildings than for buildings made with other materials. However, it must also be stated that correctly constructed or renovated historic monolithic earthen buildings are very often entirely free of building damages (Fig. 4).

Modern monolithic earth construction

In the planning and realisation of three recent buildings executed using monolithic earth constructions (“Haus Hein”, Ihlow bei Strausberg/Brandenburg, “Haus der Nachhaltigkeit” Johanneskreuz near Kaiserslautern, Rheinland-Pfalz, and “Börtewitz children’s nursery” near Riesa/Saxony) a number of new solutions were adopted which differ in part from the guidelines set out in the Lehmbau Regeln.

Dimensioning

The project “Haus Hein” in Ihlow (Project 1) differs in several respects from the Lehmbau Regeln, which have been adopted as earthen building regulations in the federal state of Brandenburg:

2 Korrelation zwischen der Konzentration an Nitraten mit der hygroskopischen Feuchte
Correlation between concentration of nitrates and the hygroscopic moisture content

3 Korrelation zwischen der Gesamtkonzentration an Sulfaten, Chloriden und Nitraten mit der hygroskopischen Feuchte
Correlation between total concentration of sulphates, chlorides and nitrates and the hygroscopic moisture



Sollen beheizte Räume von einer innen und außen sichtigen Stampflehmwand vertretbarer Dicke umhüllt werden, besteht die Notwendigkeit, eine zweischalige Wand mit Kerndämmung auszuführen. In Analogie zum 2-schaligen Mauerwerk wird dabei die Innenschale als Tragschale und die Außenschale als Vorsatzschale ausgebildet. Als Dämmmaterial können Holzweichfaserdämmstoffe dienen. Trag- und Vorsatzschale werden durch einzelne Anker (Anzahl und Lage in Analogie zum 2-schaligen Mauerwerk) oder Geogitterstreifen miteinander verbunden. Die entsprechenden statischen Nachweise wurden geführt.

Aussteifende Querwände verringern die Knickgefahr der auszusteienden Wand und gewährleisten die räumliche Steifigkeit des Gesamtbauwerkes. Nach DIN 1053-1 muss die Traglast von 2-seitig gehaltenen Wänden nur dann abgemindert werden, wenn das Verhältnis von h_k/d größer als 10 ist. Die Knickgefährdung ist sonst nicht maßgebend. Da die Bemessung nach den Lehmregeln eine mögliche Knickgefährdung nur durch die pauschale Vorgabe von Wanddicke, Geschosshöhe und Querwandabstand allgemein berücksichtigt und eine konkrete Berücksichtigung einzelner Faktoren nicht vorsieht, wurde sich bei der vorliegenden Überschreitung des nach den Lehmregeln zulässigen Querwandabstands an die DIN 1053-1 angelehnt und die Wand entsprechend nachgewiesen. Die zulässige Spannung der Wand musste nicht abgemindert werden, da die Schlankheit nicht größer als 10 war. Der Abstand der Querwände konnte im konkreten Fall auf über 12m ausgeweitet werden. Die ausreichende räumliche Steifigkeit des Gesamtsystems wurde nachgewiesen.

Die Stampflehmwände wurden für eine Druckfestigkeit von 2 N/mm^2 bemessen. Nach den Lehmregeln beträgt die zulässige Druckspannung bei dieser Festigkeit $0,3\text{ N/mm}^2$. Die Bemessung ergab im Auflagerbereich jedoch Spannungen bis $0,35\text{ N/mm}^2$. Nach DIN 1053-1 ist die lokale Erhöhung der zulässigen Druckspannung im Auflagerbereich um den Faktor 1,3 zulässig. Da ein grundsätzlich ähnliches Tragverhalten vorliegt, wurde angenommen, dass die lokale Erhöhung auch im Stampflehmgebäude angewendet werden kann.

Die aufgeführten Punkte wurden zunächst mit der zuständigen unteren Bauaufsichtsbehörde abgestimmt und anschließend an die obere Bauaufsichtsbehörde als Anfrage nach Notwendigkeit

einer Zustimmung im Einzelfall weitergereicht. Den genannten Abweichungen von den Lehmregeln wurde zugestimmt, ohne das Verfahren einer Zustimmung im Einzelfall einzuleiten. Das ausgesprochen kooperative Verhalten der Bauaufsichtsbehörden ist hier ausdrücklich hervorzuheben.

