

1 Lehmbau heute

1.1 Stand der Anwendung von Lehmbaustoffen

Lehm ist ein seit Jahrtausenden bewährter, weltweit verbreiteter und vor allem moderner Baustoff. Für die heute vordringlichen Bauaufgaben in der Altbausanierung, dem energieeffizienten Neubau sowie das Bauen in der Entwicklungszusammenarbeit ist Lehm hervorragend geeignet.

Die allgemein hohe Akzeptanz, die das Bauen mit Lehm in Deutschland heute wieder besitzt, ist das Ergebnis einer kontinuierlichen und qualitativ hochwertigen handwerklichen, planerischen, publizistischen und normativen Arbeit in den letzten Jahrzehnten und nicht zuletzt der Baustoffeigenschaften selbst.

Mit der im Dezember 2018 veröffentlichten zweiten Normengeneration im Lehm-bau, die mit Lehmsteinen, Lehmmauermörtel, Lehmputzmörtel und Lehmplatten die wichtigsten Produktgruppen umfasst, sind Lehmbaustoffe endgültig wieder zum normalen Baustoff geworden. Für diese Bauprodukte sind die Anforderungen, Prüfverfahren und Kennzeichnungen nun wesentlich detaillierter definiert als in den bisherigen, alle Lehmbaustoffe und Lehmbauweisen umfassenden *Lehmbau Regeln* [DVL, 2009]. Wegweisend ist die Verankerung raumklimatischer und umweltrelevanter Faktoren in den Lehmbaustoff-Normen. Der Grad der Vorfertigung und das Qualitätsniveau von Lehmbaustoffen haben das konventioneller Produkte erreicht: Trockenmörtel als Sack- und Siloware, Bauplatten und Plansteine. Spezielle baustoffspezifische Produktformen wie erdfeuchte Fertigmischungen aus ungetrocknetem Grubenlehm, geliefert im „Big-Bag“, vereinen den Anspruch an zeitgemäße Lieferformen mit dem, umweltgerechte Baustoffe herzustellen und zu verarbeiten. Nach den *Lehmbau Regeln* ist es aber auch weiterhin zugelassen, mit Baustellenmischungen zu arbeiten – im Idealfall mit dem auf dem Grundstück gewonnenen und ob seiner Eignung geprüften Lehm der Baugrube.

Hat sich die Anwendung des Lehmbaus in Deutschland und auch anderen Industrienationen in den letzten Jahren insgesamt stark ausgeweitet, war zu beobachten, dass immer dünnere Schichtdicken zur Anwendung kamen; das Marktsegment der

Lehmputze und Dünnlagenbeschichtungen ist überproportional gewachsen. Diese Entwicklung war offensichtlich notwendig, um den Baustoff wieder „salonfähig“ zu machen. Von dieser Imageverbesserung haben dann auch andere Lehmbauweisen bis hin zum massiven und tragenden Lehmbau profitiert.

Anders als in den meisten Regionen weltweit werden in Deutschland fast ausschließlich *nichtstabilisierte* Lehmbaumstoffe hergestellt und verarbeitet. Mit sorgfältiger Auswahl von Baulehm und Zuschlägen lassen sich auch ohne zusätzliche Bindemittel hochwertige Baustoffe herstellen, die angemessenen Anwendungsgebieten – witterungsgeschützte Bereiche ohne erhöhte Festigkeitsanforderungen – genügen. In Deutschland besteht weniger der Wille oder die Notwendigkeit, Lehmbaumstoffe in nicht baustoffgerechten Anwendungsbereichen einzusetzen, als vielmehr der Wunsch nach reinen, unverfälschten Naturbaumstoffen.

1.2 Ausgewählte Gründe für die Anwendung von Lehmbaumstoffen

Die Renaissance des Lehmbaus in den 1980er-Jahren war vor allem auf die hervorragende Umweltverträglichkeit des Baustoffs und denkmalpflegerische Aspekte zurückzuführen. Befragt man heute den gewachsenen Kreis der mit Lehm agierenden Bauherren und Architekten nach den Gründen ihrer Wahl, werden mindestens ebenso häufig die gestalterische Attraktivität und die raumklimatischen Vorzüge benannt. Nur dadurch, dass Lehmbaumstoffe alle diese Qualitäten vereinen, mündete die vielleicht durch den Zeitgeist bedingte Wiederentdeckung von Lehmbaumstoffen in eine bereits 40 Jahre andauernde stetige Verbreitung ihrer Anwendung.

Umweltverträglichkeit

Die Gewinnung, Herstellung und Verarbeitung von Baustoffen ist oftmals mit schwerwiegenden Eingriffen in den Naturhaushalt, Emissionen und einem hohen Ressourcenverbrauch verbunden. Diese auf unsere natürlichen Lebensgrundlagen schädigend wirkenden Einflüsse zu reduzieren sollte das Ziel eines jeden verantwortungsvollen Planers sein. Die alten Naturbaumstoffe Holz, Lehm und Naturstein müssen, um im Bauwesen verwendet werden zu können, dem Naturkreislauf lediglich entnommen und be- bzw. verarbeitet werden. Im Gegensatz zu anderen Bindemitteln muss die Bindkraft des lehmeigenen Bindemittels Ton nicht durch einen Brennvorgang oder durch chemische Prozesse aktiviert werden. Aufgrund der Reversibilität der Tonbindung können Lehmbaumstoffe replastifiziert und in eine neue Form gebracht werden. Eine erneute Formgebung ist auch bei Baustoffen wie Glas und Stahl gegeben, jedoch hier unter erneutem Einsatz großer Energiemengen.

Diese wesentlichen Unterschiede zu den anderen Baustoffgruppen wirken sich in den gängigen Rastern nachhaltiger Baustoff- und Bauwerksbewertungssysteme signifikant aus. So beträgt das CO₂-Äquivalent von erdfeucht geliefertem Lehmputz lediglich ca. 5 % eines zementgebundenen Putzes. Der Dachverband Lehm e. V. ist seit 2018 Programmbetreiber für die Erstellung und Veröffentlichung von sogenannten Typ-III-Umweltproduktdeklarationen (UPD) für Lehmbaumaterialien. Hersteller von Lehmputzmörtel, Lehmmauermörtel, Lehmsteinen und Lehmplatten haben die Möglichkeit, anhand von Produktkategorieregeln (PKR) ihre UPD nach dem Programm und den Regeln des Dachverbandes Lehm e. V. zu zertifizieren.

Nutzerverträglichkeit

Ein wesentliches Ziel bei Um- und Neubau von Gebäuden sollte die Schaffung von behaglichen und der Gesundheit zuträglichen Wohn- und Arbeitsbereichen sein. Leider wird dieses Ziel vielfach verfehlt. Eine alleinige Betrachtung der nachweispflichtigen Bauwerkeigenschaften Standsicherheit, Brand-, Wärme- und Schallschutz greift offenbar zu kurz. Zunehmend sind hygienische und humantoxikologische Aspekte von Bedeutung.

Mit der Verringerung des Luftwechsels steigt die Bedeutung der raumhüllenden Bauteile für die Qualität der Raumluft. Von besonderer Tragweite ist in diesem Zusammenhang die Raumluftfeuchte. Um eine Schwankung der Raumluftfeuchte in einen ungünstigen Bereich zu vermeiden, sollten vor allem die oberflächennahen Wandbaustoffe in der Lage sein, die veränderlich wirkenden Einflüsse wie Duschen, Kochen, Heizen usw. durch zwischenzeitliche Wasserdampfspeicherung abzupuffern. So kann überschüssige Feuchte zeitversetzt über die Raum- an die Außenluft abgegeben werden. Umgekehrt wird bei zu trockenem Raumklima kurzzeitig anfallende Feuchte im Raum gehalten. Diese als Sorptionsvermögen bezeichnete Materialeigenschaft ersetzt nicht die Lüftung, sondern verbessert die hygrischen Bedingungen von Innenräumen vor allem bei geringem Luftwechsel. Das Wasserdampfsorptionsvermögen von Lehmbaumaterialien übertrifft das anderer Baustoffe um ein Vielfaches. Ihr Einsatz ist deshalb aus raumklimatischer Sicht besonders positiv.

Die extrem große innere Oberfläche der Tonminerale und damit der Lehmbaumaterialien stellt nicht nur für die Luftfeuchte einen wirkungsvollen Puffer dar, sondern führt im begrenzten, aber deutlich messbaren Umfang auch zur Bindung von Gerüchen und Luftschadstoffen (siehe Kapitel 3.3).

Untersuchungen belegen, dass Lehmbaumaterialien bei ausreichender Schichtstärke (≥ 24 cm) gepulste Hochfrequenzstrahlen (z. B. Mobilfunk) wesentlich besser dämpfen können als andere Baustoffe [Minke, 2009].

