

Martin Michette¹, Rüdiger Lorenz², Christof Ziegert³

¹School of Geography and the Environment, University of Oxford, UK,

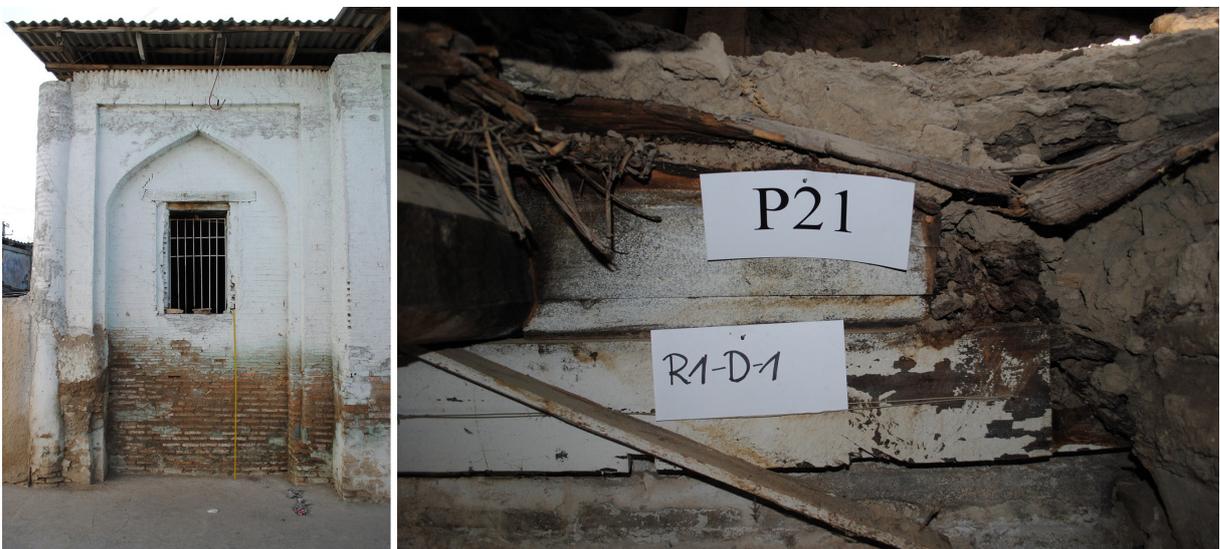
²Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachhochschule Potsdam, D, ³ZRS Ingenieure GmbH, Berlin, D

Wirkungsmechanismen und Einsatzmöglichkeiten von tonhaltigen Mauerwerksabdichtungen

Ton gehört zu den ältesten Abdichtungsstoffen der Baukunde. Es gibt weltweit verbreitete archäologische Nachweise darauf, dass bis zurück in das Neolithikum hydrologische Systeme mit Ton abgedichtet wurden (Mays et al. 2013; Warren 1998, p.175; Kirke 1980; O'Brien et al. 1980). Auch im Ingenieurbau der frühen Industriezeit fand die Tonpackung in den britischen Kanalbauten des 18. und 19. Jahrhundert großen Einsatz (Reeves et al. 2006, p.377). In halbtrockenen Klimazonen werden Bauwerke traditionell gegen Niederschläge geschützt, indem Flachdächer mit verdichtetem Ton abgedichtet werden (Warren 1998). Archäologische Nachweise solcher Konstruktionen reichen mindestens bis in das frühbyzantinische Reich des 4. Jahrhunderts zurück, wo Träger aus geflochtenen Schilf mit einem wasserdichten Lehm verstrichen wurden (Isler 2013). In der Literatur bekannte Abdichtungstoffe und -verfahren sind *Huwwar*, ein kalkhaltiger Lehmmörtel aus der südli-

chen Levante (Parker and Betlyon 2006, S. 173; Rollefson 1996, S. 223; Wright 1970), sowie *Arga* und *Markalak*, ton- und kalkhaltige Gesteine und Böden aus Tibet (Feiglstorfer 2020; Weisskopf 2011; Alexander 2005). Lehmflachdächer sind im Orient bis heute verbreitet. Sie bestehen aus relativ fetten Strohlehm-packungen, die zur Pflege mit walzenartigen Steinen immer wieder nachverdichtet werden, um Risse zu schließen (Abb. 1). Die *Dornschen Lehmäcker* aus der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts stellen einen eher gescheiterten Versuch dar, Ton als Abdichtung für die deutschen Flachdächer der frühen Industrialisierung zu verwenden. Lehm wurde mit Teer, Pech und Sand vermischt um eine wasserundurchlässige Schicht herzustellen, welche jedoch nur selten dauerhaft wirksam blieb (Conradi 1842, S. 12). Diese Methode verschwand sobald sich Bitumen- und Asphaltgusstechniken verbreiteten. Anders als die Dachabdichtung hat die Mauerwerksabdichtung eine

01 Lehmflachdach in der Kozi Abdurasal Moschee in Samarkand, Usbekistan (gebaut 19 Jh.). Die ca. 10 cm dicke Lehm-schicht wurde auf einer Strohmatte mit darunterliegender Holzverschalung aufgebracht und ist jetzt unter einem modernen Wellblechdach komplett ausgetrocknet. Seit Einführung moderner Baustoffe in die historische Bausubstanz wird die Pflege traditioneller Lehmflachdächer vernachlässigt. Fotos aus 2013.





