Effekte chemischer Stabilisierung auf das Mineralgerüst von Baulehmen

Stabilisierter Lehm wird bei der Errichtung von Straßen, Fahrbahnen und Konstruktionselementen wie Wänden verwendet. Neben dem Verdichtungsprozess werden üblicherweise anorganische Zusätze wie Kalk und Zement für stabilisierten Lehm verwendet. Stabilisierter Lehm kann zu hochverdichteten Blöcken gepresst werden, welche für lastabtragendes Mauerwerk in Gebäuden und für andere Konstruktionen verwendet werden können. Solche Blöcke werden Stabilisierte Lehmblöcke genannt und für Baukonstruktionen verwendet. Stabilisierte Lehmblöcke ziehen ihre Festigkeit aus dem Verdichtungsprozess, der zu einer hohen Dichte führt, und den zementhaltigen Anteilen, die als Stabilisatoren dienen.

Lehm ist der Ausgangsstoff für stabilisierte Lehmblöcke und gebrannte Ziegel. Der Mechanismus der Verfestigung in stabilisierten Lehmblöcken (SSB) und gebrannten Ziegeln ist unterschiedlich. Bei den gebrannten Ziegeln werden die Tonminerale durch den Brennvorgang (800-1000°C) vollständig zerstört und es ist nicht möglich die Tonminerale wiederherzustellen. Bei den SSB hingegen ist es möglich am Ende des Lebenszyklus der Produkte wieder Tonminerale zu erhalten. Der Bericht beschreibt die Untersuchungen der Zustände von Tonmineralen in SSB und die Bestätigung dieser Annahme.

Die Technologie der stabilisierten Lehmsteine

Stabilisierte Lehmsteine sind auch als "compressed earth blocks (CEB)" oder "stabilised mud blocks (SMB)" bekannt. Sie besitzen einen geringen Primärenergiegehalt. Sie werden weltweit für lastabtragendes Mauerwerk verwendet (Heathcote 1991, Walker und Stace 1997, Walker u.a. 2000, Houben und Guillaud 2003, Walker 2004, Reddy und Walker 2005, Reddy und Gupta 2005, Reddy u.a. 2007, Reddy u.a. 2009). Die Idee der SSB entstand bei der Herstellung von handgepressten Steinen in den frühen 40er Jahren des 19. Jahrhunderts Nach der Einführung der handbetriebenen CINVA Presse in den fünfziger Jahren wurden Maschinen zur Herstellung von SSB entwickelt. Eine Vielzahl von Maschinen (sowohl manuell als auch mechanisiert) wurden in der Folge hergestellt und zur Produktion von SSB vermarktet. Dank der F&E Anstrengungen von Einzelnen als auch Organisationen ist die SSB Technologie inzwischen ausgereift und für die Errichtung lastabtragenden Mauerwerks weltweit kommerziell etabliert. Eine lastabtragende SSB Mauerwerkskonstruktion zeigt Bild 1. Neben der geringen Primärenergie sind die Verwendung lokaler Baustoffe, dezentrale Produktion, einfache Handhabung der Blöcke, etc. einige andere Hauptvorteile der SSB.

Grundsätzlich beinhalten Lehme größere Mengen an Tonen. Der Tongehalt solcher Lehme wird durch die Zugabe von Sand auf ein optimales Niveau gebracht und dann für die Produktion von SSB verwendet. Anorganische Zusätze wie Zement und Kalk werden üblicherweise als Stabilisatoren verwendet. Bild 2 zeigt die manuelle Produktion von SSB und deren Stapelung.

Die Eigenschaften der SSB werden durch die Lehmzusammensetzung (speziell die Art der Tonminerale), die Steindichte und die Art und den Anteil der Stabilisatoren bestimmt. Grundsätzlich werden Festigkeits-, Absorptions- und Dauerhaftigkeitseigenschaften untersucht, um die Qualität der SSB zu einzuschätzen. Ein enormes Wissen wurde zur SSB Technologie gesammelt und die technischen Details dieser Technologie finden sich in den Untersuchungen von Olivier und Mesbah (1987), Houben und Guillaud (2003), Heathcote (1991), Walker und Stace (1997), Walker (2004), Reddy und Walker (2005), Reddy und Gupta (2005 und 2006), Reddy u.a. (2007), Reddy u.a. (2009), sowie vielen anderen Veröffentlichungen.

