



Schlussbericht

Mineralischer Zusatz LCW für wasserunempfindliche Lehmbaustoffe

Auftraggeber: Wienerberger AG
Wienerbergstrasse 11
Wienerberg City
A-1100 Wien

Inhalt des Auftrages: Optimierung des LCW-Zusatzes

1. Einleitung

Mit wachsendem ökologischem Bewusstsein gewinnt der Lehmbau seit einigen Jahren wieder an Bedeutung. Mit der Renaissance des Lehmbaus in Deutschland finden alte Lehmbautechniken neue Anwendung. Außenfassaden von Lehmhäusern in humiden Klimaten werden stets mit einem Wetterschutz versehen, so dass es nicht zur direkten Bewitterung von Lehm kommen kann. Häuser aus tragendem Lehm-mauerwerk haben in Deutschland wegen der Feuchteabhängigkeit der Festigkeit dicke Außenwände.

Die Entwicklung einer ausschließlich aus mineralischen Stoffen bestehenden Mischung wird zur Konditionierung von stranggepressten Lehmziegeln verwendet. Die Besonderheit des hier mit dem Namen LCW (loam conditioner for water resistancy) bezeichneten Mineralgemisches besteht darin, dass mit ihm versetzte Lehme ihre ursprüngliche Wasserlöslichkeit in weitem Umfang verlieren und resistent gegenüber wechselnden Umgebungsfeuchten sind. LCW besteht ausschließlich aus mineralischen Stoffen, die entweder als Massenware in der Bauindustrie eingeführt sind und bei kritischer ökologischer Betrachtung akzeptiert werden oder aus derselben Rohstoffbasis wie die Grundmasse, nämlich dem zur Lehmziegelproduktion verwendeten Lehm, bestehen. LCW ist ein kalterhärtendes System aus aktiviertem Ton, Kalk, Gips und Wasser. Das beschriebene System ist vergleichbar mit Romazement.

Beim LCW handelt es sich also um einen Zusatzstoff, der einerseits preisgünstig beschaffbar ist und problemlos von ökologisch geprägten Bauherren akzeptiert werden kann, und mit dem andererseits eine industrielle Produktion stranggepresster gelochter oder ungelochter Lehmziegel möglich ist. Diese sind zumindest über bauübliche Erstellungszeiträume hinreichend resistent gegenüber stehendem oder als Regen aufspritzendem Wasser. Die Festigkeit, der mit LCW modifizierten Lehmziegel verändert sich auch unter wechselnden klimatischen Bedingungen nicht wesentlich.

Unter ökologischen Gesichtspunkten betrachtet, ist vor allem die energiearme Herstellung des Baustoffs von Interesse. Aufgrund des durch ständig steigende Brennstoffpreise auf die europäische Ziegelindustrie ausgeübten wirtschaftlichen Druckes scheint die Produktion von Lehmziegeln eine sinnvolle Alternative oder Ergänzung der Ziegelproduktion zu sein. Immerhin ist es hierdurch möglich, den bei etwa 1000°C ablaufenden Brennprozess zu vermeiden, der zum Ziegelbrand erforderlich ist.

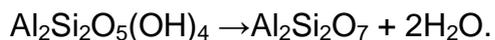
Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen die Einflüsse der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf die Druck- und Zugfestigkeit sowie der linearen Trockenschwindung bei diversen LCW-Zusammensetzungen.

2. Reaktion

Zur Planziegelherstellung werden die Ziegel geschliffen. Das dabei entstehende Ziegelmehl und gemahlener Ziegelbruch, wie er in jedem Ziegelwerk anfällt, soll den bei niedrigen Temperaturen gebrannten Kalkmergel ersetzen. Der für die hydraulische Reaktion notwendige höhere Kalkanteil wird durch das Zumischen von Kalk ausgeglichen.

Hochlochziegel werden bei 850 – 950 °C, d.h. unterhalb der Sintertemperatur gebrannt. Dabei kommt es zu den nachfolgend beschriebenen Reaktionen im Ton. Das in Mergeltonen (Tone mit hohem Calciumcarbonatgehalt) vorhandene Calcit wird durch CO₂-Abspaltung in Calciumhydroxid umgewandelt. Außerdem geben die Tonminerale Wasser ab und werden zersetzt [1]. Diese Reaktion wird als Aktivierung bezeichnet und wird am Beispiel von Kaolin erläutert.

Metakaoline entstehen durch die thermische Aktivierung von Kaolinen. Bei dieser Dehydroxylation bricht die hexagonale Schichtstruktur des Kaolinit zusammen und das dehydroxylierte und strukturell ungeordnete Metakaolinit entsteht [2]. Zwischen 500 und 750 °C werden in einer endothermen Reaktion die Hydroxidgruppen als Wasser freigesetzt. Die Reaktionsgleichung für Kaolinit lautet:



Der Masseverlust beträgt bei der Dehydroxylation 14 %. Das entstehende Reaktionsprodukt wird als Metakaolinit bezeichnet. Die Theorie zum thermischen Abbau des Kaolinit zeigt, dass viele Strukturelemente des Kaolinit erhalten bleiben, aber die Periodizität senkrecht zu den Schichten verlorengeht. Im Metakaolinit ist bei intakter Tetraederschicht nur die Oktaederschicht verändert. Durch die Abspaltung der Hydroxidgruppen gehen die Aluminiumionen in eine tetraedrische Koordination über. Das Reaktionsprodukt der analog ablaufenden Dehydroxylation anderer Tonminerale wird als aktivierter Ton bezeichnet [3]. Zu dieser Gruppe gehört auch Ziegelmehl. Die Aktivierungstemperatur der Dreischichttonminerale erstreckt sich bis etwa 950 °C.

Nach der endothermen Wasserabgabe hat sich das chemische Verhalten des Reaktionsproduktes (aktivierter Ton) gegenüber dem Ausgangsmaterial völlig verändert. Aktivierter Ton ist eine reaktionsfähige Feststoffkomponente, die eine amorphe, energiereiche Phase enthält.

Während des Brandes reagiert außerdem Kalk mit Quarz und dem aktivierten Ton, genauer gesagt, den thermisch veränderten Tonmineralen. Dabei wird Dicalciumsilikat (α und β –Belit) und in Abhängigkeit von der Brenntemperatur auch Calciumaluminiumsilikat (Gehlinit) gebildet.

Wie Abb. 1 zeigt, entstehen bei unterschiedlichen Aktivierungstemperaturen verschiedene Zusammensetzungen der Tonkomponente. Die einzelnen Bestandteile variieren in ihrem Mengenverhältnis zueinander. Die Zusammensetzung ist nicht un-

wichtig, da die einzelnen Phasen unterschiedlich reaktiv sind. So ist α -Belit beispielsweise reaktiver als die β -Modifikation. Laut Literatur [4] erreichen niedrig gebrannte Romanzemente die höchsten Festigkeiten. Die Erkenntnisse gebrannter Kalkmergel sind mit größter Wahrscheinlichkeit auf Ziegelmehle übertragbar. Es ist daher sinnvoll, dass als Recyclingmaterial nur Ziegelmehl der niedrig gebrannten Hochlochziegel für die Reaktion zu verwenden, sowohl aus Sicht der Reaktivität als auch hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung.

