# Einfluss der Stabilisierung von Lehmbaustoffen auf den Feuchtigkeitsausgleich von Lehmwänden

Eine höhere Raumluftfeuchte von über 70% ist als Hauptfaktor von Schimmelwachstum und Ausbreitung von Staubmilben identifiziert worden. Eine hohe Luftfeuchtigkeit erhöht auch die Menge an flüchtigen organischen Verbindungen (FOV) die in die Raumluft angegeben werden (Fang u.a., 1999). Auf der anderen Seite hat eine geringe relative Luftfeuchtigkeit von unter 40% einen direkten Einfluss auf die menschlichen Schleimhäute (Minke, 2009). Die Gesundheit der Bewohner ist einer der Hauptgründe für die Bedeutung der Regulierung des Innenraumklimas. Seit den 1970er Jahren wuchs die Dämmung im Privatwohnungsbau bedingt durch ein wachsendes Bewusstsein für die begrenzten verbrauchten Ressourcen deutlich an und die Frischluftzufuhr wurde auf 0,2 bis 0,3 Luftwechsel pro Stunde reduziert, um die Energieeffizienz der Gebäude zu erhöhen (Jones, 1998). Aber die geringere Luftwechselrate erhöhte die Menge der anfallenden Feuchtigkeit in den Gebäuden. Energieintensive mechanische Belüftung oder Klimaanlagen galten als Lösung des Problems, obwohl sie die ökologischen Vorteile, die zunächst erreicht wurden, verringerten und neue Gesundheitsaspekte bezüglich der Innenraumluftgualität ins Spiel brachten. Im Moment gibt es die Tendenz, diese Zwischenlösung durch eine nachhaltigere Alternative zu ersetzen. Dies kann durch passive Innenraumluftkontrolle durch poröse hygroskopische Baustoffe erreicht werden (Rode u.a., 2005, Padfield, 1998). Lehm als Baustoff bietet auf Grund seiner geringen grauen Energie und seines hohen Feuchtigkeitsaufnahmevermögens attraktive Vorteile in dieser Richtung (Morton, 2010, Minke, 2009).

Trotzdem eine Vielzahl von Lehmbauten tausende Jahre überstanden haben gibt es Vorbehalte in der herkömmlichen Bauindustrie, Lehm hätte eine geringe Dauerhaftigkeit und manchmal werden Stabilisatoren in Lehmbaustoffen genutzt, um die Festigkeit und Dauerhaftigkeit zu erhöhen. Zement und Kalk sind die üblichsten Stabilisatoren, die mit weniger als 10% Gewichtsanteilen eine deutliche Erhöhung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit erwirken. Daneben spielen sie aber auch eine bedeutende Rolle in der Wasserbeständigkeit. Ein weiterer höherer Prozentanteil an Stabilisatoren würde die graue Energie in einem Maß erhöhen, das den Baustoff vergleichbar zu konventionellen Materialien macht. Durch ein wachsendes Interesse an der Verwendung von Geopolymeren als eine Stabilisierung mit geringem Treibhauspotential für Lehmbauten kam diese Methode der Stabilisierung ebenfalls in die Versuchsreihe der vorliegenden Studie. Geopolymere sind anorganische Polymere, die bei der chemischen Reaktion von Aluminiumsilikatoxiden (AI 3+ in IV-fach Schichtung) mit Alkalipolysilikaten entstehen, um polymere Silizium-Sauerstoff-Aluminium Verbindungen herzustellen (Davidovits, 1991).

Es ist vorherrschende Meinung unter einigen Praktikern, dass die Stabilisierung das Feuchtigkeitsausgleichsvermögen beeinträchtigt und somit einen gegenläufigen Effekt auf die Innenraumluftqualität hätte. Daher wurde an der University of Bath eine Forschung an gepressten Lehmsteinen (CEB) unternommen, um experimentell die Auswirkung der Stabilisierung von Lehmbaustoffen auf den Feuchtigkeitsausgleich von Lehmwänden zu untersuchen.