02 Nachträgliche Mauerwerksabdichtungmaßnahme an der Heilige-Geist-Kirche, Teupitz (gebaut 13/14 Jh.). Eine Vertikalsperrschicht wurde 2008 mit einem lokalen Grubenlehm ausgeführt (linkes Foto, von T. Wondoll). Die Abdichtung wurde 2014 auf Dichte überprüft und als funktionsfähig beurteilt (Michette 2015) (rechtes Foto).

relativ junge Geschichte (Maier 2012). Früher wurde Kellerfeuchte oft geduldet und die Raumnutzung entsprechend angepasst. Dennoch gibt es vereinzelte Nachweise auf tonhaltige Mauerwerksabdichtungen in historischen Bauwerken. In der Jingshan Region Chinas wurde kalkhaltiger Boden mit Nussöl zugemischt um Dichtmassen für Feuchtesperren herzustellen (Dai 2013). Verdichtete Tonschichten als Versuch einer Sperrschicht wurden an wenigen sächsischen Lehmbauten aus dem 18. und 19. Jahrhundert, aber auch bis zurück in das 6. bis 8. Jahrhundert, nachgewiesen (Ziegert 2003). Spätestens ab Anfang des 20. Jahrhundert, als industriell gefertigte Bitumenprodukte und WU-Beton bevorzugt wurden, verlor die Tonpackung an Bedeutsamkeit. Im Ingenieurbau, v.a. im Wasserbau und im Deponiebau, stellen Tonabdichtungen gängige Abdichtungssysteme gegen drückendes Wasser oder Deponiesickerstoffe dar. Bei Letzterem stellt das über Kationenaustausch und Anlagerung funktionierende Bindevermögen der Tonminerale von Schadstoffen, eine zusätzliche Sicherheit gegen den Austritt von Schadstoffen dar.

Steigende Ansprüche im Umweltschutz und in der Denkmalpflege haben in den letzten 10 bis 20 Jahren zu einer Wiederentdeckung der tonhaltigen Mauerwerksabdichtung geführt. Dieses wachsende Interesse hängt mit dem Aufkommen von Bentonitplatten in den letzten 50 Jahren sowie von tonhaltigen Dichtmischungen in den letzten 20 Jahren zusammen. Diese Technologien ermöglichen industrielle Herstellungsprozesse für tonhaltige Abdichtungsstoffe und bringen sie auf einen breiteren Markt. Im Weiteren gab es vereinzelnde Abdichtungsmaßnahmen mit geeig-

netem Grubenlehm, z.B. als nachträgliche Vertikalsperrschicht an der Heilige-Geist Kirche in Teupitz, Brandenburg (Abb. 2). Vor allem diese letzte Variante bietet Lösungen, welche im Gegensatz zu den energiereichen Standardverfahren über ihren kompletten Lebenszyklus fast energieneutral sind. Dazu kommt der Vorteil für die Denkmalpflege, der darin besteht, dass nachträgliche Abdichtungen mit Ton keine chemische oder mechanische Befestigung benötigen und komplett reversibel sind.

Tonhaltige Abdichtungen stellen keine geregelte Bauweise dar. Sie sind weder Bestandteil in den einschlägigen Normen der Bauwerksabdichtung noch gehören sie zu den in den Lehmregeln (Dachverband Lehm 2009) geregelten Lehmstoffen und -bauweisen. Auch in der Fachliteratur zum Lehm spielen die tonhaltigen Bauwerksabdichtungen bisher keine Rolle (Röhlen und Ziegert 2020). In der Gewerkezuordnung sind Bauwerksabdichtungen dem Hochbau und nicht dem Tiefbau zugeordnet. Mit Ausnahme von Bentonitplatten sind sie für Anwendungen im Baubereich wenig untersucht worden und kaum in der Literatur präsent. Eignungsprüfungen verschiedener Dichtmischungen und natürlich vorkommender Tone sind aufgrund der starken Verbreitung als Altlastenbarriere vielseitig vorhanden. Diese beweisen die allgemeine Undurchlässigkeit des Baustoffes (Gartung et al. 1993). Ansinnen dieses Tagungsbeitrags ist eine Übersicht der Zusammensetzung und der Anwendung tonhaltiger Mauerwerksabdichtungen zu erstellen. Die Wirkungsmechanismen tonhaltiger Dichtmassen werden hinsichtlich ihrer Abdichtungsaufgaben am Gebäudesockel an-

hand von Versuchsreihen, die in Michette (2015) und Michette et al. (2017) ausführlich beschrieben werden, näher betrachtet.