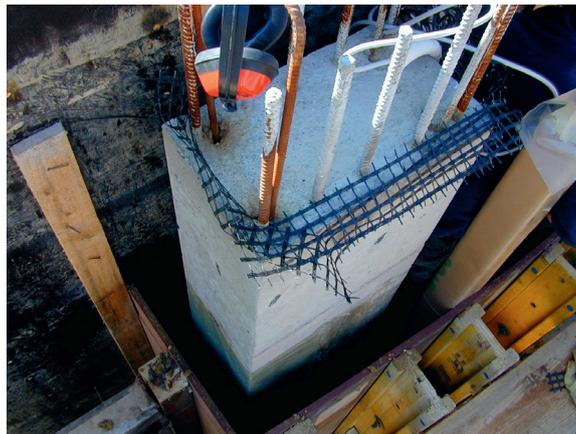
Material

Für die Bauvorhaben „Haus Hein“, Ihlow (Projekt 1), und dem „Haus der Nachhaltigkeit“, Johanneskreuz (Projekt 2), wurde Stampflehm der Fa. Claytec verwendet. Das Material zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit und ein ausgesprochen geringes Schwindmaß aus. So konnten auch hinsichtlich des Schwindens kritische Konstruktionen wie z.B. in den Stampflehmquerschnitt integrierte Stahlbetonstützen ohne Rissbildungen ausgeführt werden (Abb. 5a & 5b).

Beim Bauvorhaben „Kinderkrippe Börtewitz“ (Projekt 3) wurde Stampflehm im temporär beheizten Erdgeschoss eingesetzt. Das Obergeschoss wird in tragender Lehmsteinbauweise mit Außendämmung und hinterlüfteter Verschalung ausgeführt. Es bestand die Aufgabe, auf Basis des in der Baugrube anfallenden Baulehms eine Stampflehmischung zu entwickeln, die bei ausreichender Festigkeit eine derart reduzierte Wärmeleitfähigkeit aufweist, dass die – reduzierten – Wärmeschutzanforderungen mit einem einschaligen Stampflehmquerschnitt realisiert werden konnten. Durch Substitution eines Teils der geplanten Gesteinskörnung durch Blähton konnte bei ausreichender Festigkeit die Dichte von 2200 auf 1700 kg/m^3 und damit die Wärmeleitfähigkeit von $1,4\text{ W/m}^2\text{K}$ auf $0,8\text{ W/m}^2\text{K}$ reduziert werden.

Konstruktion

In vorangegangenen Untersuchungen [9] wurde anhand der angestellten Versuche erstmals der Einsatz von Geogitterbewehrung im Stampflehmgebäude diskutiert. Geogitter bestehen aus einem polyamidummanteltem Glasfasergewebe mit Maschenweiten von 20 bis zu 50 mm; sie sind biegeweich und hochzugfest. Damit ergeben sich im Gegensatz zu biegesteifen Bewehrungseinlagen keinerlei Zwängungsspannungen. Bei den Bauvorhaben 1, 2 und 3 wurden sämtliche Ecken und Wandanschlüsse (Abb. 6) mit Geogittern bewehrt. Außerdem wurden Geogitter unter und über Öffnungen, an Querschnittssprüngen sowie im Auflagerbereich von Einzellasten eingelegt. In Zusammenhang mit den geringen Schwindmaßen der verwendeten Stampflehm-



- the construction of a double-leaf external wall in rammed earth with an insulation core,
- the permissible distance between bracing walls as given in the Lehmbau Regeln has been exceeded in certain situations
- the permissible bearing compression stress has been increased more in line with stipulations given in the DIN 1053-1 for masonry work.

Where heated rooms are to be enclosed in rammed earth walls with exposed surfaces both indoors and outdoors, it is necessary to execute the wall as a double-leaf wall with an insulation core. Analogous to double-leaf masonry walls, the inner leaf serves as the load-bearing structural support and the outer leaf as external lining. Soft wood fibreboard was used as insulation. Both leaves are connected with one another using wall anchors (quantity and distribution as in double-leaf masonry) or geo-webbing strips. The respective structural proofs were provided in all cases.