# Erstellung der Proben

Die verwendeten Rohlehme sind eine Mischung aus Ton, Schluff, Sand sowie etwas Kies und enthalten normalerweise keine organischen Bestandteile. Das Verhältnis von Sand zu Ton variiert in Abhängigkeit davon, wie der Rohlehm gepresst wird (Stampflehm, gepresste Lehmsteine, Wellerlehm). Barbosa u.a. (2007) schlagen eine bevorzugte Mischung für gepresste Lehmsteine zwischen 10 bis 20% Ton, 10 bis 20% Schluff und 50-70% Sand vor. Anteile einer Größe über 2 mm (Kies) und bis zu 4 mm sollten, wenn überhaupt vorhanden, ein Maximum von 3% nicht überschreiten.

Die Korngrößenverteilung, die für diese Studie verwendet wurde zeigt die Tabelle 1. Der Lehm kommt aus der Wealden Lehmregion in West Sussex im Vereinigten Königreich. Er wurde erschlossen durch die frühere Baggeridge Ziegelei. Dieser Rohlehm wurde umfangreich für die Herstellung gebrannter Ziegel verwendet und repräsentiert 6% der britischen Lehmvorkom-

Korngrößen	Rohlehm (%)	unstabilisierter Stein (%)
Sand (2-0,063 mm)	14,0	57,0
Schluff (0,063-0,002 mm)	52,0	26,0
Ton (<0,002 mm)	34,0	17,0

Tabelle 1: Korngrößenverteilung eines Rohlehms und einer abgestimmten Mischung

# The effect of stabilisation on humidity buffering of earth walls

A high indoor relative humidity (RH), over 70%, is identified as a main factor provoking mould growth and the proliferation of dust mites. A high humidity level also increases the amount of Volatile Organic Compounds (VOCs) emitted into the air by indoor materials (Fang et al., 1999).On the other hand low relative humidity under 40% has a direct effect on the human mucus membrane (Minke, 2009). The occupant's health is one of the main issues when considering the importance of regulating indoor climate. Since the 1970s, driven by an increasing consciousness of limited resources being wasted, insulation in individual housing has significantly increased and the amount of fresh air was reduced to 0.2 or 0.3 air exchanges per hour to increase heating efficiency (Jones, 1998). But reduced air exchange rate does increase the amount of trapped humidity in buildings. Energy consuming mechanical ventilation or air conditioning was considered to resolve the problem, although it reduced the environmental benefit gained in the first place and brought up new Indoor Air Quality (IAQ) related health issues. At present, the tendency for this short term solution is to be replaced by a more sustainable alternative. This can be achieved by passively controlling indoor humidity levels by porous hygroscopic building materials (Rode et al., 2005, Padfield, 1998). Earth as a building material presents attractive advantages in this direction because of its low embodied energy and high moisture adsorption capacity (Morton, 2010, Minke, 2009).

In spite of numerous earth buildings surviving thousands of years, there are concerns in the mainstream construction industry that earth has poor durability and stabilisers are sometimes used with earth materials for increasing strength and durability. Cement and lime are the most common stabilisers with less than 10% per weight of cement or lime sufficient to provide a significant gain in strength and durability. More specifically, they play an important role in resisting to water erosion. A further increase of stabiliser to higher percentages would increase embodied energy, to a point where it is competing with conventional materials. With an increasing interest in the use of geopolymers as a low embodied carbon form of stabilisation for earth construction, stabilisation methods also include geopolymer stabilisation for this study. Geopolymers are inorganic polymeric materials obtained from "the chemical reaction of alumino-silicate oxides (AI 3+ in IV-fold coordination) with alkali polysilicates yielding polymeric Si–O–AI bonds" (Davidovits, 1991).

It is a common belief among some practitioners that stabilisation inhibits moisture buffering capacity and that this would have a detrimental effect on indoor air quality. Therefore, research was carried out at the University of Bath on stabilised compressed earth blocks (CEB) to experimentally determine the effect of stabilisation on moisture buffering capacity.

# **Sample Preparation**

The soils used for construction are a mixture of clay, silt, sand, and rarely gravel and usually contain no organic material. The ratio of sand to clay varies according to how soil is to be compressed (rammed earth, compressed earth blocks, cob). Barbosa et al (2007) suggest that the desirable mix for compressed earth blocks should be within the ranges of 10 to 20% of Clay, 10 to 20% of silt and 50 to 70% of sand. Particles with sizes above 2 mm (gravel) and up to 4 mm should be kept to a maximum of 3%, if any.