Bentonitplatten

Bentonitplatten oder -matten sind ein Verbundprodukt aus reinem, stark quellfähigen Bentonitmehl und Hüllen aus Wellpappen bzw. Geotextilien. Diese müssen nur wenige cm stark sein. Derzeit sind Bentonitplatten die einzigen tonhaltigen Abdichtungsprodukte, welche ausführlich in der Fachliteratur dargestellt und untersucht werden (Cziesielski 2001). Sie erhielten Anfang der 80er Jahre eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt (Nr. Z 27.2-101), welche zwischenzeitlich abgelaufen ist und nicht verlängert wurde. Bentonitplatten stellen deshalb keine geregelte Bauweise dar und ihre Anwendung setzt die konkrete Zustimmung des Bauherren voraus. Mittlerweile liegen jedoch langjährige baupraktische Erfahrungen vor (Egloffstein 2009). Die Platten oder Matten werden auf der wasserbelasteten Seite trocken eingebaut und mit Erdreich angepresst. Die abzudichtenden Flächen müssen frei von Graten und Hohlstellen sein, und die Abdichtung ist vor scharfkantigem Verfüllmaterial z.B. durch ein Schutzvlies zu schützen. Der Abdichtung sollten keine Scherkräfte zugewiesen werden. Bei Wasseraufnahme delaminieren die Tonminerale und das Ton-Wasser System wird peptisiert und strömungsdicht. In Kombination mit PVC-Folien kann zusätzlich ein hoher Diffusionswiderstand erreicht werden. Natriumbentonitmatten erreichen im Einbauzustand Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = \text{ca. } 3 \times 10^{-11}$ bis 5×10^{-11} m/s. Nach Einbau findet innerhalb mehrerer Monate bis hin zu wenigen Jahren ein Ionenaustausch Natrium gegen Calcium statt und ein Langzeitdurchlässigkeitsbeiwert von $k_f = \text{ca. } 1 \times 10^{-10}$ bis 5×10^{-10} m/s wird erreicht (Egloffstein 2009). Bei stark salzhaltigem Wasser ist die Bentonitverträglichkeit zu beurteilen. Falls ein Einsatz von Bentonit möglich ist, sollte die Erstquellung mit elektrolytarmen Wasser erfolgen. Um eine kontinuierliche Feuchtigkeit und somit einen andauernden Quelldruck und keine Rissbildung zu garantieren, sind Bentonitplatten ausschließlich im Bereich von drückendem Wasser einzusetzen.

Tonhaltige Dichtmassen

Tonhaltige Dichtmassen sind Tone oder tonige Böden, welche am abzudichtenden Bauteil verdichtet werden. Sie funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie eine Tonbarriere in der Deponie-, Altlasten- und

Teichabdichtung und sind an vereinzelt Bauwerken historisch nachzuweisen. Tonhaltige Dichtmassen können weiter aufgeteilt werden:

- *Abdichtungstone* sind natürlich vorkommende Böden mit einer bestimmten Zusammensetzung, welche sich ohne oder mit wenig weitere Aufarbeitung gut für Abdichtungsaufgaben eignen.
- *Tonhaltige Dichtmischungen* sind vorgefertigte Mischungen aus verschiedenen Bodenbestandteilen, welche für Abdichtungsaufgaben optimiert werden. Schon länger als Deponie- und Altlastenabdichtungen bekannt, wurden tonhaltige Dichtmischungen in den letzten 15 bis 20 Jahren selten in der Bauindustrie eingesetzt und gewinnen nun langsam an wachsender Interesse (von Preuschen 2009).

Beide Verfahren sind weiterhin in der herkömmlichen Bauwerksliteratur kaum dargestellt. Beide Verfahren werden auch als Tonpackungen, Lehm packungen, mineralische Abdichtungen und Braune Wannen bezeichnet. Beide Verfahren stellen keine geregelte Bauweise dar und ihre Anwendung setzt die konkrete Zustimmung des Bauherren voraus.

Zusammensetzung und Wirkung

In Michette et al. (2017) werden drei im Handel erhältliche tonhaltige Dichtmassen untersucht: zwei Fertigmischungen und ein Sächsischer Geschiebemergel (Abb. 3). Die Versuchsreihen dienen nicht der qualitativen Prüfung oder Einordnung der untersuchten Produkte. Durchlässigkeitsbeiwerte und verschiedene Prüfungen der Dauerhaftigkeit wurden bereits in anderen Untersuchungen bestimmt. Alle drei Produkte können angesichts wiederholter Baumaßnahmen und langjähriger Erfahrungen unter den richtigen Umständen als Mauerwerksabdichtung eingesetzt werden. Die hier durchgeführten Laborversuche sollten die Zusammensetzung und Wirkung verschiedener Dichtmassen darstellen um Unterschiede insbesondere zwischen Dichtmischung und Abdichtungston zu erläutern. Dies soll Rückschlüsse auf die Bandbreite der allgemeinen Einsatzmöglichkeiten tonhaltiger Dichtmassen liefern.