Bracing walls serve the purpose of bracing the wall against deflection and help give the entire building a measure of rigidity. According to DIN 1053-1, the bearing load of a wall held on two sides can only be reduced when the relationship hk/d is larger than 10. The danger of deflection is otherwise insignificant. The Lehmbau Regeln takes into consideration the general danger of wall deflection based upon wall thickness, storey-height and distance between bracing walls but does not allow for consideration of specific individual factors. In this case the distance between bracing walls exceeds the guidelines of the Lehmbau Regeln and instead employs a similar method to the DIN 1053-1 for the proof of its stability. The permissible tension of the wall did not have to be reduced as the slenderness ratio is not larger than 10. In this particular case, the distance between bracing walls could be extended to over 12 metres. A sufficient structural rigidity of the entire building could be proven.

The rammed earth walls were dimensioned according to a compressive strength of 2 N/mm^2 . According to the Lehmbau Regeln, the permissible compressive stress for this level of strength is 0.3 N/mm^2 . The dimensioning in the load-bearing areas was 0.35 N/mm^2 . According to DIN 1053-1, a localised increase in permissible compressive stress in load-bearing areas up to a factor of 1.3 is allowed. The basic pattern of load-bearing is in this

case similar to other masonry constructions, and it was assumed that such an increase in permissible compressive stress would also apply for rammed-earth.

The aforementioned aspects were discussed and agreed with the respective building control authorities and then forwarded to the next higher instance of the planning authorities with the aim of determining whether it was necessary to obtain “permission in individual cases”. The deviations from the Lehmbau Regeln were permitted without the need to apply for “permission in individual cases”. We should stress here the exceptionally cooperative assistance of the planning permission and building control authorities.

Material

For both projects “Haus Hein” in Ihlow (Project 1) as well as “Haus der Nachhaltigkeit” in Johanneskreuz (Project 2) earth mixtures provided by Claytec were used. The material exhibits a high compressive strength and an extremely low degree of shrinkage. This enabled critical construction elements such as the integration of reinforced-concrete columns within the rammed earth walls to be executed without the danger of cracking (Figs. 5a and 5b).

In the “Börtewitz children’s nursery” (Project 3) rammed earth was used in the temporarily heated ground floor. The upper storey was constructed in load-bearing earthen brickwork with external insulation and ventilated weatherboarding. For the ground floor, it was necessary to develop an appropriate rammed earth mixture using earth from a local clay pit that was at once sufficiently strong to be load-bearing yet also exhibiting low thermal conductivity. The intention was to satisfy (the reduced) thermal insulation requirements using a single leaf rammed earth construction. By substituting a percentage of the aggregate with expanded clay it was possible to reduce the thermal transmission from $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ to $0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ with a corresponding reduction in material density from 2200 kg/m^3 to 1700 kg/m^3 , which is sufficiently strong.

Construction

In “Bewehrung im Stampflehbau” (Reinforcing rammed earth constructions) [9] we had previously experimented with the application of geo-webbing reinforcement in rammed earth con-

5a & 5b Teile der Stampflehwand im Haus der Nachhaltigkeit, Johanneskreuz, (2) mit dünnwandiger Ummantelung einer Stahlbetonstütze (Abb. 5a Büro raro, Dresden)

“Haus der Nachhaltigkeit” in Johanneskreuz (2): enclosure of concrete columns within the rammed earth walls (Fig 5a: raro, Dresden)

6 Fußpunkt mit Anschluss einer Querwand mittels Geogitter am Haus Hein, Ihlow (1)
The foot of a wall showing a reinforced junction with a bracing wall, Haus Hein, Ihlow (1)



me ergaben sich auch bei schwierigen geometrischen Verhältnissen vollkommen rissfreie Bauteile (Abb. 5b). Die Maschenweite der Geogitter ist auf das Größtkorn der verwendeten Stampflehmischung abzustimmen. Lage und Abstand der Geogitter sind sorgfältig zu planen.

Bei dem Projekt „Haus der Nachhaltigkeit“, Johanneskreuz (Projekt 2), wurde erstmals in Deutschland eine kerngedämmte Stampflehmwand ausgeführt. Die Stampflehmshalen sind hier nur selbsttragend. Die Höhe der Wand beträgt 4 Meter und die Dicke der Vorsatzschale 20cm.