Ästhetische Aspekte

Herausragende Anwendungsbeispiele wie der Stampflehmbau der *Kapelle der Versöhnung* in Berlin oder die Lehmputzoberflächen des mit dem Deutschen Architekturpreis 2009 ausgezeichneten *Kolumba-Museums* in Köln sorgen für einen umfassenden Wahrnehmungswandel des Lehmbaus insgesamt. Die Dominanz von Vorurteilen wie „braun und brüchig“ weicht deutlich dem Erleben, dass Lehmoberflächen zeitgenössisch, hochwertig, ja edel sein können – etwas, was in Japan seit Jahrhunderten und ohne Bruch bis heute lebendig ist.

Andererseits geht gerade von der überlieferten und mit den o.g. Vorurteilen belegten weltweit vorhandenen traditionellen Verwendung von Lehmbaumaterialien eine überwältigende Kraft aus, was sich institutionell bewertet in dem großen Anteil an Lehmbauten in der UNESCO-Welterbeliste widerspiegelt.

Bautechnische Aspekte

Lehm ist kein „schneller, höher, weiter“-Baustoff. Das Bauen besteht aber bei Weitem nicht nur – und immer weniger – aus derart ausgerichteten Aufgaben. Vielmehr gewinnen bauphysikalische Eigenschaften an Bedeutung, um sowohl von der Anforderungsseite als auch aus Sicht des Bautenschutzes nachhaltige und fehlertolerante Bauteile und Bauwerke zu generieren. Als Beispiel hierfür sei das komplizierte Feld der Innendämmung von Bestandsbauten genannt, bei dem die speziellen Feuchtetransport- und Speichereigenschaften von Lehmbaumaterialien zu bautechnisch langfristig sicheren Lösungen führen.

Globale Aspekte

Gemessen an dem, was in den Entwicklungs- und Schwellenländern an Bauaufgaben zu bewältigen ist, erscheinen die hiesigen eher marginal. Eine wirkliche Verbesserung der dortigen Wohnsituation kann nachhaltig nur mit einer angemessenen Verbesserung und Weiterentwicklung der traditionellen Bauweisen – in vielen Fällen mit Lehm – erreicht werden. Gerade weil in diesen Regionen eine Ausrichtung an den Baustoffen und Bauweisen der Industrienationen erfolgt, ist die moderne Renaissance des Lehmbaus in Deutschland und Europa so erfreulich und wichtig. Sie bewirkt im Idealfall ein Wiedererstarken der lokalen Bautraditionen und damit der kulturellen Identität.

2 Rohstoff Baulehm

2.1 Einleitung

Baustoffe gezielt und zweckentsprechend herzustellen, zu verarbeiten und einzusetzen gelingt nur mit einem Grundverständnis für den Stoff selbst. Bei Lehmbaustoffen ist dieses Grundverständnis vor allem mit dem Verständnis des Bindemittels im Lehm – den Tonmineralen – verbunden.

Wie bei allen bildsamen Massen im Bauwesen bestehen auch Lehmbaustoffe aus Bindemittel und Zusatzstoffen (frühere Bezeichnung: Zuschlag). Die Eigenschaften des Bindemittels, die der Zusatzstoffe sowie das Mischungsverhältnis aus beiden bestimmen die Eigenschaft der bildsamen Masse.

Das natürliche Bindemittel Ton kommt in den Böden in einer großen Vielfalt und mit erheblichen Variationen an Eigenschaften vor. Tonminerale sind immer mit nichtbindigen sandigen bis steinigen Bestandteilen vermischt. Überwiegt nicht mehr der Tongehalt, wird dieses Gemisch als *Lehm* bezeichnet.



Abb. 2.1:
Am Schwinden
erkennbarer
bindiger Boden

Zur Herstellung von Lehmbaustoffen geeigneter Lehm nennt man *Baulehm*. Sind die bindenden Funktionen (Menge und Art der Tonminerale) im Lehm gut ausgeprägt, wird der Lehm als *fett* und im Fall des Gegenteils als *mager* bezeichnet. Der ideale Fall, bei dem die bindigen und nichtbindigen Bestandteile schon von Natur aus derart zusammengesetzt sind, dass ein Baulehm direkt als Lehmbaustoff für eine der Lehmbauweisen verwendet werden kann, kommt selten vor.

Im Lehmbau werden heute überwiegend Fertigprodukte eingesetzt. Dennoch wird man sowohl als Handwerker als auch als Planer von Bauherren recht häufig mit der Fragestellung konfrontiert, ob sich der auf dem Grundstück anstehende Boden zur Herstellung für die gewünschten Lehmbaustoffe eignet. Mit etwas Erfahrung lässt sich mit einfachen Feld- und Laborversuchen die Eignung beurteilen und eine Bandbreite für Rezepturen zur Herstellung des Lehmbaustoffs angeben. Aufwendigere Laboranalysen sind meist nur für Materialentwicklungen und -optimierungen im größeren Maßstab notwendig und angemessen.

2.2 Lehm – Entstehung und Arten

Die in der Erdkruste gebildeten Gesteinsarten wie Granit, Gneis oder Basalt sind an der Erdoberfläche chemischen, physikalischen und biologischen Verwitterungsprozessen ausgesetzt. Dabei wird sowohl das Gesteinsgefüge gestört als auch die Mineralstruktur verändert. Instabile Mineralphasen wie Feldspat und Glimmer werden in stabilere Mineralkomponenten zerlegt. Dabei entstehen als Zwischen- oder Endprodukte bin-

Abb. 2.2:
Durch Gesteins-
verwitterung ent-
stehender Lehm



dige und nichtbindige Minerale: Tonminerale sowie Oxide und Hydroxide von Eisen, Aluminium oder Magnesium und Quarz. Aus bodenmechanischer Sicht spricht man von Lehm, wenn diese Minerale in einer Erde in bestimmten Mengen, Arten und Korngrößen vermischt sind. Die Verwitterungsprozesse sind so alt wie die Gesteine selbst. Die Um- und Neubildung von Tonmineralen und Lehmen findet nicht nur tagtäglich an den Gesteinen, sondern auch in Böden und sogar an bewitterten Lehmoberflächen von Bauwerken statt.

Verschiedene natürliche Transportvorgänge, die an der Erdoberfläche ablaufen, können Lehme von den primären Lagerstätten vom Fuß eines Felsmassivs an andere Orte transportieren. Der *Berg- und Gehängelehm* wurde durch Wassertransport zum *Schwemm- oder Auelehm*, durch Gletschertransport zum *Geschiebelehm* und durch Windtransport zum *Lößlehm*. Diese Transportvorgänge sind vor allem mit Selektionsprozessen verbunden. Im *Berg- und Gehängelehm* ist eine große Bandbreite an frisch gebrochenen Körnungen vorhanden. Die Anteile an bindigen und nichtbindigen Feinstbestandteilen sind eher gering. Die Korngrößenverteilung von *Schwemm- oder Auelehm* richtet sich nach den meist wechselnden Fließgeschwindigkeiten der Gewässer. In den entsprechenden Lagerstätten finden wir diesen Lehm als Ablagerungsprodukt in lagenweise wechselnder Zusammensetzung, oft durchzogen von Sand und Kiesbändern. Die eiszeitlichen *Geschiebelehme* sind oft mehr oder weniger gleichmäßig vermengt mit gerundeten Gesteinen verschiedener Korngrößen. Die Korngrößenverteilung von den windverfrachteten *Lößlehm*en weist die geringste Spreizung auf. Diese Lehme haben oft einen sehr hohen auch als *Schluff* bezeichneten Feinkornanteil. Sie können durch ihre natürliche Homogenität leicht aufbereitet werden.