Genormte Prüfmethode aus der Bodenkunde werden angewendet, um die Zusammenstellung und abdichtende Wirkung der Dichtmassen zu untersuchen. Die Versuchsauswahl und -aufbauten werden dabei an bestehende Eignungsprüfungen in der Deponieabdichtung festgelegt. Dies soll Vergleiche und



03 Die untersuchten tonhaltigen Mauerwerksabdichtungen. Links: Fertigmischung A. Mitte: Fertigmischung B. Rechts: Sächsischer Geschiebemergel. Aus Michette et al. (2017).

mögliche Synergien zum bereits umfangreichen Deponieingenieurbau vereinfachen. Durchgeführt werden die Klassifizierung des Bodentyps (DIN 18196), sowie die Bestimmung der Korngrößenverteilung (DIN 18123), der Proctordichte und optimale Wassergehalt (DIN 18127) und der Konsistenzgrenzen (DIN 18122). Die Korngrößenverteilung erlaubt auch eine mathematische Annäherung der Durchlässigkeitsbeiwerte (Beyer 1964). Diese Berechnungen basieren auf Kornpackungen und berücksichtigen keine Quell- oder Sorptionseigenschaften. Der Kalkgehalt wird in Anlehnung an die DIN 18129 nach Minke (2012) bestimmt. Die Wasseraufnahme wird nach DIN 18132 mit einer Neff-Enslin Apparatur bestimmt. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Art der Tonminerale. Die Quellhebung wird nach Madsen und Mueller-Vonmoos (1989) bestimmt. Eine Betrachtung der Quellhebung ermöglicht in Kombination mit Kenntnissen über den Zustand und die Zusammensetzung der Dichtmassen Einblicke in die inneren Wirkungsmechanismen der Dichtmasse, z.B. ob eine kristalline oder osmotische Quellung stattfindet. Eine Übersicht der Versuchsergebnisse ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Die abdichtende Wirkung der untersuchten tonhaltigen Dichtmassen ist die Folge mehrerer, teilweise kombinierter Mechanismen. Hierbei sind deutliche Unterschiede zwischen dem natürlichen Abdichtungston und die hergestellten Dichtmischungen festzustellen. Die hergestellten Dichtmischungen sind in ihrer mineralischen Zusammensetzung ähnlich. Sie bestehen zu ca. 90% aus Sand oder Kies, ca. 10% aus Ton und nur sehr wenig Schluff. Beide Körnungslinien folgen grob der Fullerparabel für die optimale Verdichtbarkeit. Beide Fertigmischungen haben ein hohes bis sehr hohes Wasseraufnahmevermögen, welches auf stark-quellfähige Natriumsmektite in der Tonfraktion deutet. Die Zusammensetzung vom Abdichtungston ist deutlich von der Zusammensetzung der Fertigmischungen zu unterscheiden. Die Korngrößenverteilung zeigt einen viel höheren Feinkornanteil. Der Feinkornanteil besteht zum Großteil aus Schluff. Dennoch ist im Abdichtungston insgesamt ein höherer Tonanteil als in den Fertigmischungen nachzuweisen. Der Wasseraufnahmevermögen ist jedoch deutlich geringer und deutet auf leichtplastische Tone. Ferner ist ein wesentlicher Kalkanteil vorhanden.

Table 1: Übersicht der Versuchsergebnisse.

	Fertigmischung A	Fertigmischung B	Abdichtungston
Tonfraktion (M%)	9	7	14
Sand- und Kiesfraktion (M%)	88	91	54
Berechneter Durchlässigkeitsbeiwert k_{fk} (m/s)	1×10^{-5}	1×10^{-4}	$8,5 \times 10^{-9}$
Gemessener Durchlässigkeitsbeiwert k_r (m/s)*	$8,5 \times 10^{-11}$	5×10^{-10}	$8,5 \times 10^{-11}$
Proctordichte ρ_{PR} (g/cm³)	2,09	1,76	2,00
Optimaler Wassergehalt w_{PR} (%)	8,6	17,2**	9,0
Optimaler Wassergehalt (% auf $d < 0.04$ mm)	24	47	11
Wassergehalt 97% trocken $w_{PR0.097}$ (% auf $d < 0.04$ mm)	20	27	–
Schrumpfgrenze w_s (% auf $d < 0.04$ mm)	25	37	15
Wasseraufnahmevermögen w_A (% auf $d < 0.04$ mm)	≥ 145	≥ 218	44
Quellhebung (%)	5,9	0,8	1
Dauer bis maximale Quellhebung (h)	360	168	48

*Durchlässigkeitsbeiwert aus Produktinformationsblätter entnommen.