Tabelle 1 gibt eine Reihe von Werten zu Formaten, Zementanteilen, Festigkeiten und Wasserabsorption von zementstabili-

Tabelle 1: Eigenschaften von zementstabilisierten Lehmblöcken (Walker 2004, Reddy und Walker 2005, Reddy und Gupta 2005, Ullas 2007)

		Druckfestigkeit (MPa)		
Format	Zementanteil (%)	gesättigt	trocken	Wasseraufnahme (%)
Länge: 200 – 300 mm Breite: 100 – 200 mm Höhe: 75 – 100 mm	5 - 10	3 - 10	7 – 15	8 – 15

Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science Bangalore, India

Status of clay minerals in stabilised soil blocks

Stabilized soils have long been used for the construction of roads, pavements and structural elements like walls. Apart from compaction process, inorganic additives such as lime and cement are commonly employed for stabilising soils. Soil with stabilisers can be compacted into high-density blocks, which can be used for load-bearing masonry in buildings and other structures. Such blocks are referred to as stabilised soil blocks and are used in building construction. Stabilised soil blocks derive strength from the process of compaction leading to higher density and the formation of cementitious products due to stabilisers.

Soil is the basic ingredient for the stabilised soil blocks and burnt clay bricks. The mechanism of strength development in stabilised soil blocks (SSB) and burnt clay bricks is different. In burnt clay bricks the clay minerals are completely destroyed due to high-temperature firing ($800^\circ - 1000^\circ$ C) and it is not possible to recover clay minerals, whereas with SSBs there is the possibility of recovering the clay minerals at the end of the product's life. This paper focuses on investigations to examine the status of clay minerals in SSBs and to verify this assumption.

Stabilised soil block technology

Stabilised soil blocks are also known as compressed earth blocks (CEB) or stabilised mud blocks (SMB). The stabilised soil block is a building material with a low level of embodied carbon. They are used for load-bearing masonry structures across the world (Heathcote 1991, Walker and Stace 1997, Walker et al 2000, Houben and Guillaud 2003, Walker 2004, Reddy and Walker 2005, Reddy and Gupta 2005, Reddy et al 2007, Reddy et al 2009). The concept of the SSB started with the manufacture of hand-moulded blocks in early 1940s. After the introduction of the manually operated CINVA ram press in fifties, machines were employed for the production of SSB. Varieties of machines (both manual and mechanised) are manufactured and now mar-

keted for SSB production. Due to the R&D efforts of individuals and organisations the SSB technology is now well matured and is being commercially exploited for the construction of loadbearing masonry structures across the world. A load-bearing SSB masonry building is shown in Fig. 1. Apart from low level of embodied carbon, other major advantages of SSB technology are utilisation of local materials, decentralized production, easily adjusted block strength, size and shape, etc.

Soils generally contain larger amounts of clay fraction. The clay content of such soils is adjusted to an optimum level by adding sand before being used for SSB production. Inorganic additives such as cement and lime are commonly used as stabilisers. Fig. 2 illustrates use of a manual press for SSB production and a stack of SSBs.

The characteristics of the SSB are controlled by the soil composition (especially the types of clay minerals), block density and the type and percentage of stabilisers. Generally, strength, absorption and durability characteristics are examined to assess the quality of SSBs. A vast amount of knowledge has accumulated on SSB technology and technical details on the technology can be found in the studies of Olivier and Mesbah (1987), Houben and Guillaud (2003), Heathcote (1991), Walker and Stace (1997), Walker (2004), Reddy and Walker (2005), Reddy and Gupta (2005 and 2006), Reddy et al (2007), Reddy et al (2009), and many other publications.

Table 1 gives range of values for cement-stabilized soil blocks, including block sizes, cement content, strength and water absorption. Use of 6-8% cement is common for load-bearing buildings of 2-3 storeys. The compressive strength of blocks in saturated condition is about half of their dry strength. Water absorption (i.e. saturated) is less than 15%.

Table 1: Characteristics of cement-stabilized soil blocks (Walker 2004, Reddy and Walker 2005, Reddy and Gupta 2005, Ullas 2007)

		Compressive strength (MPa)		
Block size	Cement content (%)	Saturated	Dry	Water absorption (%)
Length: 200 – 300 mm Width: 100 – 200 mm Height: 75 – 100 mm	5 - 10	3 - 10	7 – 15	8 – 15



sierten Lehmblöcken an. Die Verwendung von 6–8% Zement ist üblich für die lastabtragende Anwendung von SSB für 2-3 dreigeschossige Bauten. Die Druckfestigkeit der Blöcke unter gesättigten Bedingungen (maximale Wasseraufnahme) ist etwa die Hälfte der Trockenfestigkeit. Die Wasseraufnahme in diesem gesättigten Zustand ist unter 15%.