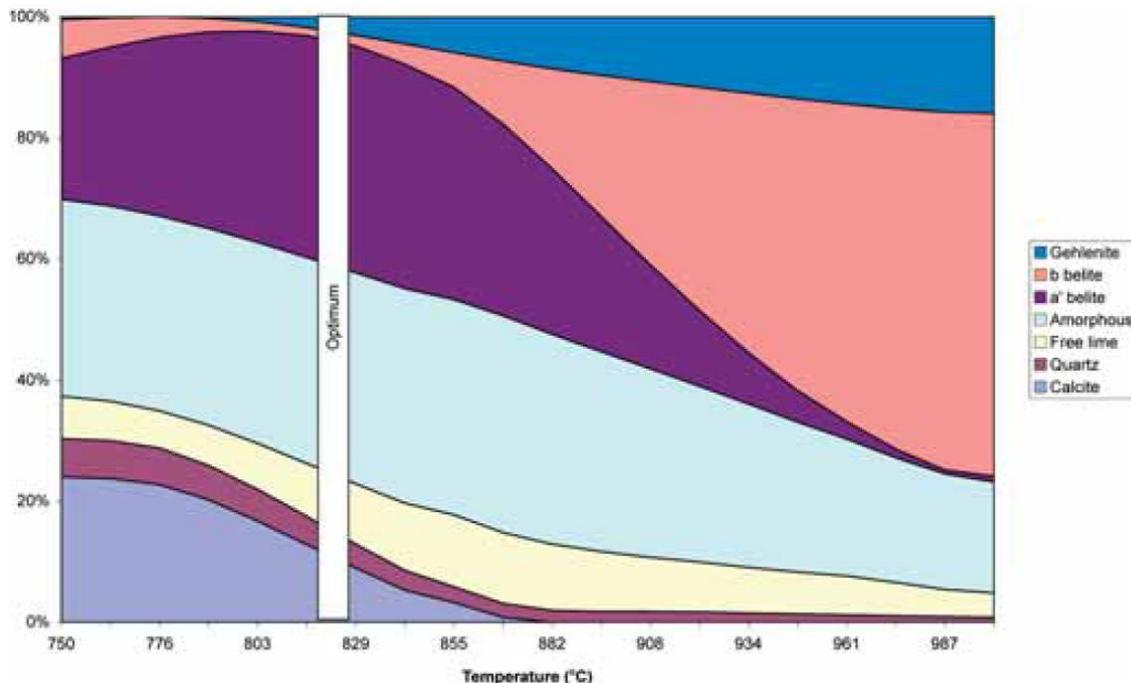


Abb. 1: Zusammensetzung von Romanzementen bei Veränderung der Brenntemperatur [1]

Die für Romanzemente charakteristischen hydraulisch aktiven Bestandteile sind der aktivierte Ton und Calciumhydroxid, beide zusammen werden als Bindemittel bezeichnet. Typische Wasser-Bindemittelverhältnisse liegen im Bereich von 0,65 – 1,0 [4]. Die Hydratation ist ein zweistufiger Prozess.

Phase 1:

Romanzemente erstarren innerhalb weniger Minuten nach Reaktionsbeginn und erhärten nach dem Anmischen mit Wasser. Die Entwicklung der Frühfestigkeiten erfolgt innerhalb der ersten 1 – 4 Stunden. Diese sind durch die Bildung von Calcium-Aluminat-Hydraten (CAH) bedingt.

Phase 2:

Die weitere Festigkeitsentwicklung erfolgt aufgrund der Hydratation von Dicalciumsilikat sowie der vermutlich puzzolanen Reaktionen der dehydroxylierten Tone mit Kalkhydrat unter Bildung von Calciumsilikathydraten (CSH). Das Mikrogefüge zeigt ein dichtes System von CSH Phasen, das mit einem Ca/Si Verhältnis von 1,2 bis 1,4 vorliegt.

3. Herstellung von Probekörpern

3.1 Verwendete Materialien

Für die Untersuchungen stellte die Wienerberger AG folgende Tone und Schleifstäube zur Verfügung:

Tone:

Göllersdorf

Haiding

Fürstenfeld

Schleifstäube:

Hennersdorf

Apfelberg

Jezernice (optional)

Außerdem wurden Hartformgips und Branntkalk bzw. gelöschter Kalk aus Wülfrath eingesetzt. Sowohl bei Gips als auch Kalk ist ausschließlich die chemische Zusammensetzung der Hauptkomponente maßgeblich.

Für die nachfolgenden Untersuchungen werden die Rohstoffe so eingesetzt, wie sie im Anlieferungszustand vorliegen. Ausgenommen davon ist der eingesetzte Schleifstaub, der auf kleiner 2 mm gesiebt wurde. Sowohl die Tone als auch die Schleifstäube unterscheiden sich in der mineralogischen Zusammensetzung und in der Korngrößenverteilung. Die Mischungszusammensetzungen erfolgen in den jeweils angegebenen Masseverhältnissen. Zunächst wird der Anmachwassergehalt (Wasserbeladung) der Mischungen so eingestellt, dass die Massesteife einer Reststauchhöhe von 20 mm nach Pfefferkorn entspricht.

3.2 Formgebung

Die maschinelle Formgebung der vorbereiteten Massen erfolgt mit einer Labor-Schneckenpresse mit 90 % Vakuum. Es werden Prüfziegel mit den Abmessungen 70 x 40 x 80 mm³ (Lochanteil von 11 % bzw. 40 %) und Achterlinge mit den in Abb. 2 dargestellten Abmessungen und 12 mm Dicke hergestellt.

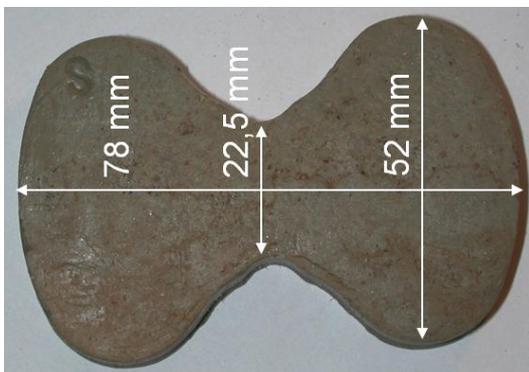


Abb. 2: Achterling

3.3 Mischungen

Die Tabelle 1 gibt die im Projekt durchgeführten Mischungszusammensetzungen in Gramm wieder. Alle drei verwendeten Tone wurden ohne LCW verpresst, damit dessen Einfluss bei späterer Zugabe deutlich wird.