**Wassergehalt im Lieferzustand liegt bei 7% und erlaubt eine Proctordichte von 97% trocken.

Durch einer günstigen Kornverteilung können Dichtmassen im verdichteten Zustand bereits ohne Betrachtung der weiteren Mechanismen eine hohe Dichte und Wasserfestigkeit erreichen. Eine optimale Mischung hat die Sandkörner so verteilt, dass sich eine möglichst dichte Packung ergibt. Die Feinkornfraktion soll die Zwischenräume gerade ausfüllen. Die Dichtmasse muss mit dem richtigen Wassergehalt verdichtet werden, um die maximale Dichte (Proctordichte) zu erreichen. Der Tonanteil der Dichtmasse hat das Vermögen Wasser an sich zu lagern. Bei Feuchteintritt stellt das ein Retardationsfaktor da, der den Wassertransport durch die Schicht bremst. In Austrocknungsphasen stellt das ein Rückhaltevermögen da. Ist der Tonanteil zu hoch, besteht die Gefahr, dass sich in Austrocknungsphasen irreversible Risse im Mineralgerüst bilden. Das Adsorptionsvermögen der Tonminerale hat darüber hinaus die Fähigkeit durch Quellmechanismen den Porenraum der Dichtmasse weiter zu schließen. In natürlichen Tönen ist dieser Effekt evtl. eher gering. Die Einbaufeuchtigkeit der Dichtmasse hat bereits mehrere kristalline Quellstufen der gemischten Tonminerale aktiviert. Der kalkulierte Durchlässigkeitsbeiwert und der gemessene Durchlässigkeitsbeiwert unterscheiden sich nur um wenige Größenordnungen (Tabelle 1). Bei hergestellten Dichtmischungen kann es durch kontrollierter Zugabe von Natriumsmeckite der wesentliche Faktor der Abdichtung sein. Grund dafür ist die viel größere und lang andauernde osmotische Quellung die in verdichteten Schichten stattfindet (Madsen und Mu-

eller-Vonmoos 1989). Die abdichtende Wirkung beruht auf die Peptisierung des Ton-Wasser-Systems im Porengefüge der Masse, infolge der osmotischen Quellung nachdem das sonst sandige Material verdichtet wurde.

Bemerkenswert ist der große Unterschied zwischen der Quellhebung der beiden Fertigmischungen. Trotz ähnlicher Zusammensetzung und ähnliche Charakteristika der Tonminerale ist bei Mischung A eine erhebliche Hebung von 5,9%, bei Mischung B lediglich 0,75% gemessen worden. Eine mögliche Begründung hierfür schließt sich aus der geringeren Proctordichte, bzw. dem höheren Porenanteil der Mischung B. Möglich ist, dass der Tonanteil darauf abgestimmt ist, bei Aktivierung nur die verbliebenen Makroporen zu schließen und keinen weiteren Druck auf das restliche Mineralgerüst auszuüben. Eine absolute Unterdrückung der Quellung ist jedoch nicht unbedingt nötig, um die Dichtwirkung zu gewähren (Yong 1999). Besteht ein gewisser Gegendruck, so findet bereits ein Ausfüllen vom Porengefüge ohne Setzungen im Mineralgerüst statt. Wichtig ist, dass angrenzende Bauteile die entstehenden Kräfte aufnehmen können. Ferner soll die volumetrische Vergrößerung verhindert werden, welche eine kritische Auflockerung des Mineralgerüsts verursachen könnte. Der Tonanteil muss jedoch im Einbauzustand eine Konsistenz haben, der innerhalb den Feuchtigkeitsschwankungen der Dichtmasse nicht gewisse Zustände verursacht die zur Rissbildung führen. Fertigmischungen kön-

nen durch minimaler Zugabe sehr aktive Tonminerale darauf abgestimmt werden. Der Einbauwassergehalt soll jedoch nicht zu weit auf dem nassen Ast der Proctorkurve liegen. Besonders für Fertigmischung B liegt der optimale Wassergehalt zum Erreichen der Proctordichte oberhalb der Schrumpfgrenze. Der Wassergehalt im Lieferzustand des Produktes ist jedoch deutlich niedriger und erlaubt einen Einbau zu 97% der Proctordichte. Somit zeigen die untersuchten Dichtmassen im optimalen Einbauzustand eine hohe Volumenkonstanz: Die Zustandsform liegt dabei unter der Schrumpfgrenze und es besteht kein Risiko der Schrumpfrissbildung.

Die abdichtende Wirkung des untersuchten Abdichtungstons beruht weniger auf der Aktivierung der Tonminerale und mehr auf der hohen Dichte und Wasserfestigkeit der verdichteten Masse und der möglichen Porenzementbildung. Kalk verursacht Verfestigungsprozesse, welche eine Schwindrissgefahr mindern und Porenzement bilden (Minke 2012). Geschiebemergel könnten sich im Allgemeinen aufgrund des hohen Kalkgehalts und einer abgestuften Korngrößenverteilung abgerundeter Körner daher gut als Abdichtungstone eignen. Anzumerken ist auch, dass historische und traditionelle tonhaltige Mauerwerksabdichtungen üblicherweise einen hohen Kalk- oder Kalzitanteil haben. Diese wurden entweder wie beim Jordanischen *Huwwar* dazugemischt (Rollefson 1996, S. 223), oder sind wie beim Tibetischen *Markalak* natürlich vorhanden (Feiglstorfer 2020).