Mechanismus der Lehmstabilisierung

Lehm ist der Hauptanteil der SSB. Er setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: (a) Tonminerale und (b) Korngerüst in Form von Kies, Sand und Schluff. Die Eigenschaften des Lehms sind stark von der Art und Menge des vorhandenen Tonminerals abhängig. Dabei gibt es eine Menge von Tonmineralen in den Lehmen. Die häufigsten Tonminerale sind Kaolinit, Illit und Montmorillonit. Der Verfestigungsprozess in zement- und kalkstabilisierten Lehmen ist deutlich unterschiedlich.

Die Zementstabilisierung

Zementstabilisierung (mit üblichem Portlandzement) ist ideal bei grobkörnigen Lehmen. Die Zementpartikel in dem Lehm-Zement-Gemisch hydratisieren unter dem Anmachwasser. Dadurch entstehen zementartige Bestandteile wie Kalzium-Silikat Hydrat, Kalzium-Aluminat Hydrat, etc. neben der Abgabe/Freisetzung einer geringen Menge an Kalk. Diese Hydrationsprodukte bilden wasserunlösliche Bindungen und binden den Kies, Sand und Schluff im Lehm. Die zementartigen Produkte (Kalzium-Silikat Hydrat, Kalzium-Aluminat Hydrat, etc.) reagieren nicht mit den Tonmineralen, während die geringe Menge an Kalkanteilen aus dem Zementhydrationsprozess mit den Tonmineralen reagieren kann, um wiederum zementartige Bestandteile zu bilden. Die Festigkeit der SSB steigt mit dem Zementgehalt.



Die Kalkstabilisierung

Üblicherweise wird gelöschter Kalk (Kalziumhydroxid) für die Herstellung von SSB verwendet. In der Kalk-Lehm-Mischung reagieren die Tonminerale mit dem Kalk. Die Kalk-Lehm-Reaktion erfolgt durch die Bildung von wasserunlöslichem Gel aus Silikat und Silikat-Aluminaten, die schließlich mit der Zeit in Hydrate von Kalziumsilikat, Kalziumaluminate, etc. kristallisieren. Die zementartigen Bestandteile, die in der Kalk-Lehm-Reaktion entstehen, sind gleich denen, die in der üblichen Portlandzementhydration entstehen. Das zementartige Gel ist verantwortlich für die Bildung von Bindungen zwischen den Kornanteilen. Das Tempo der Kalk-Lehm-Reaktion ist sehr langsam, bei Außentemperatur und Aushärtungsbedingungen. Diese Reaktion kann bei zu geringer Feuchte in der Umgebung sehr lange dauern.

Die Tonminerale in dem Lehm bestimmen dessen Eigenschaften und unterstützen das Pflanzenwachstum. Strukturelle Veränderungen der Tonminerale finden beim Brennprozess in der Ziegelherstellung statt. Dies sind dauerhafte, unumkehrbare Veränderungen die dazu führen, dass der Lehm nahezu Steinstruktur annimmt. Mauersteine aus stabilisiertem Lehm gelten als umweltfreundlich und energiesparend. Die Frage ist allerdings, ob die stabilisierten Lehmsteine nach der Verwendung am Ende des Lebenszyklus des Gebäudes recycelt werden können. Es gibt Argumente, dass die Kalkstabilisierung besser ist, als die Zementstabilisierung, auf Grund der Annahme, dass es dabei eine Rekarbonatisierung unter Bindung von Kohlendioxid gibt. Ein Vergleich zwischen den Mechanismen der Verfestigung in zementund in kalkstabilisierten Lehmen zeigt, dass die Tonminerale im Kalkstabilisierungsprozess gebunden werden, während sie in zementstabilisierten Lehmen fast völlig ungebunden sind. Die vorliegenden Untersuchungen sollten diesen Punkt überprüfen.

Tabelle 2: Eigenschaften zermahlenen natürlicher und stabilisierter Lehmproben – Sand: 4,75 – 0,075 mm; Schluff: 0,075 – 0,002 mm, Ton: < 0,002 mm

Art der Stabilisierung	Atterbergtests		Lehmzusammensetzung (%)		Tor
	Filesgrenze (%)	Plastizitats index	Sanu	Schult	ION
Natürlicher Lehm (zermahlen)	33,3	25,6	44	36,4	19,6
Lehm + 7% Zement (zermahlen)	30	19,6	57,7	33,6	8,7
Lehm + 7% Kalk (zermahlen)	23	13,6	71	26,3	2,7
Lehm + 15% Kalk (zermahlen)	15	3,1	80,7	18,9	0,4

1 Gebäude aus lastabtragendem stabilisierten Lehmsteinmauerwerk

1 Load-bearing stabilised soil block masonry building

2 SSB Herstellung und Lagerung

2 SSB block-making process and stacked blocks



Mechanisms of soil stabilization

Soil is the major input in the production of stabilised soil blocks. Soil is composed of two types of particles: (a) clay minerals and (b) inert materials in the form of gravel, sand and silt. The characteristics of the soil are strongly influenced by the quantity and type of clay minerals present. Varieties of clay minerals exist in the soils. The most commonly occurring clay minerals are kaolinite, illite and montmorillonite. The mechanism of strength development in cement and lime-stabilised soils is distinctly different.