The soil particle size distribution used for this study is presented in table 1. This clay originates from the Wealden Clay group in West Sussex in the UK. It has been extracted by the former Baggeridge Brick manufacturer. This soil was extensively used for making fired clay bricks and represents 6% of British Brick clay resources (Reeves et al., 2006). The soil has high clay content, therefore a mix ratio of 50% soil and 50% fine sand was used to readjust particle size distribution within the acceptable ranges. The silt content remains high, however it has been considered as acceptable. In the case of cement and lime stabilised bricks, stabiliser contents of 4% and 8% per dry weight of sample have been added. In the case of the geopolymer stabilised brick, 3% per dry weight of dissolved NaOH (Sodium Hydroxide) was added which has been recommended by Davidovits (Davidovits, 2011).

Particle Size	Builders Clay (%)	Unstabilised Block (%)
Sand (2-0.063 mm)	14.0	57.0
Silt (0.063-0.002 mm)	52.0	26.0
Clay (<0.002 mm)	34.0	17.0

Table 1: Particle size distribution of initial soil and adjusted mix



men. (Reeves u.a., 2006). Der Rohlehm hat einen hohen Tongehalt, daher ist das Mischungsverhältnis 50% Rohlehm und 50% feiner Sand, um die Kornverteilung in einen akzeptablen Bereich zu bringen.

Der Schluffgehalt bleibt hoch, wird jedoch als akzeptabel befunden. Im Fall von zement- bzw. kalkstabilisierten Steinen wurden Trockengewichts-Anteile von 4% und 8% hinzugefügt. Im Fall von geopolymerstabilisierten Steine wurden Trockengewichts-Anteile von 3% als gelöstes NaOH (Natriumhydroxid) hinzugefügt, wie von Davidovits (Davidovits, 2011) empfohlen.

Padfield (Padfield, 1998) zeigte, dass die Feuchtigkeitseindringtiefe in seine Proben zwischen täglichen Luftfeuchtigkeits-Zyklen von 20% bis 90% unter 15 mm blieben, bei einer Gesamtstärke von 40 mm. In Anbetracht dieser Ergebnisse wird die Stärke der Probekörper in unserer Studie als ausreichend betrachtet, da sie keine einschränkende Wirkung auf den Feuchtigkeitsausgleich hat. Auf Grund des manuellen Pressens hatten die fertigen Steine eine Stärke von 47-48 mm und eine Trockenrohdichte von 1800 kg/m<sup>3</sup>. Nach dem Pressen wurden die Steine zum Trocknen in die Klimakammer bei 20°C und 60-65% relativer Luftfeuchte (RL) für 3 Wochen bis zu 1 Monat gelagert, bis keine wesentlichen Gewichtsveränderungen mehr messbar waren. Die Geopolymersteine wurden vor der Lagerung in der Klima-

	trocken		feucht	
	Biegezug- festigkeit	Druck- festigkeit	Biegezug- festigkeit	Druck- festigkeit
unstabilisiert	0,05	0,45	0,00	0,00
4% Zement	0,11	1,12	0,00	0,00
8% Zement	0,14	1,67	0,15	0,52
3% NaOH	1,04	3,53	0,44	1,63
4% Kalk	_	_	_	_
8% Kalk	_	_	_	_

Tabelle 2: Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeit in MPa

1 Sorptionsverhalten / Sorption kinetics graph

74 – LEHM 2012

Moisture sorption (g/m<sup>2</sup>)

kammer 48 Stunden auf 80 °C erhitzt, um die Geopolymerisation zu ermöglichen.

# Versuche und Ergebnisse

# Stabilisierungsvorteile

Biegezug-, Druckfestigkeits- und Erosionstests wurden an den zement- und geopolymerstabilisierten Probekörpern gemäß der Anleitung aus dem "Australischen Lehmbauhandbuch" (Walker, 2005) durchgeführt.

Die stabilisierten Proben zeigten eine Verbesserung der Biegezug- und Druckfestigkeit im trockenen Zustand. Tabelle 2 zeigt die ermittelten Ergebnisse (kalkstabilisierte Proben wurden bisher nicht getestet). Die beschleunigte Erosionsrate schwand von 2968 mm/h bei unstabilisierten Proben auf 5 mm/h bei 4% Zementstabilisierung und auf 2 mm/h bei 8% Zementstabilisierung.