Bauüberwachung

Die derzeit bei der Bemessung von Stampflehmbauten einzuhaltenden Sicherheiten sind so hoch, dass die Standsicherheit im Gebrauchszustand – sofern keine gravierenden Bauschäden vorliegen (s.o.) – als vollkommen unkritisch eingeschätzt werden kann. Der eigentlich kritische Zustand im Stampflehmbau ist der Bauzustand. Da die Festigkeit von Stampflehm wie bei allen Lehmbaustoffen feuchteabhängig ist, tritt erst nach einer längeren Zeit die bei der Bemessung angesetzte Materialfestigkeit ein. Da sich der Eintrag von Lasten in Abhängigkeit vom Baufortschritt erhöht, kann die Festigkeitsentwicklung eines Stampflehmanteils von wesentlicher Bedeutung für den möglichen Baufortschritt des gesamten Bauvorhabens sein. Beim Bau der Kapelle der Versöhnung, Berlin, wurde deshalb das Austrocknungsverhalten durch die Entnahme von Bohrmehl aus dem Wandkern und anschließender gravimetrischer Feuchtemessung überwacht [7]. Über Vergleichsmessungen wurde dann auf die Festigkeit der Wand geschlossen.

Die Entnahme von Bohrproben an einer fertiggestellten Stampflehmwand – zumal in der für eine halbwegs vernünftige statistische Auswertung notwendigen Anzahl – ist natürlich eher unerwünscht. Deshalb wurden beim Bau der Kinderkrippe Börtewitz (Projekt 3) erstmals stationäre Feuchtefühler in den Wandkern eingebaut. Die nach dem Prinzip der kapazitiven Feuchtemessung funktionierenden Fühler erlauben zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Bestimmung der Feuchte im Wandkern und damit eine Einschätzung über die Tragfähigkeit des Bauteils.

Die Entwicklung des Stampflehmbaus in den letzten Jahren zeigt, dass neben einer Weiterentwicklung traditioneller Prinzi-

pien auch eine eindeutige architektonische und konstruktive Ablösung aus den (bewährten) Zwängen der Vergangenheit stattfindet. Für die neuen Praktiken liegen noch keine langfristigen Erfahrungen vor. Aufgrund intensiver ingenieurwissenschaftlicher Bearbeitung können sie als grundsätzlich positiv und vertretbar angesehen werden. Auf die Bauten der nächsten Jahren kann man gespannt sein.

Projektverzeichnis und Beteiligte (siehe Englische Text)

Literatur

- [1] Kapfinger, O., Rauch, M.: Rammed earth – Lehm und Architektur. Basel 2001
- [2] zur Nieden, G., Ziegert, C.: Neue Lehm-Häuser international. Berlin 2002
- [3] Karotke, E., Ziegert, C.: Auswirkungen aufsteigender Feuchte auf tragende Wandquerschnitte aus Lehm. In: Wiese, K. (Hrsg.): Lehm 2000, Beiträge zur 3. Internationalen Fachtagung Lehm und Dachverband des Lehm e.V. 17.-19. 11. 2000 in Berlin. Berlin 2000
- [4] Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): Lehmregeln. Braunschweig/Wiesbaden 1999
- [5] Ziegert, C.: Lehmwellerbau – Konstruktion, Schäden, Sanierung. Stuttgart 2003
- [6] Dierks, K., Ziegert, C.: Festigkeitsprüfung von Bauwerken aus Stampflehm. In: Moderner Lehm und Begleitforschung im tragenden Lehm. In: Wiese, K. (Hrsg.): Lehm 2000, Beiträge zur 3. internationalen Fachtagung Lehm und Dachverband des Lehm e.V. 17.-19. 11. 2000 in Berlin. Berlin 2000
- [7] Ziegert, C.: Gutachterliche Stellungnahme zur Stellmacherei in Kalk-Pisé-Bauweise, Domäne Dahlem, Berlin, im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin. Berlin 2004, unveröffentlicht
- [9] Dierks, K., Widjaja, E., Ziegert, C.: Bewehrung im Stampflehm. In: Moderner Lehm und Begleitforschung im tragenden Lehm. In: Wiese, K. (Hrsg.): Lehm 2000, Beiträge zur 3. internationalen Fachtagung Lehm und Dachverband des Lehm e.V. 17.-19. 11. 2000 in Berlin. Berlin 2000