Cement stabilisation

Cement (ordinary Portland cement) stabilisation is ideally suited for coarse-grained soils. Cement particles present in the soil-cement mixture hydrate upon mixing with water. This will result in the formation of cementitious products like calcium-silicate hydrate (CSH), calcium aluminate hydrate (CAH), etc. apart from the release of small percentage of lime. These hydration products establish water insoluble bonds and bind the gravel, sand and silt particles present in the soil. Cementitious products (CSH, CAH, etc.) do not react with clay particles, whereas the small percentage of lime released in the cement hydration process could react with clay minerals forming additional cementitious products. The strength development in stabilised soil blocks can be mainly attributed to the formation of cementitious products. The strength of the SSB rises with increase in cement content.

Lime stabilisation

Generally, hydrated lime (calcium hydroxide) is used for the manufacture of SSBs. In the lime-soil mixture the clay minerals react with lime. The lime-clay reactions result in the formation of a water-insoluble gel of silicate and silicate-aluminates and this gel eventually crystallizes into hydrates of calcium silicate, calcium aluminates, etc. The cementing agents formed in lime-clay reactions are similar to those formed during ordinary Portland cement hydration. The cementitious gel is responsible for establishing bonding of the soil particles. The pace of limeclay reactions is very slow at ambient temperatures and curing conditions. These reactions can extend to long durations in the presence of a little moisture in the surrounding atmosphere.

Clay minerals present in the soil control the soil characteristics and support the growth of plant life. Structural changes to clay minerals occur during the firing process during the manufacture of burnt clay bricks. These are permanent irreversible changes and result in transforming the soil nearly into rock form. Building blocks from stabilised soils are considered eco-friendly and energy efficient. The question is whether the stabilised soil blocks can be recycled as soil at the end of the life cycle of the building. There are arguments that lime stabilisation is superior to cement stabilisation because of the assumption that re-carbonation will occur leading to the mitigation of carbon dioxide. A comparison between the mechanisms of strength development in cement and lime stabilised soils reveals that the clay mineral gets consumed in the lime stabilisation process, whereas clay minerals are nearly intact in cement stabilised soils. The present investigations attempt to prove this point.

Methodology and the experimental programme

Examining the status of clay minerals in the cement and lime stabilised soil compacts was the main objective of the investigation. A local soil was selected and reconstituted by diluting with sand. Grain size composition and Atterberg's limits of the reconstituted soil are given in Table 2. The soil has 15.8% clay size fraction and the predominant clay mineral is kaolinite. The

Table 2: Characteristics of ground natural soil and stabilised soil compacts – Sand: 4.75 – 0.075 mm; Silt: 0.075 – 0.002 mm, Clay: < 0.002 mm

Type of stabilization	Atterberg's limit	Atterberg's limits		Soil composition (%)		
	Liquid limit (%)	Plasticity index	Sand	Silt	Clay	
Natural soil (ground)	33.3	25.6	44	36.4	19.6	
Soil + 7% cement (ground)	30	19.6	57.7	33.6	8.7	
Soil + 7 % lime (ground)	23	13.6	71	26.3	2.7	
Soil + 15% lime (ground)	15	3.1	80.7	18.9	0.4	

3 Gepresste stabilisierte zylindrische Lehmprobekörper

3 Compacted stabilized soil cylindrical specimens





Vorgehen und experimentelles Programm

Die Beobachtung des Verhaltens von Tonmineralen in zementund kalkstabilisierten Lehmen war das Hauptziel der Untersuchungen. Es wurde ein lokal verfügbarer Lehm ausgewählt, der mit Sand abgemischt wurde. Die Korngrößenverteilung und die Atterbergsgrenzen des abgemischten Lehmes sind in Tabelle 2 dargestellt. Der Lehm hat 15,8% Tonfraktion und das vorherrschende Tonmineral ist Kaolinit. Die Fließgrenze und der Plastizitätsindex des Lehmes sind 26,9% und 17,5. Wenn man den Lehm zu feinem Mehl gemahlen hat (mit einer spezifischen Oberfläche von 14,1 m²/q) wächst der Anteil der Tonfraktion auf 19,6% und die entsprechende Fließgrenze und der Plastizitätsindex sind 33,3% und 25,6. Beim Mahlen des Lehms in feines Pulver werden einige der Sand- und Schluffbestandteile zerstört und führen so zu einem höheren Ton- und Schluffanteil in der zermahlenen Probe. Auch der Mahleffekt selbst reduziert die Sandanteile des Lehms. Die Bestandteile werden feiner und ihre Wasserbindungskapazität nimmt zu, was zu höheren Werten bei den Atterbergtests führt.