Abb. 2.3:
Geologische Schichtung verschiedenfarbiger abgelagerter Tone in einer Abbau-grube

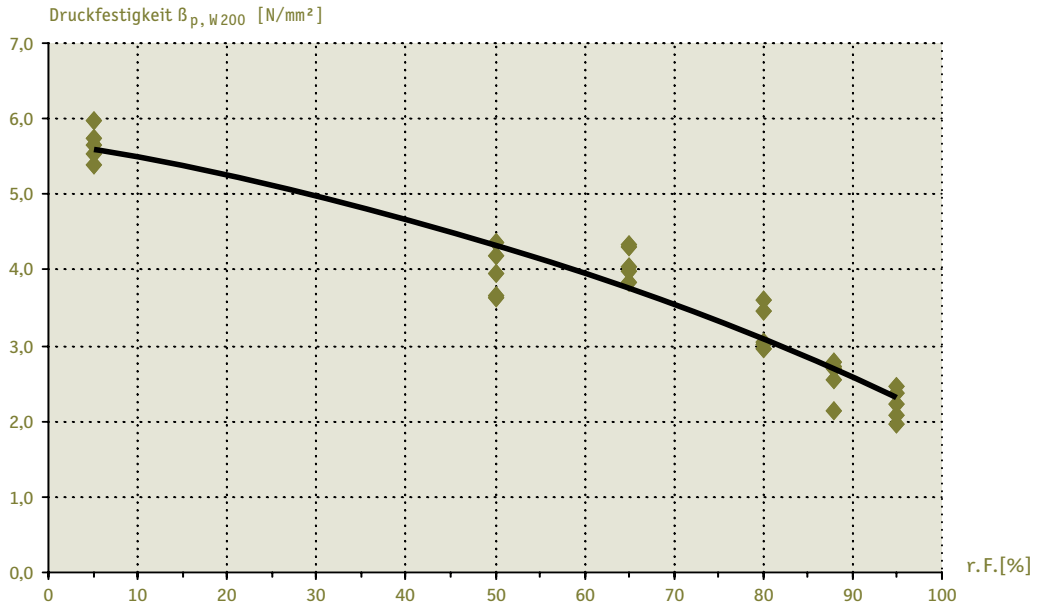


Abb. 2.4: Beziehung zwischen andauernder Luftfeuchte und der Druckfestigkeit einer Stampflehmischung [Dierks/Ziegert, 2002]

2.3 Bindemittel Tonminerale

2.3.1 Aufbau und Bindung

Tonminerale kommen in der Natur in einer großen Vielfalt vor. Die nachfolgenden Beschreibungen sind stark vereinfacht. Tonminerale sind schichtartig aufgebaute Silikate mit Größen von ca. 0,1 bis 4 Mikrometer (μm). Die Größe und jeweilige chemische Zusammensetzung resultiert aus der Art des Ausgangsgesteins und dem Verwitterungsgrad.

Je nach Art der Tonminerale sind jeweils zwei oder drei tetra- bzw. oktaederförmige Mineralschichten zu einem Schichtpaket verbunden. Die sog. Zwei- oder Dreischichttonminerale unterscheiden sich in ihrem Aufbau und den sich daraus ableitenden Eigenschaften für den Lehmbau wesentlich (Abschnitte 2.3.2 und 2.3.3).

Die Bindekräfte der Tonminerale beruhen auf lokalen Ladungsdifferenzen, die auf den Oberflächen der Schichtpakete auftreten. Im Gegensatz zu anderen Bindemitteln im Bauwesen, bei denen chemische Reaktionen zur Erhärtung führen, beruht die *Tonbindung* also im Wesentlichen auf physikalischen Bindungskräften.

Tonminerale enthalten kristallin in die Schichtpakete eingebundenes Wasser. Dieser Wassergehalt ist nicht von den klimatischen Umgebungsbedingungen abhängig und entweicht erst bei höheren Temperaturen. Das Austreiben von kristallin gebundenem Wasser ist nicht reversibel und verändert die ursprünglich vorhandene Mineralstruktur. Werden tongebundene Massen hohen Temperaturen ausgesetzt, spricht man



Abb. 2.5: Infolge eines Bauschadens replastifizierter und wiedererhärteter Lehm an der Außenwand einer historischen Massivlehmscheune (Blick nach oben zur Traufe)

vom *Brennen*. Beim Brennen werden die Ladungsdifferenzen der Tonmineraloberflächen aufgehoben und damit die sorptiven Eigenschaften gegenüber Wasserdampf und Luftschadstoffen wesentlich reduziert.

Wie bei allen porenhaltigen Baustoffen gibt es bei tongebundenen Baustoffen in Korrespondenz zur Umgebungsluftfeuchte Kondensationsvorgänge in der Porenstruktur. Diese reversible Einlagerung von Feuchte wird als Luftfeuchtesorption bezeichnet. Zusätzlich zu dem porenbedingten Sorptionsvermögen wirken die lokalen Ladungsdifferenzen an den inneren und äußeren Oberflächen der Tonminerale anziehend auf Wassermoleküle aus der Umgebung. Bei tongebundenen Baustoffen gibt es also einen zusätzlichen und mineralogisch begründeten Anteil an der Luftfeuchtesorption. Im Gegensatz zum kristallin gebundenen Wasser hat das absorptiv (schwach und reversibel) gebundene Wasser Einfluss auf die Bindekräfte der Tonminerale. Die Bindungskräfte werden verringert, je mehr Wassermoleküle zwischen und in die Tonmineralstruktur eindringen. Entweichen die Wassermoleküle wieder, verstärken sich die Bindungskräfte. Die Festigkeit eines darrgetrockneten Lehmabstoffs entspricht also der höchsten bei ungebrannten tongebundenen Materialien erreichbaren Festigkeit. Beispielhaft wurde an einem Stampflehm ermittelt, dass die Festigkeit bei normalem Innenraumklima (23 °C, 50 % r. F., Normklima nach DIN EN 13279-2) bereits um ca. 20 % gegenüber dem darrgetrockneten Zustand reduziert ist [Dierks/Ziegert, 2002]. Da der darrgetrocknete Zustand bautechnisch nicht relevant ist, wird die Bezugsfestigkeit von allen Lehmabstoffs bei eben diesem Normklima von 23 °C und 50 % r. F. bestimmt. Erhöht man die Luftfeuchte auf 95 %, reduziert sich die Festigkeit auf etwa die Hälfte des darrgetrockneten Zustands (Abbildung 2.4).

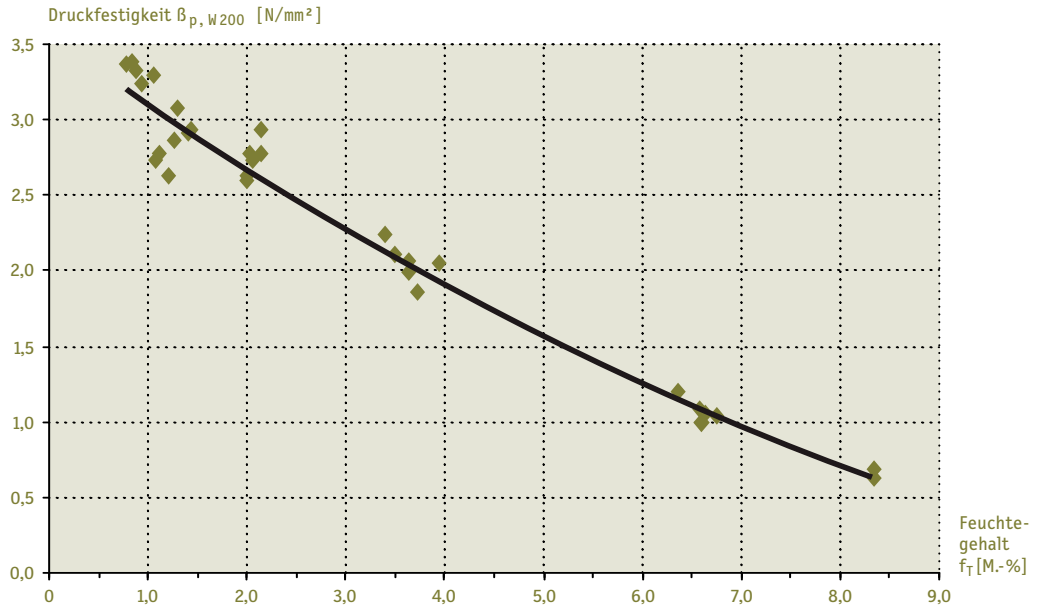


Abb. 2.6: Festigkeitsanstieg einer Stampflehmischung von der Einbaufeuchte (hier: 8,3 %) bis zur Gleichgewichtsfeuchte (hier: 0,8 %) unter Normklima nach DIN EN 13279-2 [Dierks/Ziegert, 2000]

Dennoch ist Ton oder Lehm bei hohen Luftfeuchten weit davon entfernt, in einen plastischen, d. h. formbaren Zustand überzugehen. Dieser Zustand wird erst bei Zutritt von Wasser und nicht von Luftfeuchte erreicht. Der starke Wasserzutritt bewirkt dann ein mehr oder weniger starkes Aufquellen und Dispergieren der Minerale. Die plastische Masse bleibt aber bindig und erhärtet bei Austrocknung erneut (Abbildung 2.5).

Die Beeinflussung der Bindung durch Wasser hat direkte Konsequenzen beim Umgang mit dem Baustoff sowie mit den aus dem Baustoff hergestellten Bauwerken, z. B. dem Verhalten bei Bewitterung, der Schädigungen durch aufsteigende Feuchte oder der Beurteilung von Bauzuständen. So bestimmt bspw. bei mehrgeschossigen tragenden Stampflehm-bauten der Austrocknungsfortschritt des Wandquerschnitts den möglichen Baufortschritt, da dieser mit der Erhöhung der Spannungen im Querschnitt verbunden ist. Abbildung 2.6 zeigt diesbezüglich den Festigkeitsanstieg einer Stampflehm-mischung von der Einbaufeuchte (hier: 8,3%) bis zur Gleichgewichtsfeuchte (hier: 0,8%) unter normalen Klimabedingungen.