# Sorptionsverhalten

Um das Sorptionsverhalten des Materials auf einen Feuchtigkeitswechsel über einen gewissen Zeitraum zu dokumentieren, wurden Versuche anhand einer modifizierten Version des NORDTEST Versuchsablaufs (Rode u.a, 2005) durchgeführt. Auf Grund begrenzter Ausstattung wurde nur die relative Luftfeuchte (RL) verändert, womit realistischere Feuchtigkeitsbedingungen angewandt werden konnten. Die Klimakammer wurde auf 23°C eingestellt, während RL-Wechsel von 8h hoher Luftfeuchte (85%) und 16h geringer Luftfeuchte (50%) betrachtet wurden. Innerhalb dieser Zyklen wurde die Gewichtsveränderung der Proben erfasst, abhängig von der Aufnahme und Abgabe des Wasserdampfs aus der bzw. an die Raumluft. Die Sorption konnte nur an einer Oberfläche der Probekörper stattfinden, da die anderen fünf Seiten mit wasserdampfdichtem Aluminiumband abgeklebt waren, um die eindimensionale Einwirkung sicherzustellen. Bild 1 zeigt Ergebnisse dieser Proben, die Sorption ist dargestellt in g/m<sup>2</sup> gegenüber der Zeit. Schließlich wurden zwei gleichmäßige Zyklen für jede Zyklenform und jeden Probekörper erreicht. Die Diagramme zeigen einen Mittelwert für drei Proben pro Stabilisierungsmethode. Gleichmäßige Zyklen sind solche, die sich selbst vollständig wiederholen, was wiederum erreicht wird, wenn das Eingangs- und Ausgangsgewicht der Probeläufe gleich sind (Delgado u.a., 2006). Die Studie von DelPadfield (Padfield, 1998) showed that the moisture penetration depth into his specimens during daily RH cycles from 20% to 90% was below 15 mm on a total thickness of 40 mm. Considering these results the thickness of the specimens tested in this study was taken to be sufficient, therefore not having a limiting influence on the moisture buffering.

Due to the manual compaction method used, the finished blocks had a thickness of 47-48 mm and a dry density of 1800 kg/m<sup>3</sup>. Once pressed the blocks were left to dry in the conditioning laboratory at 20 °C and 60-65% relative humidity for 3 weeks to 1 month until no further significant weight change was measured. The geopolymer blocks were heated to 80 °C for 48 hours before placing in the conditioning room to allow geopolymerization.

## **Testing and Results**

# **Stabilisation benefits**

Flexural, compressive strength and erosion tests were performed on the cement and geopolymer stabilised samples following the protocol set out in the "The Australian Earth Building Handbook" (Walker, 2005). Stabilised samples showed an increase in dry flexural and compressive strength. Table 2 shows the obtained results (limes samples have not been tested yet). The accelerated erosion rate decreased from 2968 mm/h for an

	dry		wet	
	flexural strength	compressive strength	flexural strength	compressive strength
Unstabilised	0.05	0.45	0.00	0.00
4% cement	0.11	1.12	0.00	0.00
8% cement	0.14	1.67	0.15	0.52
3% NaOH	1.04	3.53	0.44	1.63
4% lime	_	_	_	_
8% lime	_	_	_	_

Table 2: Flexural and compressive strength results in MPa

unstabilised sample to 5 mm/h for a 4% cement stabilisation and 2 mm/h for an 8% cement stabilisation.

#### Sorption kinetics

To record the material's sorption behaviour to a humidity change over time, tests were carried out in accordance with a modified version of the NORDTEST protocol (Rode et al., 2005). Only the RH levels were modified due to equipment limitation, and in so doing more realistic humidity conditions were applied. A climatic chamber was set at 23 °C, whilst RH cycles of 8h high humidity (85%) and 16 hours of low humidity (50%) were considered. During such cycles the weight change in the sample was recorded, corresponding to sorption and desorption of water vapour from/to the air. Sorption could only occur on one face of the blocks as the other five faces were sealed with vapour impermeable aluminium tape to ensure one dimensional conditions. Figure 1 shows results for all samples, the sorption/desorption is plotted in g/m<sup>2</sup> versus time. At least two stable cycles were obtained for each cycle and each sample the curves represent the average for three samples per stabilisation method. Stable cycles are those that fully repeat themself, and this is achieved when initial and final weight of cycles are equal (Delgado et al., 2006). The study by Delgado et al. (2006) shows also that unstable cycles would lead to overestimate moisture buffering values.