Die Untersuchungen an den verdichteten stabilisierten Lehmprobekörpern

Der trockene Lehm wurde mit Zement oder Kalk 10 Minuten in einer Kugelmühle gemischt.

Diese trockene Mischung aus Lehm und Stabilisator wurde dann mit einer entsprechenden Menge Wasser gemischt, bis ein einheitlicher (homogener) Mix erreicht war. Diese feuchte Mischung wurde mittels Schraubspindel in zylindrische Probekörper gepresst (Abmaße: 38 mm Durchmesser und 76 mm Länge). Die gepressten stabilisierten Lehmprobekörper (Bild 3) wurden unter feuchtem Leinen 28 Tage ausgehärtet und dann 14 Tage luftgetrocknet. Die luftgetrockneten Probekörper wurden dann im Ofen bei 50° auf ein konstantes Gewicht getrocknet und anschließend 48h in Wasser getaucht, bevor sie getestet wurden.

Bewertung des Verhaltens von Tonmineralen in stabilisierten Lehmproben

Der Anteil an Stabilisator (Kalk oder Zement) in den stabilisierten Lehmblöcken, die für Gebäudekonstruktionen verwendet werden, liegt üblicherweise zwischen 5-10%. Bei der vorliegenden Untersuchung wurden die Probekörper mit 7% Zement, 7% Kalk und 15% Kalk angemischt. Normaler Portlandzement und laborgeprüfter Kalk (mit 95% Reinheit) wurden zur Herstellung der gepressten zylindrischen Probekörper verwendet. Die beim Drucktest zerbrochenen Zylinder wurden getrocknet und in sehr feines Pulver zermahlen (mit einer spezifischen Oberfläche von 14,1 m²/g). Die spezifische Oberfläche des zermahlenen Probekörpers und des stabilisierten Probekörpers wurde konstant bei 14,1 m²/g gehalten. Folgende Tests wurden an den zermahlenen Probekörpern durchgeführt, um die Präsenz der ursprünglichen Tonminerale der gepressten stabilisierten Probekörper zu ermitteln:

- 1. Atterbergtests
- 2. Korngrößenverteilung
- 3. Röntgengraphische Untersuchung und REM Aufnahmen

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Tests an den Probekörpern aus natürlichen Lehmen und den zermahlenen stabilisierten Probekörpern zeigt die Tabelle 2. Die Tabelle zeigt Details der Zusammensetzung (Mischungsverhältnisse), die Atterbergtests, den Anteil an Stabilisatoren und den Anteil an Tonmineralen in den zermahlenen Probekörpern aus stabilisiertem Lehm. Die röntgengraphischen Untersuchungsergebnisse und Korngrößenverteilungskurven der natürlichen als auch der zermahlenen stabilisierten

Tabelle 3: Tonminerale in den zermahlenen natürlichen und stabilisierten Lehmproben

Art der Stabilisierung	Tonminerale in Sandanteil	Schluffanteil	Tonanteil	
Natürlicher Lehm (zermahlen)	Nil	Nil	Kaolinite	
Lehm + 7% Zement (zermahlen)	Kaolinite	Kaolinite	Kaolinite	
Lehm + 7% Kalk (zermahlen)	Nil	Nil	Kaolinite	

4 Röntgengraphische Analyse natürlicher und stabilisierter Lehmproben

4 XRD patterns for the natural and stabilized soils

5 SEM image for 7 % lime-stabilised specimen showing CSH gel

⁵ REM Aufnahme eines 7 % kalkstabilisierten Probekörpers, welcher CSH Gel aufweist



liquid limit and the plasticity index of the soil are 26.9% and 17.5. When the soil was ground to fine powder (specific surface = $14.1 \text{ m}^2/\text{g}$) the clay size fraction increases to 19.6% and the corresponding liquid limit and plasticity index values are 33.3% and 25.6. When the soil was ground to fine powder form, some of the sand and silt-sized particles were crushed, resulting in higher clay and silt size fraction in the ground sample. Moreover, the grinding effect reduced the sand size fraction of the soil. As the particles become finer, their water-holding capacity increases, which results in higher Atterberg value limits.