Eine Eigenart der Tonminerale ist die gegenüber anderen Mineralen sehr große spezifische Oberfläche sowie die sog. *intrakristalline Reaktivität*, die vor allem bei Dreischichtmineralen ausgeprägt ist. Hierbei handelt es sich um die Eigenschaft, dass bei der Änderung von Umgebungsbedingungen andere Stoffe temporär oder dauerhaft in oder an die Mineralstruktur gebunden oder ausgetauscht (*Kationenaustauschvermögen*) werden können. Dies trifft auf Wassermoleküle zu wie auch auf organische und anorganische Verbindungen [Jasmund/Lagaly, 1993]. Neben dem hohen Vermögen, Raumluftfeuchte zu puffern, bewirkt die interkristalline Reaktivität die begrenzte, aber spür- und messbare Bindung von Gerüchen und Schadstoffen (siehe Abschnitt 3.3).

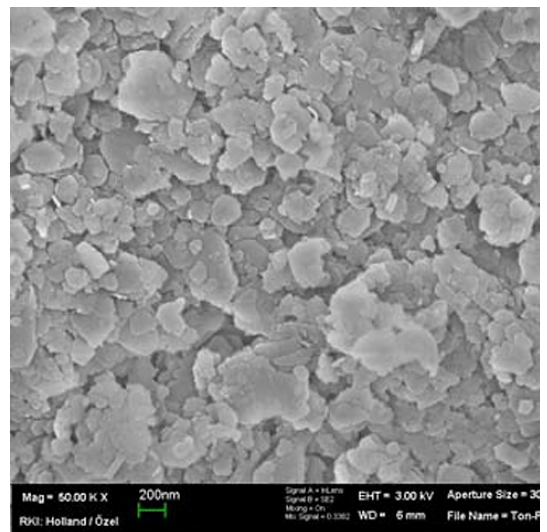
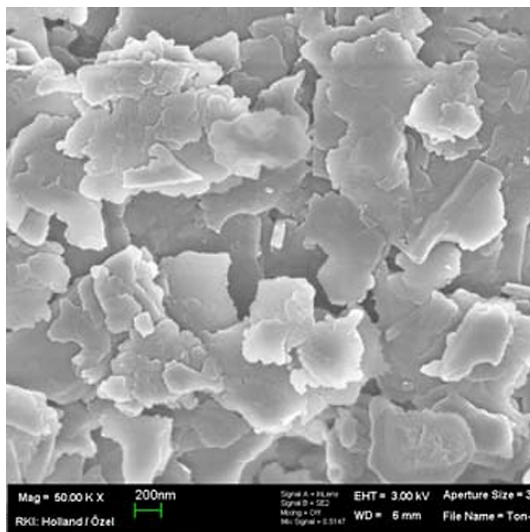
Die Farbe der Tone wird im Wesentlichen von den Metalloxiden und -hydroxiden der Metalle Eisen, Mangan und Aluminium bestimmt, die in fast jedem natürlichen Ton als Bestandteile vorkommen. Ein Rückschluss von der Farbe des Tons auf dessen Eigenschaften ist nicht möglich.

2.3.2 Zweischichttonminerale

Bei der Gruppe der *Zweischichttonminerale*, die auch als *Kaolingruppe* bezeichnet wird, sind zwei Schichten – jeweils eine Oktaeder- und Tetraederschicht – miteinander verknüpft. Ein Kaolinittonmineral besteht dann aus 20 bis 100 dieser aufeinander gestapelten verknüpften Mineralschichten. Die Kaolinite sind mit einer mittleren Teilchengröße von 0,5 bis 4 µm relativ groß. Die spezifische Oberfläche ist mit ca. 10 m²/g gegenüber den Dreischichttonmineralen gering. Die Ladungsdifferenzen der Plättchenflächen sowie die intrakristalline Reaktivität sind ebenfalls gering. Für den Lehmabbau bedeutet das: Kaolinite sind im Vergleich zu den Dreischichttonmineralen schwache Bindemittel. Überwiegt ihr Anteil in der Tonfraktion, kann das zu geringen Festigkeiten führen. Die raumklimaregulierende Eigenschaft, Luftfeuchte im Baustoff zwischenzuspeichern, ist bei kaolinitgebundenen Lehmabbaustoffen zwar größer als bei anderen mineralisch gebundenen Baustoffen, aber geringer als bei smectitgebundenen (Abschnitt 2.3.3). Ein Vorteil kaolinitisch gebundener Lehmabbaustoffe ist das geringe Quellen und Schwinden.

Eine Ausnahme innerhalb der Zweischichttonminerale bildet das Halloysit, welches vor allem in ehemals vulkanisch aktiven Gebieten vorkommt. Halloysit ist als einziges Zweischichtmineral sehr klein, reaktiv und quellfähig.

Abb. 2.7: Zweischichttonminerale (links) und Dreischichttonminerale (rechts) unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM)



2.3.3 Dreischichttonminerale

Die elementare mineralische Baugruppe der *Dreischichttonminerale* besteht aus drei Mineralschichten. Dabei ist eine Oktaederschicht von zwei Tetraederschichten umgeben.

Innerhalb der Dreischichttonminerale unterscheidet man nichtquellfähige und quellfähige. Bei Letzteren treten bei Wasserzu- und -abgabe größere Quell- und Schwindmaße auf. Die wichtigste Gruppe der quellfähigen Dreischichttonminerale sind die *Smectite*, häufig vertreten durch *Montmorillonit* und *Beidellit*. Die wichtigste Gruppe der nichtquellfähigen Dreischichttonminerale sind die tonmineralischen *Glimmer*, dessen am häufigsten vorkommender Vertreter der *Illit* ist.

Der mittlere Teilchendurchmesser der Dreischichttonminerale ist meist kleiner als $0,2\ \mu\text{m}$ und damit wesentlich geringer als bei den Zweischichtmineralen. Abbildung 2.7 zeigt die unter dem *Rasterelektronenmikroskop* (REM) erkennbaren unterschiedlichen Teilchengrößen von *Kaolinit* und einem *Smectit*.

Die spezifische Oberfläche von Dreischichttonmineralen erreicht bis zu $1000\ \text{m}^2/\text{g}$. Die gegenüber den Zweischichtmineralen wesentlich größere Oberfläche resultiert aus den für Reaktionsvorgänge zugänglichen Zwischenschichten [Jasmund/Lagaly, 1993]. Die Plättchenflächen der Dreischichtminerale weisen größere Ladungsdifferenzen auf, wodurch die Bindekraft der Dreischichttonminerale stärker ist als die der Zweischichttonminerale. Die interkristalline Reaktivität ist um ein Vielfaches höher als die der Zweischichtmineralen. Damit kann u.a. mehr Wasser an der Mineralstruktur angelagert werden, was auch zu hohen Werten der Luftfeuchteabsorption führt. Das Quellen und Schwinden von aus Dreischichttonmineralen hergestellten Lehm- baustoffen muss im Rahmen der Rezepturentwicklung besonders sorgfältig durch Zugabe von mineralischen und pflanzlichen Zusatzstoffe beeinflusst werden.

Tonmineralanalyse

Aus der Verschiedenartigkeit der Tonminerale ergibt sich, dass Lehme nicht nach dem absoluten Tongehalt beurteilt werden können.

Die sichere Identifizierung von Tonmineralen ist aufgrund der geringen Teilchengrößen schwierig und erfordert die Erfahrung eines spezialisierten Mineralogen.

Tonminerale können am sichersten mit der *Röntgendiffraktometrie* identifiziert werden. Neben der Art der Tonminerale ist eine Abschätzung über die Mengenverteilung möglich. Für die Analyse sind spezielle aufwendige Präparationstechniken, sog. Texturpräparate, notwendig. Ergänzende Informationen über die mittels Röntgendiffraktometrie bestimmten Tonminerale liefern die Verfahren der *Differenzialthermoanalyse* und *Thermogravimetrie* (DTA/TG) sowie die *Infrarotspektroskopie* (FTIR).

Zur Klärung morphologischer Unterschiede wird häufig die *Rasterelektronenmikroskopie* (REM) bzw. die *Transmissionselektronenmikroskopie* (TEM) verwendet. Beide Methoden erlauben außerdem mikrochemische Untersuchungen, die über den Chemismus der Tonminerale Auskunft geben. Die Präparation von Lehmproben sowohl für REM- als auch für TEM-Untersuchungen ist aufwendig und die eigentliche Untersuchung zeitintensiv.