Einbau

Tonhaltige Dichtmischungen können als vorgefertigte Mischung eingebaut, oder durch mineralischer Zugabe mit lokalem Lehm vor Ort hergestellt werden. Bei dem vor-Ort Verfahren ist auf die Homogenität zu achten. Gleiches gilt für unaufbereitet gelieferte Abdichtungstone. Bei allen Verfahren und Stoffen ist der Einbauwassergehalt zu überprüfen. Die Dichtmasse muss bodenfeucht sein. Als Faustregel kann sie sich zu einem festen Ball formen lassen.

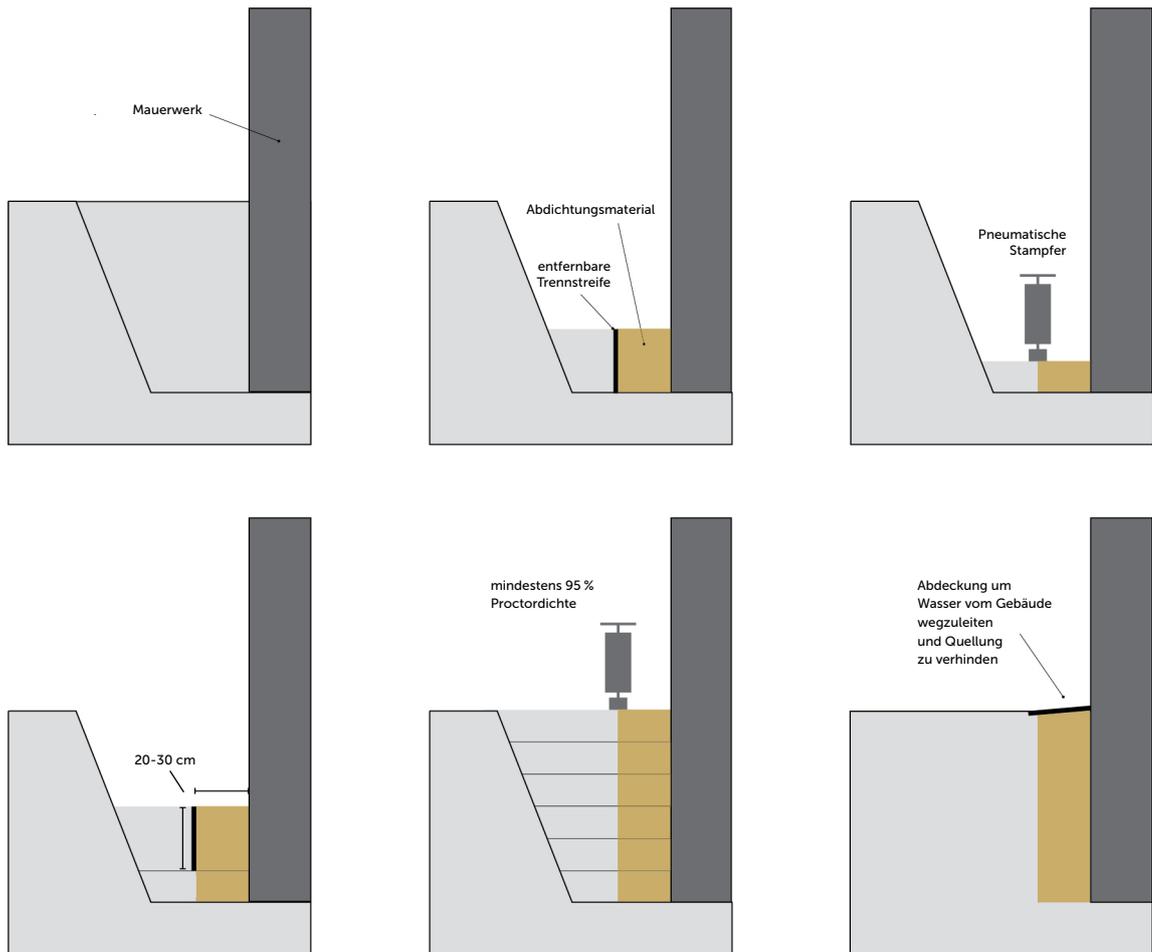
Der Einbau wird in Abbildung 4 graphisch dargestellt. Wie bei üblichen Abdichtungsarbeiten wird ein Arbeitsraum ausgegraben. Der Untergrund des Arbeitsraumes wird verdichtet. Ein fester Trennstreifen wird in einem gleichmäßigen Abstand von 20 bis 30 cm zum Mauerwerk aufgestellt (je nach erforderlicher Abdichtungsschichtstärke). Das Abdichtungsmaterial wird lagenweise (ca. 20 cm) in diesen Raum zwi-