Casting of compacted stabilised soil specimens

The dry soil was blended with cement or lime by mixing in a ball mill for 10 minutes. The dry soil-stabiliser mixture was mixed with an adequate quantity of water to obtain a uniform mix. The wetted mixture of stabilised soil was compacted into a cylindrical specimen (size: 38 mm diameter and 76 mm height) using a screw jack set-up. The compacted stabilised soil specimens (Fig. 3) were cured under wet burlap for 28 days and then airdried for 14 days. The air-dried specimens were oven-dried at 50 °C to constant weight and then soaked in water for 48 hours prior to testing.

Assessing the status of clay minerals in the stabilised soil compacts

The stabiliser (lime or cement) content in the stabilised soil blocks used in building construction will generally be in the range of 5-10%. In the present investigation the specimens were prepared using 7% cement, 7% lime and 15% lime. Ordinary Portland cement and laboratory grade lime (with 95% assay) were used for the preparation of compacted cylindrical specimens. After the compression test the broken specimens were dried and then ground to a very fine powder (specific surface 14.1 m^2/g). The specific surface of the ground soil sample and stabilised soil specimens was kept constant at 14.1 m^2/g . The following tests were performed on the ground samples in order to assess the presence of original clay minerals present in the compacted stabilised soil specimens:

- 1. Atterberg's limits
- 2. Grain size distribution
- 3. X-ray diffraction and SEM imaging

Results and discussion

Results of the tests conducted on the natural soil and the ground-compacted stabilised soil specimens are given in Table 2. The Table gives details of textural composition, Atterberg's limits, stabiliser content and percentage of clay minerals in the ground stabilised soil compacts. XRD results and grain size distribution curves for the natural and the ground stabilised soil compacts are illustrated in Figs. 4 and 5 respectively. XRD studies were carried out on the entire range of the sample's grain size (i.e. clay, silt and sand size fractions). Table 3 gives the XRD results indicating the status of clay minerals in the sand, silt and clay-sized fractions of the ground-stabilised soil compacts and the ground natural soil. The following observations can be made from the results given in the above-mentioned tables and the XRD patterns.

a The clay size fraction of the ground samples (both natural soil and stabilised soil) can be obtained from the grain size distribution curves displayed in Fig. 6. The clay size fraction of the stabilised soil compacts (both cement and lime stabilised) is less than that of the clay content of natural soil. Atterberg's limit values of the soil decrease when it is stabilised with cement and lime. The percentage reduction in the Atterberg limit values is much smaller in cement-stabilised soils than in lime-stabilised soils.

Table 3: Clay minerals in the natural and ground-stabilized soil compacts

Type of stabilization	Clay minerals in Sand size particles	Silt size particles	Clay size particles
Natural soil (ground)	Nil	Nil	Kaolinite
Soil + 7% cement (ground)	Kaolinite	Kaolinite	Kaolinite
Soil + 7% lime (ground)	Nil	Nil	Kaolinite

6 Kornverteilungskurven des unbehandelten (natürlichen) Lehms und des zermahlenen stabilisierten Lehms

6 Grain size distribution curves for the soil, ground soil and ground-stabilized soils

Lehmprobekörper sind in Bild 4 und 5 entsprechend dargestellt. Röntgengraphische Untersuchungen wurden an allen Korngrößen der Probekörper durchgeführt (also in der Tonfraktion, dem Schluff und dem Sandanteil). Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der röntgengraphischen Untersuchung, die den Status (d. h. das Vorhandensein) von Tonmineralen in der Sand-, Schluff- und Tonkornfraktion des Lehmes der zermahlenen stabilisierten und der naturbelassenen Lehme angeben.

Folgende Beobachtungen können aus den Ergebnissen der oben erwähnten Tabellen und Röntgenbilder gezogen werden.