Die in der keramischen Industrie zum Nachweis von quellfähigen Tonmineralen angewandte Methylenblaumethode lässt sich im Lehmabbau nur begrenzt anwenden, da der Test nur bei für den Lehmabbau unüblich hohen Tongehalten sichere Ergebnisse liefert. Methylenblau ist ein spezieller Farbstoff, der durch das Kationenaustauschvermögen der quellfähigen Dreischichttonminerale absorbiert wird. Anhand der absorbierten Menge kann der Gehalt dieser Minerale abgeschätzt werden.

2.4 Eignungsprüfung von Baulehm

Die Eignung von Lehm für die Herstellung von Lehmbaustoffen ist neben Anteil und Art der Tonminerale von zahlreichen anderen Faktoren abhängig. Damit ergibt sich der Bedarf einer hinreichend genauen Einschätzung. Bei den dazu hilfreichen Methoden unterscheidet man einfache *Feldprüfungen* und *Laborprüfungen*.

Die Prüfung der Eignung soll folgende Fragen klären:

- ▶ Weist der Baulehm eine ausreichende Bindekraft auf, um die gewünschte Festigkeit zu entwickeln und Zuschläge ausreichend zu binden?
- ▶ In welchen Mengen, Abstufungen, Formen und Kornoberflächen sind sandige oder steinige Bestandteile im Baulehm enthalten? Sind diese eventuell störend bei der geplanten Verarbeitung des Lehmbaustoffs?
- ▶ Wird sich der Baulehm mit vertretbarem Aufwand aufbereiten lassen?
- ▶ In welchem Bereich bewegt sich die Trockenschwindung?
- ▶ Sind unerwünschte Bestandteile enthalten?

Zwar kann man ungeeignete Lehme „verschneiden“ oder durch eine entsprechende Aufbereitung ungewünschte Stoffe eliminieren, aber diese Prozesse sind aufwendig, und man wird – sofern man die Wahl hat – auf Lehme zurückgreifen, die mit möglichst wenig Aufwand zum Lehmbaustoff verarbeitet werden können. In vergangenen Jahrhunderten war es selbstverständlich, dass jeweils nur die Techniken angewandt wurden, die mit dem lokal verfügbaren Material realisiert werden konnten.

Eine gute Zusammenfassung der praxisgerechten Prüfungen bietet das Technische Merkblatt 05 des DVL „Qualitätsüberwachung von Baulehm“ [DVL, 2011].

2.4.1 Feldprüfung von Baulehm

Die Beurteilung von Baulehmen über einfache *Feldversuche* erfordert Erfahrung und im Wortsinn Fingerspitzengefühl. Liegt beides vor, kann eine Aussage über eine grundsätzliche Eignung sicher getroffen, eine Bezeichnung hinreichend genau abgeleitet (gemäß Tabelle 2.1) und eine Bandbreite an Rezepturen angegeben werden. Eine Kontrolle der Aussagen kann durch die Prüfung der Baustoffeigenschaften erfolgen. An einer Probe müssen stets mehrere verschiedene Feldversuche angewendet werden, da bestimmte Lehme bei einzelnen Verfahren nicht eindeutig beurteilt werden können.

Bei der *Sichtprobe der Lagerstätte* ist zuerst die Gleichmäßigkeit der Lagerstätte einzuschätzen. Liegt der Baulehm in dünnen Bändern in verschiedener Qualität vor, sind Proben der einzelnen Bänder zu vermengen und zu testen. Natürlich muss auch eingeschätzt werden, ob der Lehm in der jeweiligen Qualität in der benötigten Menge vorliegt. Einen ersten Eindruck über das zu erwartende Schwindmaß kann man über eine eventuelle Schollenbildung an ausgetrockneten Partien erhalten. Größere Klumpen in einer Grube weisen auf einen erhöhten Aufbereitungsaufwand hin. Nutzbare Lagerstätten müssen weitgehend frei von Durchwurzelung und Humus sein. Dies gilt besonders für die Herstellung von Lehmabaustoffen, die an der Oberfläche oder oberflächennah eingesetzt werden, da sich sonst Verfärbungen einstellen können.

Abb. 2.8: Die grobe Einschätzung der Bindekraft von Lehm kann anhand einer breiigen Probe zwischen Fingerkuppen erfolgen

Die verschiedenen Feldversuche werden in voneinander abweichenden Konsistenzstufen, doch nicht zu trocken durchgeführt. Vergleicht man Proben untereinander, sollten diese bei der jeweiligen Prüfung über eine möglichst gleiche Konsistenz verfügen, da durch diese die Formbarkeit (Plastizität) und die Bindekraft (Zugfestigkeit im zähplastischen Zustand) wesentlich beeinflusst werden.



Von einer *erdfeuchten Probe* sollte man zuerst versuchen, eine Kugel zu formen (*Kugelformprobe*). Die Formbarkeit der Probe steigt mit der Bindekraft des Lehms. Eine aus sehr magerem Lehm geformte Probe zerfällt, wenn man sie nach dem Formen aus etwa 80 cm Höhe auf eine feste Unterlage fallen lässt. Eine Kugel aus magerem bis fast fettem Lehm reißt auf, zerfällt aber nicht. Eine Kugel aus fettem Lehm plattet lediglich ab. Versucht man die Kugel aufzureißen, erhält man einen Eindruck von der Bindekraft des Lehmes (Abbildung 2.9).

Schneidet man die Kugel aus erdfeuchtem Lehm mit dem Messer auf (*Schneideversuch*), erhält man bei einem Lehm mit hoher Bindekraft eine glänzende Schnittfläche (Abbildung 2.10). Magerer Lehm bleibt stumpf, Sande hinterlassen Mitnahmespuren und knirschen beim Schneiden.

Aus dem Zerdrücken, Zerbrechen einer trockenen Kugelprobe oder dem Fallenlassen auf eine harte Unterlage kann man auf die sich am Lehmbauteil entwickelnde Festigkeit schließen. Proben mit geringer Bindekraft kann man zwischen den Fingern zerdrücken. Beim Fallenlassen zerbrechen magere Lehme in viele kleine Teile oder sogar pulverartig. Kugeln aus sehr fettem Lehm zerspringen nicht. Reibt man die Oberfläche einer trockenen Probe, kann man abschätzen, ob der Lehmbaustoff eine ausreichende Abriebfestigkeit entwickeln kann.

Im erdfeuchten Zustand kann die Existenz von Humus (zersetzte organische Pflanzenbestandteile) hinreichend genau am typischen Geruch beurteilt werden (*Riechversuch*). Humusfreier Lehm ist quasi geruchlos. Sehr geringe Humusanteile können nach mehrtägigem Sumpfen in einem geschlossenen Gefäß mit der Riechprobe identifiziert werden. Die Bestimmung des Glühverlusts als Maß für den organischen An-



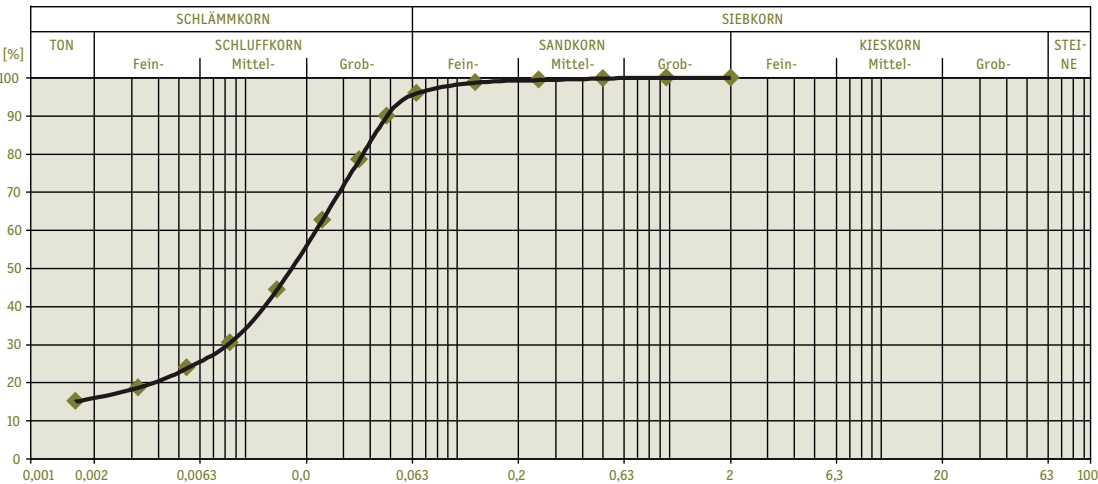
Abb. 2.9 (gegenüber): Die grobe Einschätzung der Bindekraft von Lehm kann beim Zerreißen einer erdfeuchten Lehmkugel zwischen Fingerkuppen getroffen werden

Abb. 2.10: Eine glänzende Schnittfläche weist auf einen mindestens „fast fetten“ Lehm hin

teil ist nicht aussagekräftig. Die beim Tempern entweichenden Wasseranlagerungen der Tonminerale können nicht vom Masseverlust der organischen Bestandteile differenziert werden. Die Toleranzschwelle gegenüber geringen Humusanteilen ist bei Putzen am tiefsten anzusetzen, da schon kleine Humuspartikel Farbveränderungen auf der Oberfläche hervorrufen können. Diese reichen von durchschlagenden dunklen Flecken bis zu lokalen weißlichen Salzbelägen. Die Humusfreiheit bedeutet nicht die Freiheit von Mikroben: Baulehme, aber z. B. auch Sande haben eine gewisse mikrobielle Flora [Röhlen, 2018]. Wird der Baulehm im Zuge der nachfolgenden Baustoffherstellung erhitzt, so kann der Baustoff (abgesehen von nachträglichen Verunreinigungen) als keimfrei gelten.