Dem Göllersdorfer Ton wurde LCW in unterschiedlichen Masseanteilen zugegeben. Auf Basis der geeignetsten Mischung wurde die LCW-Zusammensetzung aus wirtschaftlichen und arbeitsschutzrechtlichen Gründen angepasst. So wurde Branntkalk durch Kalkhydrat ersetzt und aktivierter Ton durch Schleifstaub. Außerdem wurde untersucht, ob die Gipszugabe notwendig ist.

Die Übertragbarkeit der Mischungen mit Göllersdorfer Ton (G) auf andere Tone wurde mit den Tönen Haiding (H) und Fürstenfeld (F) durchgeführt.

Tabelle 1: Mischungszusammensetzung in Gramm

	Eigenton	aktiv. Ton 750 °C	Schleifstaub Hd 930 °C	Schleifstaub Ab 1000 °C	Brannt- kalk	Kalk- hydrat	Gips	Wasser
G	20000	0	0	0	0	0	0	3700
G0	10000	2000	0	0	1000	0	400	4530
G1	10000	1000	0	0	500	0	200	4550
G2	10000	1500	0	0	750	0	300	5025
G3	10000	2000	0	0	1000	0	0	5530
G4	10000	1500	0	0	0	750	300	4200
G5	10000	1500	0	0	0	500	300	4300
G6	10000	0	1500	0	0	750	300	4300
G7	10000	0	0	1500	0	750	300	4300
H	20000	0	0	0	0	0	0	3840
H1	10000	0	1500	0	0	750	300	4300
H2	10000	0	1500	0	0	750	300	4900
H3	10000	0	0	1500	0	750	300	4400
H4	10000	1500	0	0	0	750	300	4600
F	20000	0	0	0	0	0	0	3910
F1	10000	0	1500	0	0	750	300	4340
F2	10000	1500	0	0	0	750	300	4400
F3	10000	0	0	1500	0	750	300	4400

4. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

4.1 Festigkeiten und lineare Trockenschwindigkeit bei wechselnder Luftfeuchte

4.1.1 Vorgehensweise

Die hergestellten Prüfkörper werden auf Drahtnetzen zunächst 7 Tage bei Raumluft (durchschnittlich 20 °C und 65 % relative Luftfeuchte) und anschließend im Trocken-

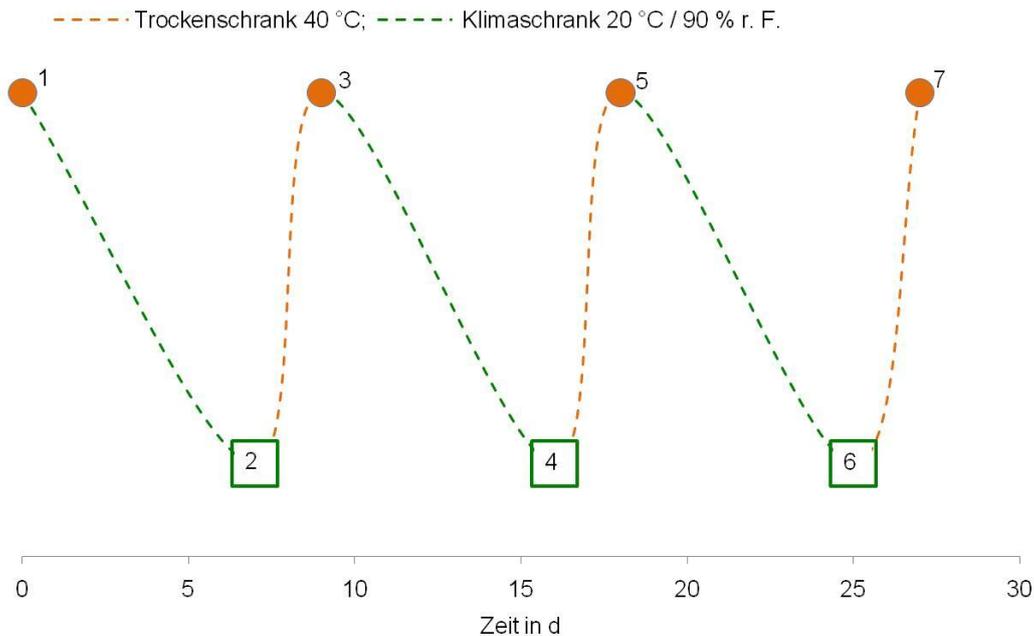


Abb. 3: Klimaschema: Trocknung bei 40 °C und 20 % relativer Feuchte und im Wechsel dazu Lagerung bei 20 °C und 90 % relativer Feuchte

schrank oder in einer Klimakammer getrocknet.

Die Probekörper werden den in Abb. 3 gezeigten klimatischen Bedingungen unterzogen. Die bei 40 °C getrockneten Probekörper adsorbieren in feuchter Umgebung durch Kapillarkondensation Wasserdampf in den kleinen Poren. Bei 20 °C und 90 % relativer Luftfeuchte werden Poren mit einem Radius von 10 nm gefüllt. In diesen herrscht dann 15 MPa Unterdruck [5]. Die Wasseranlagerung steigt im Inneren. Diese Zusammenhänge werden durch die Kelvingleichung beschrieben. Das aufgenommene Wasser wird durch die anschließende Trocknung wieder abgegeben. Die Be- und Entfeuchtung wird mehrfach durchgeführt, um mögliche Strukturveränderungen festzustellen. Zusätzlich wurde ein Teil der Proben bei 105 °C getrocknet.

Nach Trocknung bei 105 °C werden die Anmachwassergehalte (Wasserbeladungen) durch Wiegen und die Trockenschwindungen (Schwindmarken) bestimmt. Die Bestimmung der Zugfestigkeit wird in Anlehnung an die zurückgezogene Lehnorm DIN 18952 (siehe Abb. 4) geprüft.