- a Die Tonmineralfraktion der zermahlenen Proben (sowohl der naturbelassenen als auch der stabilisierten Lehme) kann aus der Korngrößenverteilungskurve in Bild 6 abgelesen werden. Die Tonmineralfraktion der stabilisierten Proben (sowohl mit Zement als auch mit Kalk stabilisiert) ist kleiner als die in den naturbelassenen, unstabilisierten Lehmen. Die Atterbergtestwerte verringern sich bei den stabilisierten Lehmen. Die Reduktion der Atterbergtestwerte ist bei den zementstabilisierten Lehmen deutlich geringer als bei den kalkstabilisierten Lehmen.
- b Die Röntgenbilder der unstabilisierten Lehme als auch der stabilisierten Lehme (sowohl mit Zement als auch mit Kalk stabilisiert) zeigen die Anwesenheit von Kaolinit als Tonmineral. Die Aufnahmen können aber keine Angaben über die Menge der vorhandenen Tonminerale hergeben. Die Anwesenheit und die Quantität der Tonminerale ergibt sich aus der Korngrößenverteilung der Sande und des Schluffs in den zermahlenen stabilisierten Proben (Tabelle 3). Dies kann auf die Anhäufung der Sand und Schluffpartikel zurückgeführt werden, welche die Tonpartikel einschließen. Das spätere Zermahlen der fest zusammengefügten Körnungen setzt die Tonpartikel wieder frei.
- c Zermahlene zementstabilisierte Lehmproben zeigen einen Tonanteil von etwa 9% gegenüber 20% Tonanteil in den zermahlenen unstabilisierten Lehmprobekörpern (Bild 6). Es sollte erwähnt werden, dass es auch Tonminerale in der Sand und Schlufffraktion der zementstabilisierten Lehmproben gibt (Tabelle 3). Das bedeutet, dass der totale (tatsächliche) Tonmineralanteil in den zermahlenen zementstabilisierten Lehmproben erheblich höher als 9% ist. Wenn ein solcher Lehm der

weiteren, eingehenden Verwitterung ausgesetzt ist, werden die Tonminerale, die in den Zwischenräumen der größeren Körnungen eingefangen sind, nach und nach wieder freigesetzt.

d Zermahlene kalkstabilisierte Lehmproben weisen einen Tonanteil von 2,7% und 0,4% für 7% bzw. 15% Kalkstabilisierung auf. In den kalkstabilisierten Lehmproben befinden sich keine Tonminerale in der Schluff- bzw. Sandfraktion (Tabelle 3). Das zeigt klar, dass der Ton in der Kalk-Ton-Reaktion, die für die Festigkeitsentwicklung in den Probekörpern verantwortlich ist, verbraucht wurde. Röntgengraphische Untersuchung und REM Aufnahmen (Bild 4 und 5) für kalkstabilisierte Probekörper zeigen die Bildung zementartiger Bestandteile wie CSH, CAH, etc. Da auch der Kalk (Kalziumhydroxid) in der Kalk-Ton-Reaktion verbraucht wurde ist nicht viel Kalk für einen Rekarbonatisierungsprozess vorhanden.

Abschließende Bemerkungen

Die Präsenz von Tonmineralen in den zement- bzw. kalkstabilisierten Probekörpern wurde beobachtet und die Ergebnisse führten zu interessanten Schlüssen. Die über 28 Tage ausgehärteten zementstabilisierte Lehmprobekörper zeigen einen großen Anteil der natürlichen Tonminerale, verglichen zu den unstabilisierten Lehmproben. Tonpartikel sind auch in den Sand- und Schlufffraktionen enthalten. Im Falle der Kalkstabilisierung werden die Tonminerale im Verfestigungsprozess der Kalk-Lehm-Reaktion verbraucht. Es bleiben kaum freie Kalkanteile in den kalkstabilisierten Lehmproben bestehen, besonders wenn der Kalkanteil größer als 7% ist. In solchen Fällen ist eine Rekarbonatisierung des Kalks (Kalziumhydroxid) wegen des kaum vorhandenden freien Kalkanteils nicht möglich.

Die Untersuchungen, die in diesem Bericht vorgestellt werden, zeigen deutlich, dass es möglich ist, Tonminerale aus zementstabilisierten Lehmblöcken zurückzugewinnen, wenn sie der Verwitterung ausgesetzt sind. Es ist hingegen nicht möglich, die Tonminerale aus den kalkstabilisierten Lehmblöcken zurückzuerlangen, da die Tonpartikel für die Kalk-Lehm-Reaktion verbraucht werden. Daher ist die Zementstabilisierung vom Standpunkt der Rückgewinnung der wertvollen Tonminerale am Ende des Lebenszyklus des Gebäudes als besser zu bewerten.

Referenzen – Siehe englischsprachigen Text.