Sowohl die Bindekraft als auch die Gesteinskörnung lassen sich durch Reiben einer *zähbreiigen Probe* zwischen den Fingerspitzen abschätzen (*Reibeversuch*). Dabei lassen sich feinsandige und sandige Bestandteile erspüren. Schwieriger ist die Unterscheidung von schluffigen und tonigen Bestandteilen, da auch nichtbindige bzw. schwachbindige feine Schluffbestandteile im zähbreiigen Zustand ein seifiges Gefühl zwischen den Fingerspitzen erzeugen. Beim Abwaschen der Probe erkennt man dann jedoch die eher schluffigen Lehme daran, dass sie sich schneller abwaschen lassen als tonige (*Waschtest*). Nimmt man eine zähbreiige Probe zwischen die Fingerspitzen, drückt diese zusammen und zieht sie anschließend auseinander, kann man am Widerstand beim Auseinanderziehen und dem sich ergebenden „Zugbild“ auf die Bindekraft schließen. Je schwerer sich die Fingerspitzen voneinander entfernen lassen und umso weiter sich die Probe auseinanderziehen lässt, desto bindiger ist die Probe (Abbildung 2.8).

Abb. 2.11: Beispielhafte Korngrößenverteilung eines Lößlehms, ermittelt mit der kombinierten Sieb-/Schlämm-Analyse



2.4.2 Laborprüfung von Baulehm

2.4.2.1 Korngrößenverteilung

Eine häufig angewandte Methode, Lehme bezüglich ihrer Eignung für den Lehmabbau zu bewerten, ist die aus der Bodenmechanik stammende Ermittlung der *Korngrößenverteilung* nach DIN 18123. Hierbei wird die Masseverteilung der verschiedenen Korngrößen durch die kombinierte *Sieb-Schlamm-Analyse* bestimmt. Abbildung 2.11 zeigt beispielhaft die Korngrößenverteilung eines Lößlehms.

Die Grenze zwischen Ton- und Schlufffraktion ist bei der bodenmechanischen Klassifizierung mit dem Zahlenwert 0,002 mm, also 2 μm , belegt. Alle Teilchen, die kleiner sind als dieser Wert, werden als *Tonfraktion* bezeichnet, alle Teilchen, die größer sind, als Schluff-, Sand-, Kies- und Steinfofraktion. Aus der Bezeichnung *Tonfraktion* wird dann häufig geschlossen, dass es sich bei dem dort ermittelten Anteil um den Anteil an *Tonmineralen*, also den bindigen Bestandteilen, handelt. Aus dem Masseanteil der Tonfraktion wird weiterhin geschlossen, ob eine Lehmprobe eine hohe oder niedrige Bindekraft, ein hohes oder niedriges Schwindmaß usw. aufweist. Diese direkten Schlussfolgerungen sind aus folgenden Gründen falsch:

- ▶ Kaolinite können auch über Teilchengrößen von mehr als 2 μm verfügen. Tonminerale mit einer Teilchengröße von über 2 μm werden aber nicht der Tonfraktion zugeordnet. Das führt zur Unterschätzung des Tonmineralgehalts und der Bindekraft.
- ▶ Quarz, Feldspäte, Carbonate sowie verschiedene Metalloxide und -hydroxide kommen auch in Korngrößen unter 2 μm vor. Diese haben aufgrund ihrer wesentlich geringeren Oberflächenladung und geringeren spezifischen Oberfläche auch eine wesentlich geringere Bindekraft als Tonminerale. Nach Heim beträgt allein der Quarzanteil in der Tonfraktion oftmals 20–40 % [Heim, 1990]! Das führt zur Überschätzung des Tonmineralgehalts und der Bindekraft.
- ▶ Für die Bindekraft besteht ein erheblicher Unterschied darin, ob innerhalb der Tonfraktion Zweischicht- oder quellfähige Dreischichttonminerale vorliegen. Eine Identifikation dieser Mineralgruppen ist jedoch über die Sieb-Schlamm-Analyse nahezu unmöglich. Das führt zu Fehleinschätzungen bezüglich Bindekraft, Schwindmaß, Druckfestigkeit usw.

Als Eignungsprüfung für Baulehm ist die Ermittlung der Korngrößenverteilung damit ungeeignet. Möchte man bei der Herstellung von Lehmputzen oder Stampflehm-mischungen eine optimale Kornverteilung erreichen, kann es hingegen sehr sinnvoll sein, ein Bild über die Kornverteilung des genutzten Baulehms zu besitzen. Damit können dann fehlende oder unterrepräsentierte Fraktionen zielsicher ergänzt werden. Die Ermittlung der Korngrößenverteilung kann also als sinnvolles ergänzendes Prüfverfahren eingeordnet werden.



Abb. 2.12: Form, Stampfer und Versuchsaufbau der Bindekraftprüfung (Achterlingsprüfung)

2.4.2.2 Bindekraftprüfung (Achterlingsprüfung)

Zur Einschätzung von Baulehm hinsichtlich seiner bindenden Fähigkeit im Lehmbaumaterial ist die *Bindekraftprüfung* – wegen der Prüfkörperform auch *Achterlingsprüfung* genannt – besser geeignet als die Quantifizierung der Korngrößen. Mit dem Versuch wird die Summe der bindenden Wirkungen aller Tonmineralgruppen und der gesamten Matrix erfasst. Die Prüfung ist, korrekt ausgeführt, relativ aufwendig, liefert aber eine quantitative Aussage, anhand derer eine Charakterisierung des Baulehms erfolgen kann.

Bei der Bindekraftprüfung wird die Zugfestigkeit am erdfeuchten bis zähplastischen Probekörper bestimmt (Abbildung 2.12, genauer Aufbau und Ablauf siehe DVL, 2009). Die Bindekraft oder Klebekraft im erdfeuchten Zustand ist ein wesentliches Charakteristikum der Lehmbaumaterialien. Während bei zement- oder kalkgebundenen Massen bei dieser Konsistenz vor dem Beginn der chemischen Erhärtungsvorgänge lediglich schwache, auf die Gegenwart von Wasser beruhende Adhäsionskräfte vorliegen, ist die Tonbindung auch im plastischen Zustand existent – nur eben schwächer als im trockenen Zustand.

Nach der beim Versuch aus der Bruchlast ermittelten Bruchspannung werden Baulehme wie in Tabelle 2.1 ersichtlich eingeteilt. Außerdem können aus dem Prüfwert erste Aussagen über die Eignung zur Herstellung bestimmter Lehmbaumaterialien abgeleitet werden.

Masse beim Bruch, bezogen auf die gesamte Bruchfläche [5 cm ²]	Masse beim Bruch je cm ²	Bruchspannung	Bezeichnung
[g]	[g/cm ²]	[N/mm ² , MPa]	
bis 250	bis 50	bis 0,005	im Allgemeinen nicht geeignet
≥ 250 bis 400	≥ 50 bis 80	≥ 0,005 bis 0,008	sehr mager
> 400 bis 550	> 80 bis 110	> 0,008 bis 0,011	mager
> 550 bis 1000	> 110 bis 200	> 0,011 bis 0,020	fast fett
> 1000 bis 1400	> 200 bis 280	> 0,020 bis 0,028	fett
> 1400 bis 1800	> 280 bis 360	> 0,028 bis 0,036	sehr fett
> 1800	> 360	> 0,036	Ton

Tabelle 2.1: Einteilung von Baulehm nach seiner Bindekraft im Achterlingstest gemäß DVL [DVL, 2008]

Lehme mit einer Bruchspannung von bis zu 0,005 N/mm² lassen sich durch die Bindekraftprüfung nicht hinreichend genau unterscheiden. Ihre mögliche Eignung ist auf andere Art zu prüfen. Sie gelten nach den *Lehmbau Regeln* als „im Allgemeinen für den Lehmabau nicht geeignet“. Ausnahmen sind bspw. Lehme, die bereits über ein besonders günstiges Korngerüst verfügen und damit nahezu ohne weitere Zugabe von Zuschlägen als Putzmörtel verwendet werden können, oder Baulehm mit einem hohen natürlichen Kalkgehalt (Abschnitt 2.4.2.5).