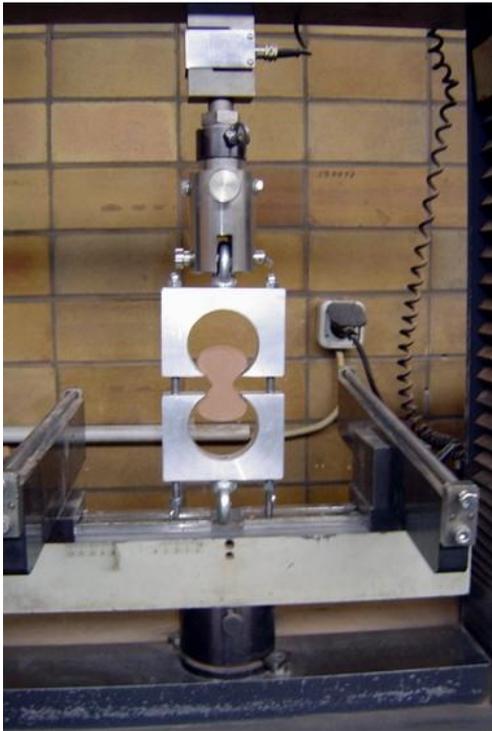


Abb. 5: Versuchseinrichtung Zugprüfung



Abb. 4: Rohling mit Schwindmarken

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt in Strangrichtung der Prüfziegel. Hierfür werden die Druckflächen planparallel geschliffen. In den nachfolgenden Diagrammen sind Mittelwerte aus sechs Einzelmessungen dargestellt und zwar nach den Zyklen 1,2 und 4 sowie ganz links nach 105 °C Trocknung. Für die Prüfung der Druckfestigkeiten wurden die Hochlochziegel mit 11 % Lochanteil verwendet. Der Einfluss höherer Pressung wurde bei der Mischung H4 durch zusätzliches Abdrücken von Hochlochziegeln mit 40 % Lochanteil untersucht. Alle wesentlichen Ergebnisse sind im Anhang in Tabellenform zusammengestellt.

Im Hinblick auf unvermeidbare Messwertstreuungen werden je Massemischung sechs Proben geprüft. Schwindungen werden in Strangrichtung und quer dazu über Schwindungsmarken bestimmt. Die lineare Trockenschwindung wird auf der in Abb. 5 dargestellten Messuhr abgelesen (dort ist jedoch die Gesamtschwindung über Kreuz dargestellt).

Die Wasserresistenz wird durch Unterwasserlagerung ermittelt. Dazu werden die Probekörper in ein Becherglas gelegt und mehrere Stunden von Wasser umspült. Anschließend werden die Körper haptisch und optisch beurteilt.

4.1.2 LCW-Zugabemenge und Zusammensetzung anhand Ton Göllersdorf

Der LCW-Zusatz wird hinsichtlich der Zusammensetzung und Zugabemenge zur Tonmatrix optimiert.

Ausgehend von der Rezeptur (G0) wurden Massen verpresst, die nur $\frac{1}{2}$ (G1) bzw. $\frac{3}{4}$ (G2) der Ausgangsmenge LCW enthalten. Mit steigender Zugabemenge steigt der Wasserbedarf an, der notwendig ist, die Masse mit einem Pfefferkornwert von 20 zu extrudieren. Desweiteren wurde eine Mischung ohne Gips (G3) hergestellt, wodurch der Wasserbedarf deutlich erhöht wird. Alle Mischungszusammensetzungen können der Tabelle 1 entnommen werden.

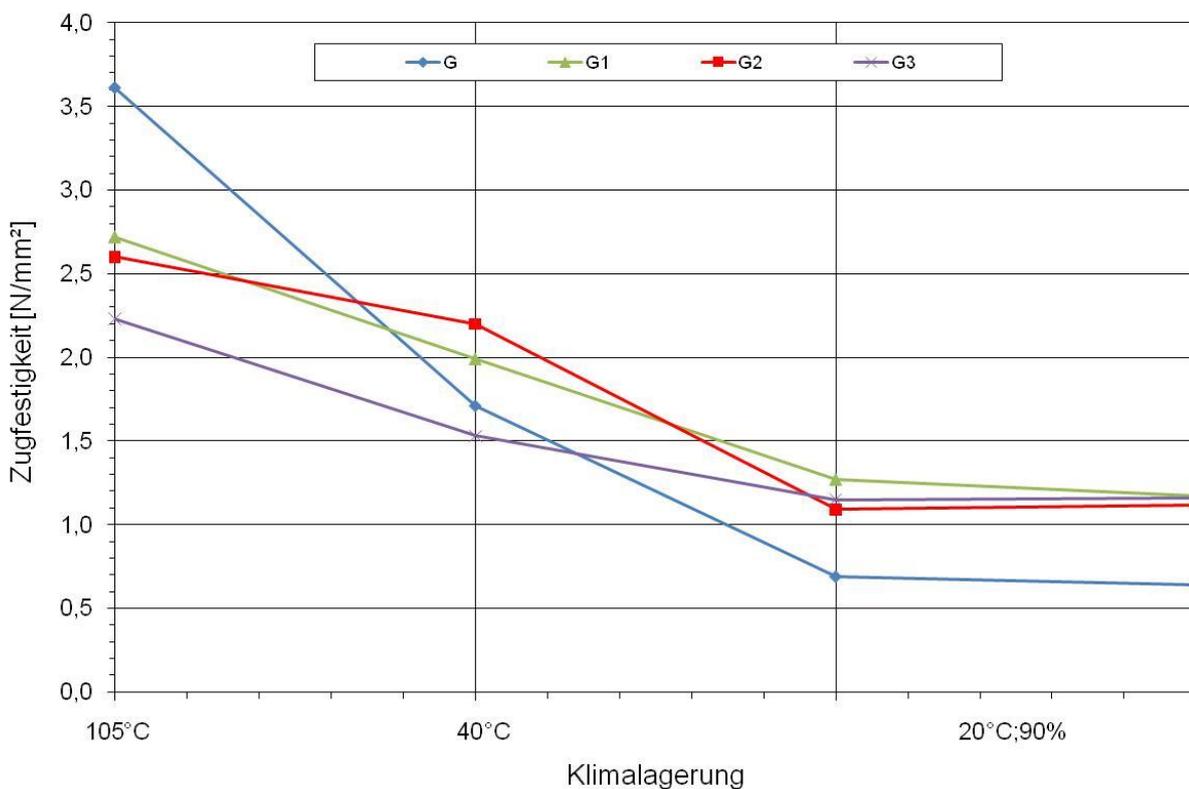


Abb. 6: Zugfestigkeit bei unterschiedlicher klimatischer Belastung

Die Untersuchungen zeigen, dass die Trockenrohichte durch die LCW-Zugabe von 1900 kg/m^3 auf 1600 kg/m^3 abfällt. Durch die höhere Anmachwasserbeladung der Mischung G3 ist die Dichte noch einmal 50 kg/m^3 geringer als die der Mischungen G1 und G2.

Abb. 6 zeigt die Zugfestigkeit nach 105°C (im Anschluss an Lagerung bei Raumluft) links. Die Trocknung bei 105°C ist für Lehmziegel hinsichtlich der Produkteigenschaften nicht notwendig, außerdem steigt der Trocknungsenergiebedarf. Die Prüfwerte dienen als Vergleichsgröße zu den Trockenfestigkeiten von Ziegelrohlingen. Die Zugfestigkeit der unmodifizierten Masse liegt nach Trocknung bei 105°C ungefähr 1 N/mm^2 über denen der mit LCW Modifizierten. Gips im LCW-Zusatz beschleunigt den Abbindeprozess, dadurch sind die Massen früher wasserbeständig. Nach 40°C (Zyklus 1 der Abb. 3) Trocknung haben die Körper eine Restwasserbeladung von 1 bis 6 M.-% (auf 105°C bezogen). Zugfestigkeiten von Ziegelrohlingen und Lehen sind wassergehaltsabhängig, daher sind die Festigkeiten nach 40°C Trocknung etwas geringer. Besonders stark ist der Festigkeitsabfall der unmodifizierten Nullmischung. Rechts im Diagramm sind die Festigkeiten nach ein- bzw. zweifacher Klimaschranklagerung (Zyklen 2 und 4 der Abb. 3) dargestellt. Die Zugfestigkeiten der Mischungen G1 bis G3 bleiben trotz mehrfach wechselnder klimatischer Bedingungen bei etwa $1,1 \text{ N/mm}^2$ konstant.