structions. Geo-webbing is a polyamide-coated glass fibre webbing with a mesh aperture of between 20 and 50 mm. They are both high-tensile and flexible. In comparison to stiff reinforcement meshes, the geo-webbing does not exert any stresses of its own on the earthen material. In all three projects geo-webbing was used to reinforce corners, wall intersections (Fig. 6), wall sections above and below openings, at changes of material thickness and in specific load-bearing areas. Together with the low shrinkage characteristics of the material used, all built elements were constructed without any occurrence of cracking (Fig. 5b). The mesh aperture of the geo-webbing used must be chosen so as to allow the largest grain size of the rammed earth mixture used to pass through it with ease. The location and depth of the geo-webbing should likewise be planned and specified carefully.

The project “Haus der Nachhaltigkeit” in Johanneskreuz (Project 2) is also the first time that a rammed earth wall with core insulation has been built in Germany. The rammed earth lining walls are in this case only self-supporting. The height of the wall is 4 metres with a thickness of 20 cm.

Building supervision

The necessary safety margins stipulated in the dimensioning of rammed earth constructions are at present so high, that the structural stability when completed is assured without any problems (providing no serious building defects are evident). The more critical period is during the actual construction period. The structural stability of rammed earth is dependent upon its moisture content and only reaches the level of stability upon which dimensioning calculations are based after a period of extended drying out. As the level of self-weight load exerted on the lower layers of rammed earth increases as building construction progresses, the pattern in which the stability of the material strengthens has implications on the rate at which building works can progress on site. During the building of the Chapel of Reconciliation in Berlin, the rate at which the material dried out was monitored continually by taking bore dust from the wall core and measuring its moisture content using gravimetric analysis [7]. By using comparative measurements the stability of the wall and material could be estimated.

The removal of drill cores from a freshly constructed rammed earth wall (particularly the number required for a reasonable structural appraisal) is, quite naturally, undesirable. For this reason, during construction of the “Börtewitz children’s nursery” (Project 3) stationary moisture meters were inserted into the wall during construction. The meters, which operate using capacitive moisture measurement, allow the moisture content in the core of the wall and thus the structural stability of the wall to be determined at any point in time.

The developments made in rammed earth construction over the last few years demonstrate not only the continuing development of traditional principles but also an architectonic and constructional departure from the tried and tested constraints of the past. As yet, there is little experience available of the new techniques being employed. However, intensive and continual scientific research and monitoring suggests that the new developments can be viewed as both positive and justifiable. We can expect to see many monolithic earthen building constructions in the coming years.

Projects & participating firms

- (1) *Haus Hein, Ihlow near Strausberg/Brandenburg*
Architects and engineers: ZIEGERT | ROSWAG | SEILER – ARCHITEKTEN INGENIEURE, Berlin
Earthen building construction: LUCA-Lehmbau, Leipzig
Rammed earth: Claytec
- (2) *„Haus der Nachhaltigkeit“ Johanneskreuz near Kaiserslautern, Rheinland-Pfalz*
Pfälzer Wald Nature reserve centre
Architects: rabaschus und rosenthal, büro für architektur und stadtplanung, Dresden
Earthen building consultants: ZIEGERT | ROSWAG | SEILER ARCHITEKTEN INGENIEURE, Berlin, Dr.-Ing. Christof Ziegert
Earthen building construction: LUCA-Lehmbau, Leipzig
Rammed earth: Claytec
- (3) *Children’s day nursery, Börtewitz near Riesa, Saxony*
Architects and engineers: BIB Eggert, Dipl.-Ing. Frank Eggert, Janna Störmer, Oliver Tramm
Earthen building consultants: ZIEGERT | ROSWAG | SEILER ARCHITEKTEN INGENIEURE, Berlin, Dr.-Ing. Christof Ziegert
Earthen building construction: LUCA-Lehmbau, Leipzig
Material development and testing, building supervision: TU Berlin, FG Tragwerksentwurf und -konstruktion, Prof. Dr.-Ing. Klaus Rückert, Dr.-Ing. Christof Ziegert

Reference literature (see German text)

Abb. 8a und b Ausführung und fertige Wand mit Feuchtefühler am Projekt Kinderkrippe Börtewitz (3)
Completed wall and its execution with integrated moisture meters, Börtewitz children’s nursery (3)