Nachteile der Bindekraftprüfung sind die Ungenauigkeiten in der möglichen Prognose der zu erwartenden bzw. erreichbaren Schwindmaße und Druckfestigkeiten. Es besteht zwar eine grundsätzliche Beziehung darin, dass magere Baulehme bei gleichem Feuchtegehalt weniger schwinden als fette, jedoch in einer derart großen Streubreite, dass ein hinreichend genauer Rückschluss nicht erfolgen kann. Weiterhin wird die festigkeitserhöhende Wirkung des natürlichen Kalkgehalts bei der Bindekraftprüfung nicht erfasst. Nicht selten wird Lehm, der weiterverarbeitet zum Lehmabbaustoff hervorragende Eigenschaften aufweisen, die Eignung aufgrund zu geringer Bindekraft abgesprochen. Geeignet sind hingegen Verfahren, die die Trockendruckfestigkeit beurteilen, wie der Kugelfalltest mit der trockenen Kugel in der Feldprüfung sowie die Bestimmung der Druckfestigkeit des Baulehms in der Laborprüfung.

2.4.2.3 Plastizitätsprüfung

Eine spezifische Eigenschaft von tonhaltigen Massen ist deren Plastizität im feuchten Zustand. Das Verfahren Plastizitätsprüfung wird dennoch kritisch gesehen, da alle Bestandteile $\geq 0,4$ mm abgesiebt werden müssen. Damit wird die Rheologie der meisten Baulehme signifikant verändert, also die Aussage verfälscht.

Bei Lößlehm, der kaum Bestandteile dieser Größenordnung enthält, kann die Prüfung sinnvoll sein. Die Prüfung und Auswertung der Plastizität ist dann gemäß DIN 18122 und DIN 18196 durchzuführen.

2.4.2.4 Bestimmung von Schwindmaß und Druckfestigkeit des Baulehms

Alternativ zur Bindekraftprüfung hat sich zur Abschätzung von Rezepturen und der erreichbaren Eigenschaften der Lehmbaumstoffe die Schwindmaß- und Druckfestigkeitsprüfung von Baulehm bewährt. Die dazu notwendigen Mörtelprismen nach DIN EN 1015-11 ($l \times b \times h = 160 \times 40 \times 40$ mm) werden gemäß Technischem Merkblatt 05 (DVL, 2011) je nach geplanter Verarbeitungskonsistenz des Lehmbaumstoffs aus Baulehm mit der sog. Versuchskonsistenz (wie Bindekraftprüfung, ca. erdfeucht) oder plastisch (Ausbreitmaß 175 mm nach DIN EN 1015-3) hergestellt. So kann eine hinreichend genaue Aussage über das am Bauwerk zu erwartende Schwindmaß, aber auch über die Druckfestigkeit erreicht werden. Insbesondere die Schwindmaßprüfung ist einfach und kann ohne wesentliche Laborausüstung durchgeführt werden.

Das Schwindmaß bei plastischer Konsistenz ist wegen des wesentlich höheren Feuchtegehalts um 20-50 % höher als bei erdfeuchter Konsistenz, die Druckfestigkeit wegen der höheren Porosität um 5-25 % geringer.

Aus dem am Prisma gemessenen Schwindmaß des Baulehms und dem für den jeweiligen Baustoff anzustrebenden Schwindmaß lässt sich die Notwendigkeit und mit Erfahrung auch die Menge der notwendigen Zugabe von Zuschlägen ableiten. Die am Baulehmprisma gemessene Druckfestigkeit liefert eine Tendenz, ob mit dem Baulehm die erforderliche Festigkeit am Lehmbaumstoff erreicht werden kann. So kann die Zugabe eines gut abgestuften scharfkantigen Korngerüsts zwar die Voraussetzungen für einen festen Lehmbaumstoff verbessern, da aber gleichzeitig der absolute Anteil an bindigen Stoffen sinkt, kann bei sehr mageren Lehmen die zusätzliche Beimengung von fettem Baulehm oder Tonpulver notwendig sein.

2.4.2.5 Qualitative Bestimmung des natürlichen Kalkgehalts

Die qualitative Bestimmung des *natürlichen Kalkgehalts* in Baulehm kann über Beträufeln mit verdünnter Salzsäure, aber auch konzentriertem Haushaltssessig erfolgen (Abbildung 2.13).



Abb. 2.13: Aufschäumen einer Baulehmprobe mit einem hohen natürlichen Kalkgehalt nach Beträufeln mit 10%iger Salzsäure

Je mehr und je feiner Kalk in der Probe enthalten ist, umso stärker ist das zu beobachtende Aufbrausen. Je länger das Aufbrausen anhält, umso gröber sind die enthaltenen Kalkpartikel. Der natürliche Kalkgehalt im Lehm besteht je nach Lehmart im Wesentlichen aus mehr oder weniger feinen Kalksteinpartikeln (Calciumcarbonat). Sie reichen von grobem Gesteinskorn bei frischen Verwitterungslehmen bis zu Partikeln im μm -Bereich bei Lösslehm. Kalkstein weist eine gewisse Löslichkeit gegenüber mit CO_2 angereichertem Wasser (z.B. Regenwasser) auf. Aus der Lösung können wieder feste Mineralstrukturen entstehen, was z.B. in Tropfsteinhöhlen an den sich aus der Lösung bildenden Stalagmiten und Stalaktiten beobachtet werden kann. Wird ein Lehmbaustoff, der feinste und gleichmäßig verteilte Kalksteinpartikel enthält, längere Zeit feucht gelagert, werden diese Partikel an den Oberflächen angelöst. Trocknet der Lehmbaustoff, bilden sich zusätzlich zur Tonbindung zur Festigkeit des Baustoffs beitragende Kalkstein- und Calcitmineralstrukturen aus. Nicht zu verwechseln sind die hier beschriebenen Prozesse mit den Effekten, die am Lehmbaustoff mit der Zugabe von reaktivem Kalk als Bindemittel (Calciumhydroxid) ausgelöst werden. Im Gegensatz zum natürlichen Kalkgehalt führt die Zugabe von reaktivem Kalk zu erheblichen Wechselwirkungen mit den Tonmineralen und u.U. zur negativen Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften.

2.4.2.6 Salzgehaltbestimmung

Salze (*Chloride, Sulfate und Nitrate*) sind in jedem Lehm vorhanden. Oberhalb bestimmter Konzentrationen können Salze am Bauwerk zu Mängeln oder Schäden führen. Die meisten Lehme erweisen sich hinsichtlich des Salzgehalts als unkritisch. Eine Überprüfung empfiehlt sich aber vor allem bei:

- ▶ im küstennahen Bereich gewonnenem Grubenlehm
- ▶ Lehmgruben im Umfeld von intensiver Tierhaltung (Gülleintrag)
- ▶ Lehmgruben im Bereich ehemals stark gedüngter Flächen

Abb. 2.14:

Bestimmung des Anionengehaltes an bauschädlichen Salzen mittels fotometrischem Verfahren am wässrigen Auszug einer Baustoffprobe



- ▶ Grubenlehm, der durch Tausalzeintrag beeinträchtigt sein könnte sowie
- ▶ Baulehmgewinnung aus Abbruchmaterial

Beim Bauen im internationalen Zusammenhang ist diese Auflistung durch Lehme aus ariden Gebieten (Steppen und Wüsten) zu ergänzen.

Zum quantitativen Nachweis bauschädlicher Salze wird in der Regel die *Ionenchromatografie* oder die *Spektralfotometrie* verwendet. Die Salze sind in Masseanteilen bis auf die zweite Nachkommestelle genau anzugeben. Herkömmliche nasschemische Methoden wie *Gravimetrie* und *Potenziometrie* werden ebenfalls herangezogen.

Die Frage, welche Salzgehalte im Baulehm akzeptiert werden können, hängt von dem gewünschten Einsatzzweck (Baustoff und Bauteil), aber auch von den Bedingungen am Bauwerk ab. Bei wechselfeuchten Bauteilen (z.B. aus Bewitterung oder aufsteigender Feuchte) muss die Grenze tiefer gelegt werden als bei dauerhaft trockenen Bauteilen, da hier die temporär gelösten Salze aus allen Schichten systematisch in die Verdunstungszone geführt werden. Das kann zu überkritischer Salzanreicherung führen, was sich in feuchten Flecken, Salzrändern und einem gelockerten Oberflächengefüge äußern kann. Dabei ist auch von Bedeutung, welche Salze vorliegen. Leicht lösliche Nitrate sind grundsätzlich problematischer als die schwerer löslichen Sulfate. Es muss berücksichtigt werden, dass leicht lösliche Salze durch ihre hygroskopischen Eigenschaften die Baustofffeuchte auch ohne aufsteigende Feuchte oder Bewitterung heraufsetzen. Durch diesen Effekt können Festigkeit und Farbe erheblich beeinflusst werden (Abbildung 2.15).