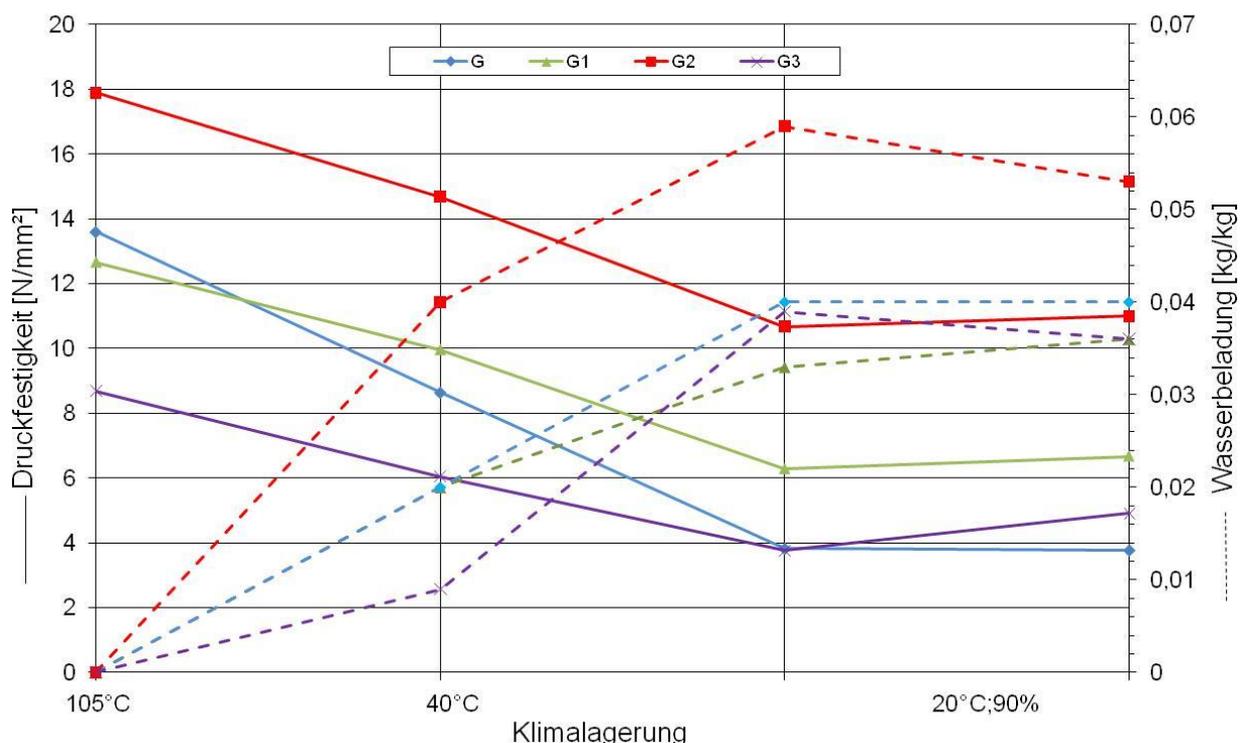


Abb. 7: Druckfestigkeit und Wasserbeladung

Abb. 7 zeigt, dass die Druckfestigkeit weniger feuchteabhängig ist als die Zugfestigkeit mit Ausnahme der unmodifizierten Masse. Die Druckfestigkeit der Mischung oh-

ne Gips ist vergleichsweise gering. Da auch die Zugfestigkeit gering ist, lässt sich vermuten, dass Gips in die CSH-Phasen eingebunden ist und festere Produkte bildet. Ferner ist ersichtlich, dass die Masse G2 nicht nur die höchsten Druckfestigkeiten aufweist, sondern auch hohe Wasserbeladungen. Diese ist eine durch Kapillarkondensation bedingte Sorptionsfeuchte. Nach der zweiten Klimalagerung ist der Wassergehalt durch die Einbindung in die Calciumsilikathydrate geringer. Gleiches gilt für die Masse G3.

Die Schwindungen quer zur Strangrichtung aller Mischungen liegen zwischen 4 und 5 %. Bei den Mischungen G1 und G2 schwankt die Schwindung nur in einem kleinen Rahmen, während die Nullmischung bei hohen relativen Feuchten deutlich quillt. Die lineare Trockenschwindung längs ist bis auf die Mischung G3 stärker als quer zur Strangrichtung. Längs- und Querschwindung der Masse G2 liegen am dichtesten zusammen (Abb. 8).

Insgesamt bringt die Mischung mit der $\frac{3}{4}$ - Zugabemenge LCW (G2) die besten Ergebnisse. In den folgenden Untersuchungen wurde darauf aufgebaut.