The experimental results relate Delgado's observation of the sorption kinetics to CEB. The sorption follows a two-step process to a relative humidity change. The general trend in Fig. 1 shows a linear, rapid and short initial sorption rate, followed by a second rate, corresponding to an asymptotic curve which would finally reach a plateau. The second rate determines the maximum moisture uptake after 8 hours. This maximum moisture uptake is time depended and does not correspond to the equilibrium moisture content. The stabilisation mainly has an effect on the sorption rate in the second step, reducing its maximum sorption capacity.

#### **Moisture Buffering Value**

The moisture buffering value (MBV), expressed in  $g/(m^2.\%RH)$  was an outcome of the NORDTEST project and it is determined from sorption kinetics measurements. It is obtained from the adsorbed moisture per square meter after 8 hours. The RH



gado u.a. (2006) zeigt auch das ungleichmäßige Zyklen zu überschätzten Werten für den Feuchtigkeitsausgleich führen.

Die Versuchsergebnisse entsprechen Delgados Beobachtungen zum Feuchtigkeitsverhalten von CEB. Die Sorption folgt einem zweistufigen Prozess eines RL-Wechsels. Der generelle Trend in Bild 1 zeigt eine lineare, schnelle und kurze Eingangssorptionsphase, gefolgt von einer zweiten Phase, vergleichbar einer asymptotischen Kurve die letztlich einen ebenen Verlauf nimmt. Die Verlaufsspitze bestimmt die maximale Feuchtigkeitsaufnahme nach 8h. Diese maximale Feuchtigkeitsaufnahme ist zeitabhängig und hängt nicht vom Ausgleichfeuchtegehalt ab. Die Stabilisierung hat vorrangig einen Einfluss auf den zweiten Messwert (Spitzenwert), da das maximale Aufnahmevermögen reduziert ist.

Tabelle 3 Fasst die Mittelwerte der aufgenommen Feuchtigkeit in g/m<sup>2</sup> pro Stabilisierungsmethode zusammen und die daraus folgende Verringerung verglichen mit den unstabilisierten Steinen. Die Zugabe von 8% Masseanteilen Zement oder Kalk reduziert die Feuchtigkeitsaufnahme nach 8h um über 20%.

### Wert des Feuchtigkeitsausgleichs

Der Wert des Feuchtigkeitsausgleichs (MBV), ausgedrückt in  $g/(m^2.\%RL)$  war ein Ergebnis des NORDTEST Projektes und wird

	nach 1h		nach 8h	
	w g/m²	Verringerung %	w g∕m²	Verringerung %
unstabilisiert	30,0	-	86,5	_
Kalk 4%	25,0	16,7	75,0	13,3
Kalk 8%	26,4	12,1	67,9	21,5
Zement 4%	26,9	10,4	75,1	13,1
Zement 8%	19,8	33,9	63,5	26,6

Tabelle 3: Feuchtigkeit, aufgenommen nach 1h und 8h, Werte sind aus experimentellen Versuchen zum Feuchteverhalten erfasst. Die Verringerung zieht den Vergleich zu den Ergebnissen der unstabilisierten Proben. w = Gewicht des aufgenommen Wassers.

2 Darstellung einer typischen Pore zwischen zwei Tonmineralen und die Prozesse 1 und 2

	<b>w<sub>eq g/m²(/8h)</sub></b>	<b>MBV</b> g/(m².%RH)
unstabilisiert	86,50	2,47
Zement 4 %	75,00	2,14
Zement 8%	63,48	1,81
Kalk 4%	75,00	2,14
Kalk 8%	67,92	1,94

Tabelle 4: Wertes des Feuchtigkeitsausgleichs (MBV),  $w_{\rm eq}$ ist das the Maximum adsorbierter Feuchtigkeit nach 8h hoher RL

bestimmt von Messungen des Feuchtigkeitsverhaltens. Er wird ermittelt aus der absorbierten Feuchtigkeit pro m<sup>2</sup> nach 8h. Der RL Gradient den Rode u. a. (2005) nutzten ist 33-75%. Doch auf Grund von Einschränkungen in der Technischen Ausstattung wurde der Test unter einem 50-85% RL Gradient durchgeführt. Wie eine vorhergehende Studie zeigte, führt eine Veränderung des RL Niveaus in jedem Schritt nicht zu einer nennenswerten Veränderung des kalkulierten Wertes des Feuchtigkeitsausgleichs (MBV) (Delgado u. a., 2006). Tabelle 4 zeigt den Wert des Feuchtigkeitsausgleichs (MBV) ermittelt aus Versuchswerten der Probekörper dieser Studie.