Es wäre nicht zielführend, für Baulehme Grenzsatzgehalte anzugeben. Dies liegt darin begründet, dass die Baulehme in verschiedenen Mischungsverhältnissen abgemagert werden und damit der Salzgehalt verdünnt wird. Weiterhin können Zuschläge oder auch das Anmachwasser Salze enthalten. Grenzsatzgehalte wurden deshalb in den



Abb. 2.15:
Dunkle Stellen infolge
hygroskopisch erhöh-
ter Feuchte durch die
Verwendung einzelner
salzbelasteter Lehm-
steine und ihre mess-
technische Erfassung
(Jahili Fort, Al-Ain,
UAE)

Normen 18945 bis 18948 gleichlautend für die dort genormten Lehmbaumstoffe und nicht für Baulehm festgelegt (siehe z.B. Kapitel 4, Lehmputze). Die Werte können auch auf andere Lehmbaumstoffe übertragen werden.

Es ist zwar möglich, Salze aus Lehm auszuwaschen, aber dazu ist viel salzfreies Wasser notwendig. Genau dies ist aber in vielen Regionen, wo man dieses Verfahren anwenden müsste, nicht oder nur mit hohen Kosten verfügbar. Beim Auswaschen von bauschädlichen Salzen aus Lehm wird dieser zu einer dünne Schlämme aufgerührt und diese dann mehrere Tage stehen gelassen. Das sich oben absetzende Wasser, in dem dann wesentliche Anteile der Salze gelöst sind, wird abgelassen. Dieser Prozess ist bei Bedarf mehrmals zu wiederholen.

2.5 Aufbereitung

Unter *Aufbereitung* versteht man die Arbeitsgänge, mit denen ein Baulehm für die Verarbeitung zum Baustoff vorbereitet wird. Ziel der Aufbereitung ist, dass der Baulehm für die Weiterverarbeitung entsprechend den Anforderungen homogen und ohne störende Bestandteile vorliegt und die Tonminerale im Lehmbaumstoff ihre Bindemittelwirkung entfalten können, d.h. aufgeschlossen sind.

Grubenlehme werden heute in der Regel maschinell, also mechanisch, aufbereitet. Die mechanische Aufbereitung kann durch natürliche Prozesse unterstützt oder bestenfalls sogar ersetzt werden. Dabei ist jedoch mehr Zeit einzuplanen.

Welches Aufbereitungsverfahren gewählt wird, hängt von zahlreichen Randbedingungen, aber zuallererst vom Baulehm ab.

2.5.1 Natürliche Aufbereitung des Baulehms

Natürliche Aufbereitungsmethoden werden vor allem dann eingesetzt, wenn Lehm-
baustoffe aus vor Ort anstehendem Baulehm hergestellt werden sollen. Es wird zwi-
schen folgenden Verfahren unterschieden:

Sumpfen

Beim *Sumpfen* ruht Baulehm im nassen Zustand. Nach einer gewissen Zeit sind alle
Tonmineralteilchen im Anmachwasser dispergiert, was dazu führt, dass zwischen
den Kristalliten nur noch schwache Bindungskräfte vorhanden sind und der Baulehm
schon durch leichtes Rühren homogen durchmischt werden kann. Wie lange es dau-
ert, bis die Tonpartikel im Wasser dispergiert sind, hängt von der Größe der eventuell
vorhandenen Tonklumpen und der Art bzw. Größe der Tonminerale ab. Bei stark quel-
lenden Tönen gibt es abdichtende Effekte, sodass der Aufschluss mehrere Wochen bis
Monate dauern kann. Bei sehr mageren bis mageren Lehmen ist bereits beim Sumpfen
über Nacht ein weitreichender Aufschluss eingetreten.

Aussommern

Beim *Aussommern* ruht Baulehm im wechselfeuchten, mindestens aber erdfeuchten
Zustand. Die Bindung zwischen den Tonmineralteilchen wird geschwächt, wodurch
der Lehm besser gesiebt oder durchmischt werden kann. Die Methode ist weniger
schnell und weniger wirksam als das Sumpfen, jedoch steht der Baulehm dann auch
im nahezu erdfeuchten Zustand zur Verfügung, wie es für Stampflehm zwingend not-
wendig ist.

Auswintern

Beim *Auswintern* ruht Baulehm im wechselfeuchten, mindestens aber erdfeuchten
Zustand unter Frost-Tau-Wechsel. In Ergänzung zum Aussommern wird durch Frost-
sprengungen das Gefüge wirkungsvoll gelockert und dadurch werden auch sehr in-
homogene Baulehme gleichmäßig aufgeschlossen. Sie können anschließend durch
einfaches Aufmischen homogenisiert werden. Die Abmessungen der zum Auswintern
anzulegenden Miete sind auf die zu erwartende Frosteindringtiefe abzustimmen.



Abb. 2.16:
Traditionelles Aufbe-
reiten von Baulehm
mittels Sieben, Sump-
fen und Mauken

2.5.2 Mechanische Aufbereitung des Baulehms

Zur mechanischen Aufbereitung zählen die mechanischen Aufschlussprozesse sowie das Sieben.

Kollern

Das wesentliche Aufbereitungsverfahren in der *keramischen Industrie* ist das *Kollern*. Beim Kollern wird erdfeuchter Baulehm oder auch Ton mittels mühlsteinartiger Räder durch ein Grobsieb gedrückt. Dabei wird zum einen die Masse hinsichtlich Zusammensetzung und Feuchte homogenisiert und zum anderen werden steinige Bestandteile gebrochen und damit deren Korngröße auf ein für die meisten Anwendungen unproblematisches Maß reduziert. Einige Ziegeleien (vor allem diejenigen, die auf die Produktion von Lehmbaustoffen umgestellt wurden) bieten neben nicht aufbereiteten Massen auch durch Kollern aufbereitete Massen zum Verkauf an.

Mahlen

Für die Weiterverarbeitung von Baulehmen und Tonen werden diese teilweise als trockenes Pulver benötigt. Hierzu erfolgt das Zermahlen des vorgetrockneten Rohstoffs in Pulvermühlen, deren Mahlwerke denen von Getreidemühlen ähneln. Je nach Einstellung der Mahlwerke enthalten die aufbereiteten Massen noch steinige Bestandteile bis 4 mm. Es sind aber auch gemahlene Baulehme mit einem Größtkorn von 0,5 mm am Markt verfügbar. Das aufbereitete Material kann im Sack, Textilgroßsack oder Silo bezogen werden.

Aufmischen

Beim Aufmischen wird mindestens erdfeuchter, in der Regel aber plastischer Baulehm mit einem Rührwerk homogenisiert. Diese Aufbereitungsform ist besonders für magere Baulehme gut geeignet. Bei fetten Lehmen erfolgt hingegen der Aufschluss von Tonklumpen nur ungenügend bzw. mit langen Mischzeiten.

Bei von Natur aus homogenen und aufgrund ihrer relativ geringen Bindigkeit nicht zur Verklumpung neigenden Baulehmen (häufig bei Lößlehm) kann die Aufbereitung in einem Arbeitsgang mit dem Einmischen der Zuschläge erfolgen. Erforderlich sind dafür ein entsprechend starkes Mischwerk und Zuschläge, die zum Aufschluss des Baulehms beitragen (scharfer Sand, gebrochene Gesteinskörnung). Strohlehm liegt mit normalen Zwangsmischern im Grenzbereich des Möglichen.

Aufquirlen oder Aufschlämmen

Beim *Aufquirlen* oder *Aufschlämmen* wird Baulehm unter Wasserzugabe zu einer breiartigen Masse oder einer Schlämme aufgerührt. Häufig wird dem Aufquirlen die natürliche Aufbereitung des Sumpfs vorgeschaltet. Aufgequirlte Baulehme erreichen einen hervorragenden Aufschluss der Tonminerale. Außerdem kann die Selektion von größeren steinigen Bestandteilen am Boden erreicht werden. Aufgrund ihres hohen Wassergehalts eignet sich diese Aufbereitungsart vor allem für die Herstellung von Lehmputzen.

Sieben

Liegen steinige Bestandteile in zu großen Körnungen vor, müssen diese entweder zermahlen oder ausgesiebt werden. Erdfeuchtes *Sieben* kann angewendet werden, wenn der Baulehm in entsprechender Konsistenz vorliegt und die lehmigen bis tonigen Bestandteile nicht verklumpt sind. Bei steinigen, zum Verklumpen neigenden Lehmen muss dem Sieben deshalb ein anderer Aufbereitungsprozess vorgeschaltet werden.