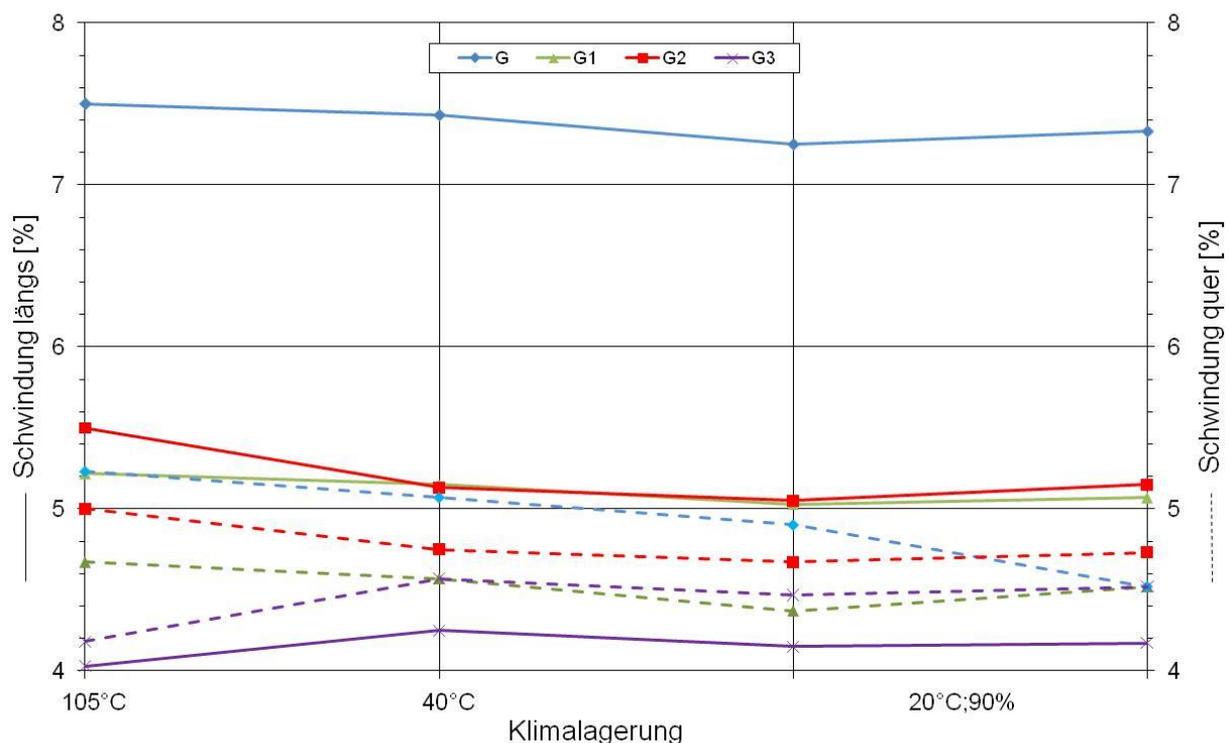


Abb. 8: Schwindung längs und quer zur Strangrichtung

4.1.2 LCW-Zusammensetzung -Ersatz von Branntkalk und aktiviertem Ton

Aus Sicherheitsgründen wurde versucht, Branntkalk (G2) durch gelöschten Kalk (ohne Wasserüberschuss) zu ersetzen. Die Mischung ist mit G4 bezeichnet. Mischung G5 weist im Vergleich zu G4 einen geringeren Kalkhydratanteil auf.

Außerdem wurde der aktivierte Ton durch das (Recycling-)Produkt Schleifstaub unterschiedlicher mineralischer Zusammensetzung und Brenntemperatur ausgetauscht. Wie bereits erwähnt, werden zwei Schleifstäube eingesetzt. Die Hochlochziegel in Hennersdorf werden bei 930 °C gebrannt und anschließend plangeschliffen. Dieser Schleifstaub wurde für die Mischung G6 verwendet. Der Schleifstaub Apfelberg ist aufgrund höherer Brenntemperaturen (1000 °C) weniger reaktiv. Dieser zeichnet sich außerdem durch einen sehr geringen Kalkgehalt aus. Apfelberger Schleifstaub wurde für die Mischung G7 eingesetzt.

Gelöschter Kalk (Kalkhydrat) wurde anstelle von Branntkalk in Mischung G4 eingesetzt. Der Wasserbedarf für eine Massesteife nach Pfefferkorn von 20 ist im Vergleich zu G2 deutlich geringer. Durch den geringeren Porenanteil ist auch die Zugfestigkeit nach trockener Lagerung (40 °C bzw. 105 °C) höher und damit auch der Zusammenhalt der Masse. Dies widerspricht den sich aufgrund des Pressvorganges ergebenden Vermutungen, da durch Kalkhydrat die Bindigkeit weiter vermindert wird.

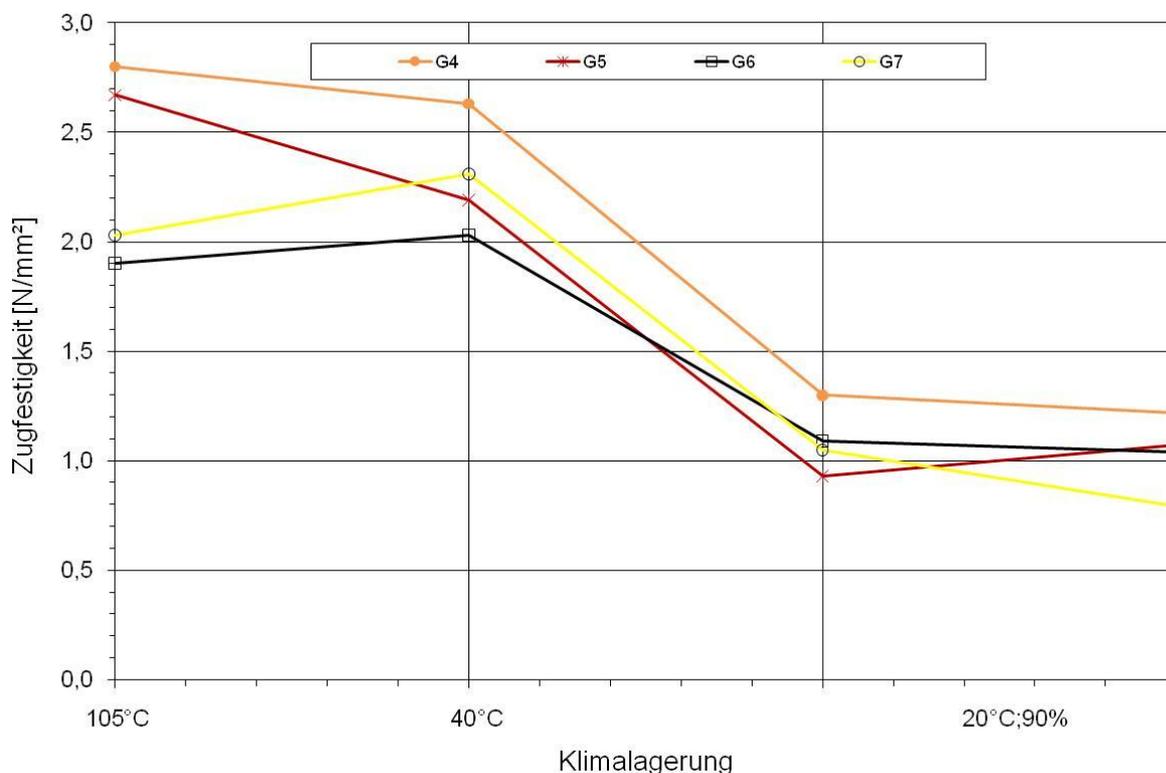


Abb. 9: Zugfestigkeiten bei unterschiedlicher Klimabeaufschlagung

Die Senkung des Kalkhydratanteils in Mischung G5 führt zu einem etwas verminderen Zusammenhalt der Masse gegenüber G4. Beide Mischungen mit Schleifstaub haben nach Trocknung bei 105 °C geringere Festigkeiten als nach 40 °C. Der bei geringen relativen Feuchten besser geeignete Apfelberger Schleifstaub (G7) hat ähnlich wie der unmodifizierte Lehm bei 20 °C und 90 % relativer Feuchte einen deutlichen Festigkeitsverlust. Währenddessen bleibt die Festigkeit der Mischung G6 konstant, dort wird ausreichend LCW gebildet.