## Diskussion

Poröse Lehmbaustoffe aus Ton, Sand und Schluff können Raumluftfeuchte durch drei wesentliche Prozesse speichern (Rouquérol u. a., 1999):

- 1. Durch das Absorbieren von Wassermolekülen in der inneren Oberfläche der Partikel.
- 2. Durch das Absorbieren von Wassermolekülen in Mesoporen (2 to 50 nm) und Makroporen (>50 nm). Diese Phenomen ist auch bekannt als Kapillarkondensation.
- 3. Durch die Hydration von Kationen die sich im Zwischenraum der verschiedenen Typen von Tonmineralen befinden (Quellende Tone). Wenngleich quellende Tone in unseren Probekörpern nicht nennenswert vertreten waren. Nur Prozess 1 und 2 wurde beachtet.

Nach aktuellem Wissenstand ist es nicht klar, welches Phänomen in welcher Phase (1 oder 2) eintritt. Wie auch immer die Prozesse genau eintreten, in jedem Fall ist der zweite mit dem ersten verbunden (Rouquérol u.a., 1999). Das Verständnis die-

 $<sup>{\</sup>bf 2}$  Representation of a typical pore between two clay minerals and the processes 1 and 2

gradient used by Rode et al. (2005) is 33-75%, but because of equipment limitations the test was conducted under 50-85% RH gradient. According to a previous study the variation of the RH levels for each step does not lead to a major variation of the calculated MBV (Delgado et al., 2006). Table 4 gives the MBV calculated from experimental values for the samples tested in this study.

# Discussion

Porous earth building material composed of clay, sand and silt can store atmospheric moisture through three main processes (Rouquérol et al., 1999):

- 1. By adsorbing water molecules onto particle surface
- 2. By adsorbing water molecules into mesopores (2 to 50 nm) and macropores (> 50 nm). This phenomenon is also known as capillary condensation
- 3. By hydrating cations contained in the interlayer space of certain types of clay minerals (swelling clays). However, since swelling clays do not occur in our samples under significant amounts. Only Process 1 and 2 are taken into account.

It is not clear with actual knowledge which phenomenon occurs at which stage (1 or 2). However the two processes certainly occur as the second is linked to the first (Rouquérol et al., 1999). Understanding this link may be of great importance. Figure 2

	after 1 hr		after 8 hrs			
	<b>w</b> g/m²	reduction %	<b>w</b> g/m²	reduction %		
Unstabilised	30.0	-	86.5	_		
Lime 4%	25.0	16.7	75.0	13.3		
Lime 8%	26.4	12.1	67.9	21.5		
Cement 4%	26.9	10.4	75.1	13.1		
Cement 8%	19.8	33.9	63.5	26.6		

Table 3: Moisture adsorbed after 1h and 8 hrs, values are retrieved from experimental sorption kinetics values. The reduction compares the results to the unstabilised samples.

	<b>w<sub>eq g/m²(/8h)</sub></b>	<b>MBV</b> g/(m².%RH)
Unstabilised	86.50	2.47
Cement 4%	75.00	2.14
Cement 8%	63.48	1.81
Lime 4%	75.00	2.14
Lime 8%	67.92	1.94

Table 4: Moisture Buffering Values,  $w_{\text{eq}}$  is the maximum adsorbed moisture after 8hrs of high RH

shows a representation of a typical pore between two clay minerals and the representation of process 1 and 2.

Soil-cement interactions have previously been studied for road construction. Mitchell and El (1966) describe a complex interaction during the curing of cement or lime mixed with a pure kaolinite soil. It appeared through electron microscopy that clay particles have been degraded and the hydration reaction products seem to "interlock the chemically attacked Kaolinite" (Mitchell and El, 1966). The amount of cement added was much higher in soil-cement for road construction (24%), anyway a similar reaction would be expected to occur in stabilised compressed earth blocks to a certain extent.