- b The XRD patterns for the natural soil as well as ground-stabilised soils (both lime and cement-stabilised soils) show the presence of kaolinite clay mineral. XRD patterns cannot indicate the quantity of clay minerals present in the soil samples. The presence of clay minerals is detected in the sand and siltsized fractions of the ground cement stabilised soil specimens (Table 3). This can be attributed to the aggregation of sand and silt particles trapping the clay particles. Further crushing of such strongly aggregated particles would release the trapped clay particles.
- c Ground cement stabilised soil samples show a clay size fraction of about 9% as against 20% in the ground natural soil sample (Fig. 6). It is to be noted here that there is clay mineral in the sand and silt-sized fractions of cement-stabilised soil (Table 3). This means the total clay mineral content present in the soil stabilised by ground cement is much more than 9%. If such a stabilised soil is subjected for further natural weathering or grinding, the clay minerals entrapped in the interstices of coarser aggregated particles will be released.
- d Soil samples stabilised by ground lime show clay fractions of 2.7% and 0.4% for 7% and 15% lime stabilisation respectively. In lime-stabilised specimens there are no clay minerals in the silt and sand-sized particles (Table 3). This clearly indicates that the clay has been consumed in the lime-clay reactions responsible for the development of strength in lime-stabilised compacts. The XRD and SEM images (Fig. 4 and 5) for lime stabilised compacts show the formation of cementitious products such as CSH, CAH, etc. As the lime (calcium hydroxide) is consumed in the lime-clay reactions, there is not much lime left for the re-carbonation process.

Concluding remarks

The presence of clay minerals in the cement and lime-stabilised soil compacts was examined and the results lead to some interesting observations. The 28-day cured cement stabilised soil specimens show large fraction of the natural clay minerals when compared with the percentage of clay in the natural soil. Clay minerals are also present in the aggregated silt and sand-sized particles. In the case of lime stabilisation, the clay minerals get consumed while deriving strength due to lime-clay reactions. Hardly any free lime was left in the lime-stabilised soil specimens especially when the lime content was more than 7%. In such situations re-carbonation of calcium hydroxide is not possible as hardly any free lime remains.

The investigations discussed in this paper clearly indicate that it is possible to retrieve the clay minerals in cement stabilised soil blocks when subjected to the weathering process. It is not possible to retrieve the clay minerals in lime-stabilised soil blocks as the clay gets consumed in the lime-clay reactions. Thus cement stabilisation is superior from the point of view of recovering the precious clay minerals at the end of life of buildings built with cement-stabilised soil blocks.

References

Houben, H., and Guillaud, H. (2003). *Earth Construction – A comprehensive guide*. CRATerre-EAG, Intermediate Technology Publications, Belgium.

Heathcote, K. (1991). Compressive strength of cement stabilized pressed earth blocks. Building Research and Information, 19(2), 101 – 105

Olivier, M., Ali, M. (1987). Influence of different parameters on the resistance of earth, used as a building material. Proc. Int. conf. on mud architecture, India.

Reddy, B. V. V., Walker, P. (2005). *Stabilised mud blocks: Problems, prospects.* Proc. Int. Earth Building Conf. Earth-Build 2005, Sydney, Australia, pp. 63–75. Reddy, B. V. V. (2008). *The stabilised mud block: a low carbon emission alternative for masonry buildings.* Proc. The 1st Intl. Conf. on Building Energy and Environment 2008, Dalian China, July 13-16, pp. 1397 – 1404.

Reddy B. V. V, Richardson Lal and Nanjunda Rao K. S. (2007). *Optimum soil grading for the soil-cement blocks*. Jl of Materials in Civil Engg. (ASCE), 19(2), pp. 139 – 148.

Reddy, B. V.V., Richardson Lal and Nanjunda Rao, K. S. (2009). *Influence of joint thickness and mortar-block elastic properties on the strength and stress-es developed in soil-cement block masonry.* Jl of Materials in Civil Eng., ASCE, 21(10), pp. 535 – 542

Walker, P., Reddy, B. V. V., Ali Mesbah, J-C Morel. (2000). *The Case for Compressed Earth Block Construction*. Proc. 6th Intl. Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Bangalore, Allied Publishers, pp. 27 – 35.

Reddy, B. V. V., and Gupta, A. (2005). *Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils*. Materials and Structures (RILEM), 38(280), pp. 651 – 658.

Reddy, B. V. V., and Gupta, A. (2006). *Strength and elastic properties of stabilised mud block masonry using cement soil mortars*. Jl. of Materials in Civil Eng. (ASCE), 18(3), pp. 472 – 476.

Walker, P. J., (2004). Strength and erosion characteristics of earth blocks, and earth block masonry. Jl. Materials in Civil Eng., 16(5), pp. 497 – 506.

Walker, P., and Stace, T. (1997). Properties of some cement stabilized compressed earth blocks and mortars. Materials and Structures, 30, pp. 545 – 551.

S. N. Ullas and B. V. Venkatarama Reddy, Characteristics of soil-cement blocks from different construction sites, Proc. of International Symposium on Earthen Structures, Interline Publishers, 22-24 Aug. 2007, Bangalore, India, 141 – 146