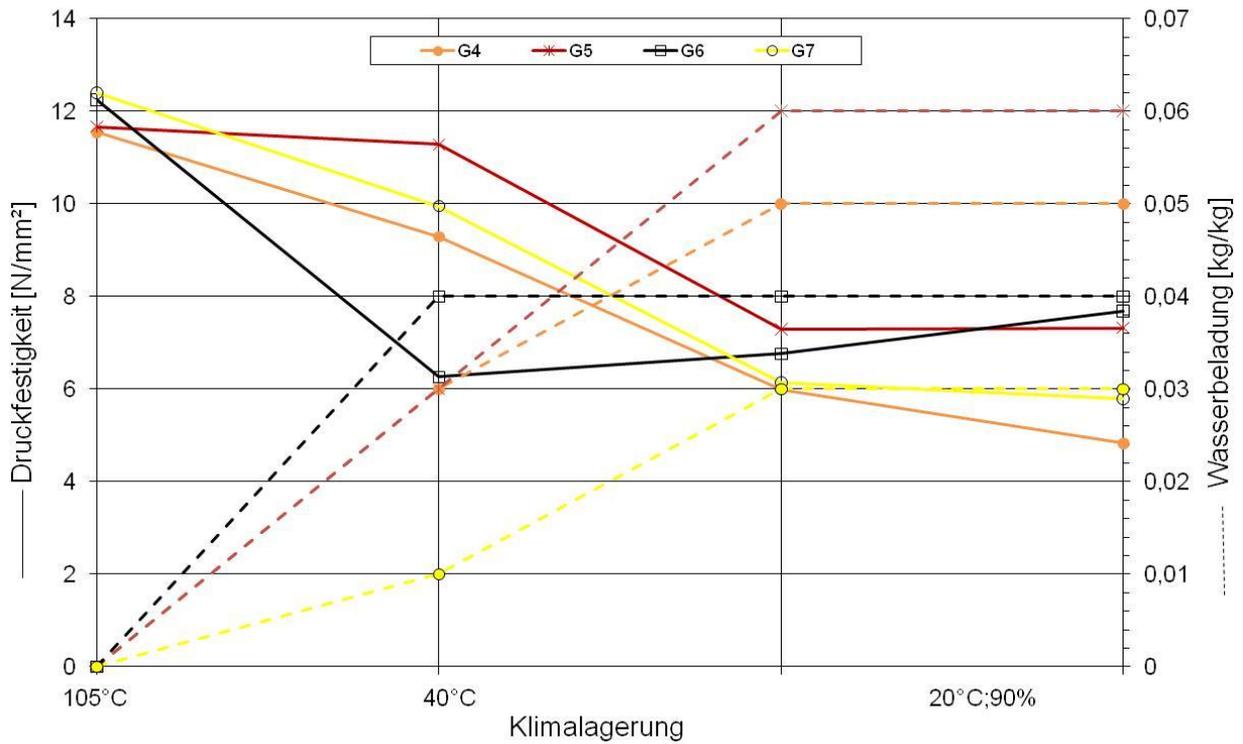


Abb. 10: Druckfestigkeit und Wasserbeladung bei entsprechender Klimabelastung

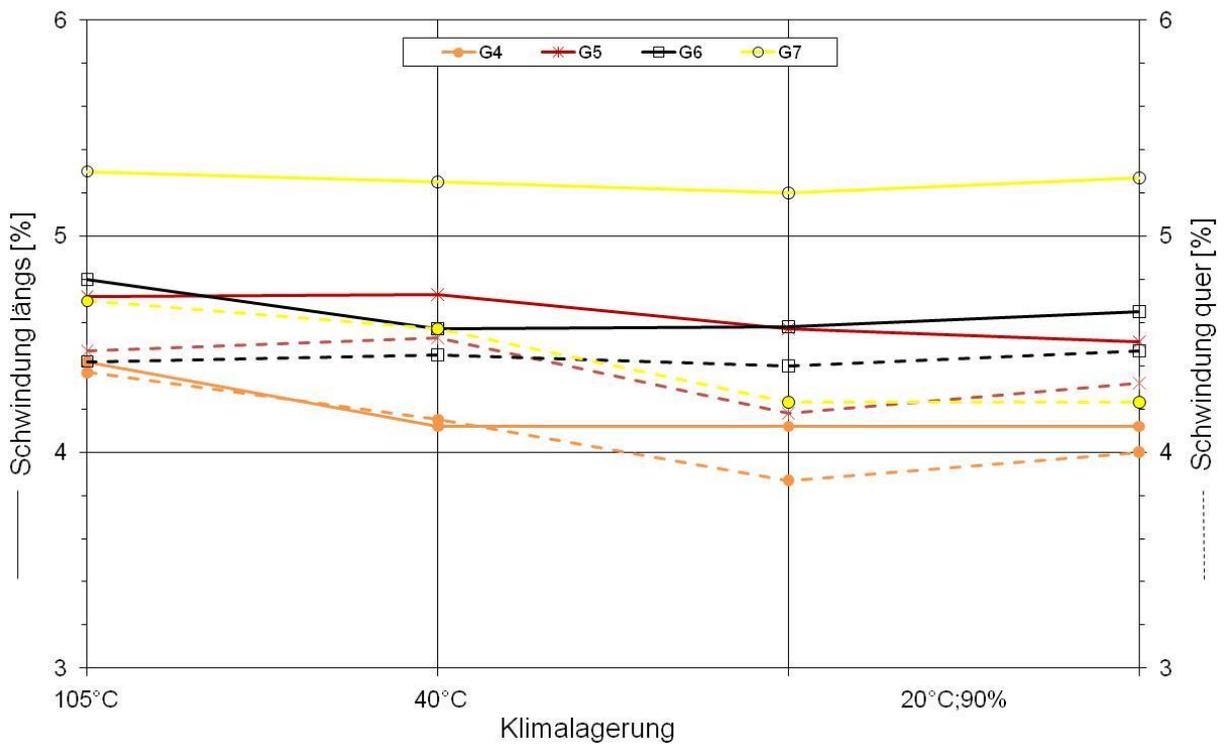


Abb. 11: Schwindungen längs und quer zur Strangrichtung

In Abb. 10 sind die Druckfestigkeiten zu den Mischungen dargestellt. Die Druckfestigkeiten fallen von 12 N/mm² auf 6-7 N/mm², jedoch mit Ausnahme der Mischung G4. Dort fällt die Festigkeit bei mehrfacher Klimalagerung bei 20 °C und 90 % relativer Feuchte. Die Wasserlagerung der Probe G4 führte jedoch nicht zu Auflöserscheinungen. Die Wasserreadsorptionen der Mischungen unterscheiden sich deutlich. Die Probe G7 nimmt nur 3 M.-% auf. Das ist ungefähr ein Masseprozent weniger als beim unmodifizierten Lehm. Die Wasserbeladungen nach Klimaschranklagerung sind bei den Mischungen G4 und G2 annähernd gleich groß.