schen Mauerwerk und Trennstreifen gefüllt. Der restliche Arbeitsraum wird mit Aushubmaterial aufgefüllt. Einige Hersteller fordern bei drückenden Wasserschichten zwischen Abdichtung und Erdreich eine Schutzschicht aus Kies mit einer unten angeordneten Drainage. Ein Kiesfilter bietet zusätzlich einen Schutz gegen das Eindringen von Frost und Wurzeleinwuchs (Ludwig 1993). Nach jeder Lage wird der Trennstreifen herausgezogen und die gesamte Füllfläche mit einem Benzin-, Elektro- oder Handstampfer verdichtet, bis die im Erdreich befindlichen Bauteile komplett von der Tonabdichtung geschützt sind. Hierbei ist darauf zu achten, dass das Abdichtungsmaterial auf mindestens 95% bis 97% Proctordichte verdichtet wird. Zur Kontrolle sind während der Bauzeit mehrere Kernbohrungen aus der Abdichtungsschicht zu entnehmen und auf Dichte und ggf. direkt auf Wasserundurchlässigkeit zu überprüfen. Die Entnahmestellen müssen vorsichtig nachverdichtet werden. Alternativ kann auch mit Rückpralltechnologien auf Dichte überprüft werden (Hemker 1994). Vertikalsperren werden abschließend nach oben mit einem Oberflächenschutz abgedeckt. Hierfür eignen sich zum Beispiel Betonsteinpflaster, Kies und nährstoffarmer Boden. Die Abdeckung muss Wasser vom Gebäude weggleiten können und je nach Hersteller eine gewisse Auflast (ca. 5 kN/m²) auf die Abdichtung bringen um eine freie Quellung zu verhindern. Angrenzende Bauteile müssen auch diese Last aufnehmen können.

Bei Dichtmassen kann es zu einem Austritt der Einbaufeuchtigkeit kommen. Das kann entgegenge-wirkt werden, indem zu schützenden Bauteile (z.B. Dämmschichten) mit einer Dichtschlämme verputzt werden. Bezüglich den unterschiedlichen Lastfällen sollte soweit vorhanden auf Herstellerangaben geachtet werden. Bentonithaltige Dichtmischungen sind in der Regel gegen alle Lastfälle wirksam. Abdichtungstone müssen evtl. von ständig drückenden Schichten geschützt werden.

Aussicht

Die Aufnahme tonhaltiger Bauwerksabdichtungen in die Lehm-bau-Fachliteratur und die Regelwerke des Lehmbaus sollte überdacht werden. Tonhaltige Abdichtungen bieten bezüglich den steigenden Ansprüchen auf Ökobilanzierung in der Bauindustrie eine spannende Alternative zu den energieintensiven Standardverfahren. Neben der Herstellung aus natürlichen Stoffen ist hierbei auch die unbedenkliche Vermischung mit dem Erdreich zum Ende der Lebens-



04 Einbau tonhaltiger Mauerwerksabdichtungen. Aus Michette et al. (2017).

zeit hervorzuheben. Gleichzeitig sollte jedoch auf die weltweit vereinzelte und begrenzte Bentonitvorkommen hingewiesen werden (Reeves et al. 2006). Die Anwendung von Bentonitplatten und bentonithaltigen Fertigmischungen kann somit mit hohen Transportkosten verbunden sein. Eine Untersuchung der allgemeinen Eignung unterschiedlicher Geschiebemergel könnte für viele Bauprojekte in und um Endmoränenlandschaften ein lokal vorkommendes Abdichtungston aufdecken. Eine vertiefende Untersuchung in mögliche Aufarbeitungsmethoden natürlich vorkommender Lehme könnte die Möglichkeiten noch weiter verbreiten.

Eine langjährige Studie in Pompeji dient dieser Aussicht (Michette et al. 2018). Eine Vielfalt an verschiedenen Boden und Mischungen aus der Campania Region wurde anhand der hier beschriebenen Versuchsreihe auf ihrer Eignung für Abdichtungsmaßnahmen geprüft (Breuninger 2018). Eine Mischung aus einem sandigen, Vesuvischen Boden und einem kalkhaltigen Ton des Salerner Beckens erwies sich als vielversprechend. Die Verträglichkeit hinsichtlich der

Maßnahme zur archäologischen Bausubstanz wird in einer transdisziplinären Arbeitsgruppe weitergehend ermittelt. Geplant ist ein Testeinbau im Rahmen eines Workshops an einem Grabmal in der Porta Nocera Nekropole.