Considering these observations from literature, influence on the moisture buffering may be due to a reduced amount of sorption sites (degradation of clay particles surfaces and/or porosity, see figure 2) and/or a reduced accessibility to these sites (reduced vapour permeability or interlocking of sorption sites). This will lead to some further investigation.

The moisture buffering value is useful for comparing building materials. The report of the Nordtest report (Rode et al., 2005) presents a classification for building materials using the experimental or practical MBV. Five classes have been determined: negligible, limited, moderate, good and excellent. According to this classification, unstabilised and 4% stabilised bricks could be considered as "excellent", whereas 8% stabilised bricks would classify as "good" buffering materials. Recently Allinson and Hall have tested stabilised rammed earth with two samples classified as "moderate" and "good" buffering materials. This

ser Beziehung ist von großer Bedeutung. Bild 2 zeigt eine Darstellung einer typischen Pore zwischen zwei Tonmineralen und die Prozesse 1 und 2.

Das Zusammenwirken von Rohlehm und Zement wurde zuvor für den Straßenbau untersucht. Mitchell und El (1966) beschreiben eine komplexe Interaktion zwischen dem Erhärten des Zements oder Kalks, der mit einer reinen Kaolinerde gemischt wurde. Unter dem Elektronenmikroskop war zu beobachten, dass die Tonpartikel geschwächt wurden und die Reaktionsprodukte der Hydration "die chemisch angegriffenen Kaolinite blockierten" (Mitchell und El, 1966). Die Menge des zugefügten Zements beim Rohlehm-Zement für den Straßenbau war viel größer (24%). Dennoch kann eine ähnliche Reaktion in den stabilisierten Lehmsteinen bis zu einem gewissen Punkt erwartet werden. Betrachtet man diese Beobachtungen aus der Literatur kann der Einfluss auf den Feuchteausgleich auf die Verringerung der Sorptionsoberfläche (Schwächung der Aufnahmefähigkeit der Tonpartikeloberfläche und/oder deren Porösität Bild 2) und/oder verringerten Zugang zu diesen Oberflächen (geringere Wasserdampfdiffusion durch blockierte, verschlossene Sorptionsoberflächen) zurückgeführt werden. Dies wird zu einigen weiteren Untersuchungen führen.

Der Wert des Feuchtigkeitsausgleichs (MBV) ist hilfreich zum Vergleich von Baumaterialien. Der Nordtest Report (Rode u.a., 2005) präsentierte eine Klassifizierung von Baumaterialien unter Verwendung des experimentellen oder praktischen Wertes des Feuchtigkeitsausgleichs (MBV). Fünf Klassen wurden gebildet: vernachlässigbar, begrenzt, mäßig, gut und exzellent. Bezugnehmend auf diese Klassifizierung können unstabilisierte und mit 4% stabilisierte Lehmsteine als "exzellent" betrachtet werden, 8% stabilisierte Steine als "gut" ausgleichende Materialien eingestuft würden. Vor kurzem testeten Allinson und Hall stabilisierten Stampflehm, wobei zwei Proben als "mäßig" und "gut" ausgleichende Materialien klassifiziert wurden.

Dies zeigt die gleichen Ergebnisse wie die des Gipsverbandes Nordtest Round Robin mit MBV praktisch verlaufend von 0.68 bis 1.29 g/(m<sup>2</sup>.%RL) (Allinson und Hall, 2011). Eckermann und Ziegert (Eckermann und Ziegert, 2006) testeten Lehm- und herkömmlichen Putz mit Werten von 1.29 bis 1.83 g/(m<sup>2</sup>.%RL). Konventionelle Zement- oder Kalkputze weisen Werte zwischen 0.16 und 0.73 g/(m<sup>2</sup>.%RL) auf und werden daher als "begrenzt" oder "mäßig" ausgleichend klassifiziert.