Referenzen

- Alexander, A. (2005). *The Temples of Lhasa*. Serindia, Chicago 2005
- Beyer, W. (1964). Zur bestimmung der wasserdurchlässigkeit von kiesen und sanden aus der kornverteilungskurve. *WWT*, 14(6), 165-168.
- Breuninger, T. (2018). *Eine Eignungsprüfung lokaler Geomaterialien und Böden zum Schutz gegen aufsteigende Feuchtigkeit in den Ausgrabungen von Pompeji*. Lst. f. Ingenieurgeologie, Technische Universität München, München.
- Conradi, F. E. (1842). *Theoretisch-praktisches Handbuch der Land- und Wasser-Baukunst für Baumeister, Zimmerer und Maurer sowie für Bau- und Gewerbschulen*. Goedsche. <http://digital.slub-dresden.de/id337266921>
- Cziesielski, E. (2001). *Lufsky Bauwerksabdichtung*. Vieweg+Teubner Verlag.
- Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): *Lehmbau Regeln*. 3. Auflage. Vieweg Teubner. Wiesbaden 2009
- Dai, S. B. (2013). Building limes for cultural heritage conservation in China. *Heritage Science*, 1(1), 25.
- Egloffstein, P., & Egloffstein, T. (2009). Einsatz und grenzen von tonabdichtungen an gebauden. *Feuchteschutz am Baudenkmal IFS-Tagung*, 23-36.
- Feiglstorfer, H. (2020). *Mineral Building Traditions in the Himalayas: The Mineralogical Impact on the Use of Clay as Building Material*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110591330>
- Gartung, E. (Ed.). (1993). *Tonmineralogie für die geotechnische Praxis*. Landesgewerbeanst. Bayern.
- Hemker, O. (1994). *Zerstörungsfreie Meßverfahren zur Qualitätsprüfung mineralischer Dichtungen*. Inst. für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig
- Isler, B. (2013). *Early Byzantine Settlements and Rural House Architecture in Central Lycia*. ADALYA, 16, 285-304.
- Kirke, C. S. G. (1980). *Prehistoric agriculture in the Belize River valley*. *World Archaeology*, 11(3), 281-286.
- Ludwig, S. (1993). *Frostgefährdung toniger Deponiebarrieren: Gefrierverhalten, bodenmechanische Eigenschaften, Mikrogefüge*. Lehrstuhl f. Angewandte Geologie d. Univ. Karlsruhe.
- Maier, J. (2012). *Handbuch Historisches Mauerwerk: Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren*. Springer-Verlag.
- Mays, L., Antoniou, G. P., & Angelakis, A. N. (2013). *History of water cisterns: legacies and lessons*. *Water*, 5(4), 1916-1940.
- Michette, M. (2015). *Wirkungsmechanismen und Einsatzmöglichkeiten von tonhaltigen Mauerwerksabdichtungen*. Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachhochschule Potsdam.
- Michette, M., Bichlmair, S., & Kilian, R. (2018). *Diagnosing Decay Mechanisms at the Porta Nocera Necropolis, Pompeii: The First Step Towards Effective Preventive Conservation*. *Studies in Conservation*, 63(sup1), 195-202.
- Michette, M., Lorenz, R., & Ziegert, C. (2017). Clay barriers for protecting historic buildings from ground moisture intrusion. *Heritage Science*, 5(1), 31.
- Minke, G. (2012). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. Walter de Gruyter.
- O'Brien, M. J., Lewarch, D. E., Mason, R. D., & Neely, J. A. (1980). Functional analysis of water control features at Monte Alban, Oaxaca, Mexico. *World Archaeology*, 11(3), 342-355.
- Parker, S. T., & Betlyon, J. W. (2006). *The Roman frontier in central Jordan: final report on the Limes Arabicus Project, 1980-1989* (Vol. 40). *Dumbarton Oaks*.
- Reeves, G. M., Sims, I., & Cripps, J. C. (Eds.). (2006). *Clay materials used in construction*. Geological Society of London.
- Röhlen, U., Ziegert C.: *Lehmbau-Praxis. Planung und Ausführung*. Beuth-Verlag. Berlin 2020
- Rollefson, G. O. (1996). The Neolithic devolution: ecological impact and cultural compensation at 'Ain Ghazal, Jordan. In: Segger, J. *Retrieving the Past: Essays on Archaeological Research and Methodology in Honor of Gus. W. Van Beek*, 219-229.
- von Preuschen, M.F. (2009). *Der Umgang mit der Gebäudeabdichtung aus denkmalpflegerischer Sicht. Feuchteschutz am Baudenkmal IFS-Tagung*, 1-10.
- Warren, J. (1998). *Conservation of Earth Structures*. Butterworth-Heinemann
- Weisskopf, M. (2011). *Survey Report of the Ancient Monastery of Dangkar*. Graz University of Technology
- Wright, G. R. H. (1970). *The "Granary" at Shechem and the Underlying Storage Pits*. *Zeitschrift für die Alttestamentliche Wissenschaft*, 82(2), 275.
- Yong, R. N. (1999). *Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance*. *Engineering Geology*, 54(1-2), 83-91.
- Ziegert, C. (2003). *Lehmwellerbau: Konstruktion, Schäden und Sanierung*. Fraunhofer-IRB-Verlag.