# Zusammenfassung

Bezugnehmend auf das Nordtest Projekt (Rode u. a., 2005) wurden dynamische Sorptionstests an unstabilisierten, zementstabilisierten, kalkstabilisierten und geopolymerstabilisierten Probekörpern durchgeführt. Die Testergebnisse zeigten, dass die Meinung einiger Praktiker korrekt ist, dass das Feuchtigkeitsausgleichsverhalten von Lehmsteinen durch die Zugabe von typischen Stabilisatoren beeinflusst wird. Obwohl dem so ist, zeigten andere Tests, die in diesem Rahmen nicht vorgestellt werden können, dass ein anderer Rohlehm und das Herstellungsverfahren der Steine einen größeren Einfluss auf den Feuchteausgleich haben, als die Zugabe geringer Menge Stabilisatoren. Aus allgemeiner Perspektive bestätigen die Ergebnisse erneut das hohe Ausgleichspotenzial von Lehmbaustoffen. Weiter Untersuchungen werden an der University of Bath unternommen werden, um die beteiligten Prozesse besser zu verstehen.

#### Referenzen

Siehe englischsprachigen Text.

showed similar results to those of the gypsum board from the Nordtest Round Robin test with MBVpractical ranging from 0.68 to 1.29 g/(m<sup>2</sup>.%RH) (Allinson and Hall, 2011). Eckermann and Ziegert (Eckermann and Ziegert, 2006) tested clay and conventional plaster with values ranging from 1.29 to 1.83 g/(m<sup>2</sup>.%RH). Conventional cement or lime plaster showed values between 0.16 and 0.73 g/(m<sup>2</sup>.%RH), therefore classifying as "limited" or "moderate".

#### Conclusion

According to the Nordtest project (Rode et al., 2005), dynamic sorption tests were performed on unstabilised, cement stabilised, lime stabilised and geopolymer stabilised samples. Test results showed that the opinion of some practitioners is correct and the moisture buffering performance of earth bricks is affected by the addition of typical stabilisers. Although stabilisation does affect the moisture buffering, other tests not included in this paper have shown that the use of a different soil and manufacturing method can have a larger effect on moisture buffering than the addition of small amounts of stabiliser. From a general perspective, the experimental results confirm again the high buffering potential of earth material. Further research will be conducted at the University of Bath to better understand the mechanisms involved.

#### References

- ALLINSON, D. & HALL, M. 2011. Humidity buffering using stabilised rammed earth materials. Construction Materials Proceedings of the institution of Civil Engineers.
- DAVIDOVITS, J. 1991. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. Journal of thermal analysis, 37, 1633-1656.
- DAVIDOVITS, J. 2011. Geopolymer Chemistry and Applications, 3rd Ed, Institut Géopolymère.
- DELGADO, J., RAMOS, N. & DE FREITAS, V. 2006. Can moisture buffer performance be estimated from sorption kinetics? Journal of building physics, 29, 281.
- ECKERMANN, W. & ZIEGERT, C. 2006. Auswirkung von Lehmbaustoffen auf die Raumluftfeuchte.
- FANG, L., CLAUSEN, G. & FANGER, P. O. 1999. Impact of temperature and humidity on chemical and sensory emissions from building materials. Indoor Air, 9, 193-201.
- JONES, A. 1998. Asthma and domestic air quality. Social Science & Medicine, 47, 755-764.
- MINKE, G. 2009. Building With Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture, Birkhäuser.

- MITCHELL, J. K. & EL, J. 1966 THE FABRIC OF SOIL CEMENT AND ITS FOR-MATION, FOURTEENTH NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAY MINERALS.
- MORTON, T. 2010. Earth Masonry: Design and Construction Guidelines (Ep 80), Taylor & Francis.
- PADFIELD, T. 1998. The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity. Department of Structural Engineering and Materials, Lyngby, Technical University of Denmark, 150.
- REEVES, G. M., SIMS, I., CRIPPS, J. C. & LONDON, G. S. O. 2006. Clay Materials Used in Construction, Geological Society.
- RODE, C., PEUHKURI, R. H., MORTENSEN, L. H., HANSEN, K. K., TIME, B., GUS-TAVSEN, A., OJANEN, T., AHONEN, J., SVENNBERG, K. & ARFVIDSSON, J. 2005. Moisture buffering of building materials. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- ROUQUÉROL, F., ROUQUEROL, J. & SING, K. S. W. 1999. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications, Academic Press.
- WALKER, P. 2005. Rammed earth: design and construction guidelines, BRE Bookshop.