Auch bei den Kalkhydratmischungen liegen die Schwindungen längs und quer zur Strangrichtung zwischen 4 und 6 %, wobei die linearen Längsschwindungen etwas stärker sind.

Prinzipiell können Schleifstäube anstelle von aktiviertem Ton verwendet werden. Wie jedoch der Apfelberger Ton zeigt, sollte die Brenntemperatur nicht zu hoch sein, da sonst der reaktive Anteil so klein ist, dass die Zugabemenge erhöht werden muss, um konstante Zugfestigkeiten bei hohen relativen Feuchten sicherzustellen.

4.1.3 Festigkeiten und Schwindungen Ton Haiding

Zunächst wurde dem Haidinger Ton LCW zugesetzt. Die einzelnen Mischungen können der Tabelle 1 entnommen werden. Mit dem Haidinger Ton wurde eine Nullmischung (H) für Vergleichszwecke verpresst. In Anlehnung an Mischung G4 wurde H4 (mit aktiviertem Ton) gemischt. Durch Austausch des aktivierten Tons durch die Schleifstäube entstehen die Mischungen H1 (Hennersdorfer Schleifstaub) und H3 (Apfelberger Schleifstaub). Die Wassergehalte ergeben sich wieder aus dem Pfefferkornwert. Mischung H2 entspricht der Mischung H1, jedoch wurde hier mit einem deutlich höheren Wassergehalt gearbeitet, wodurch der Pfefferkornwert nur noch 17 beträgt. Auch diese Masse lässt sich ohne „Elefantenfüße“ extrudieren. Ziel ist, den Porenraum für die CSH-Phasenbildung zu erhöhen, so dass der Rohling spannungsfrei bleibt.

Ein um 5 % geringerer Wassergehalt wirkt sich nicht negativ auf den Abbindevorgang aus. Man kann von Gleichgewichtsfeuchten von mindestens 2 M.-% des Wassers in der tonigen Masse ausgehen, das nicht nur in engen Poren und Zwickeln vorhanden ist sondern als Wasserhülle alle mineralischen Oberflächen bedeckt. Somit steht Wasser für Reaktionsabläufe anfangs ohnehin sehr reichlich und später in sich durch Kapillarkondensation beständig regenerierender Menge zur Verfügung steht. Durch den geringeren Wassergehalt wird die Rohdichte der Lehmsteine zu nehmen.

Die Zugfestigkeit des Tons Haiding ist im Vergleich zum Göllerdorfer Ton um 1,5 N/mm² niedriger. Ursache dafür sind gröbere Korngrößenverteilung und damit die größeren Porenabmessungen. Durch die Zugabe des Apfelberger Schleifstaubs wird die Zugfestigkeit bei trockenen Atmosphären erhöht, jedoch kommt es zur Mikroriss-

bildung nach mehrfacher Klimaschranklagerung. Der erhöhte Porenanteil bei Mischung H2 bringt einen Festigkeitsabfall bei 20 °C und 90 % relativer Feuchte mit sich (Abb. 12). Die Zugfestigkeiten der beiden anderen Mischungen liegen über 1 N/mm². Bedingt durch die niedrigen Zugfestigkeiten bei 40 bzw. 105 °C ist der Festigkeitsverlust durch Wasserreabsorption beim Haidinger Ton vergleichsweise gering. Alle Modifikationen zeigen einen Festigkeitsabfall bei Klimaschranklagerung, der unterschiedlich stark ausgeprägt ist. In allen Fällen ist die Wasserunempfindlichkeit des Lehmsteins gegeben.

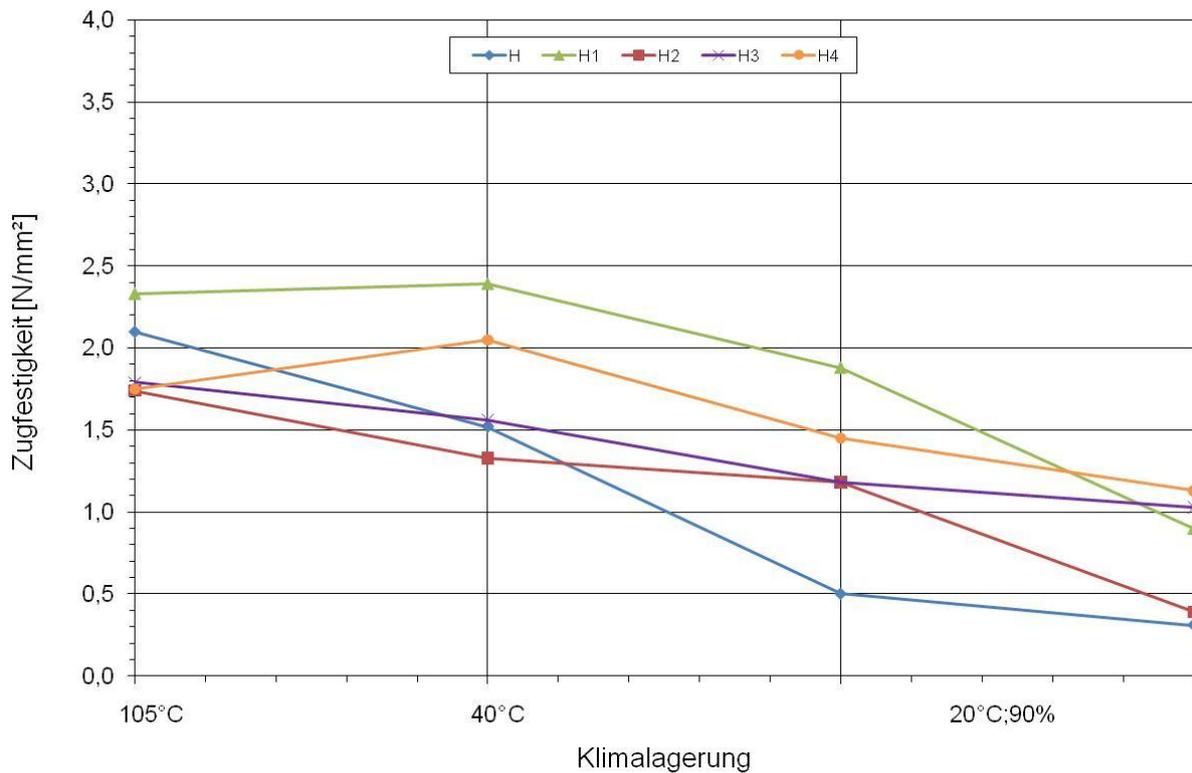


Abb. 12: Zugfestigkeit bei entsprechendem Klima für Ton Haiding mit Modifikationen

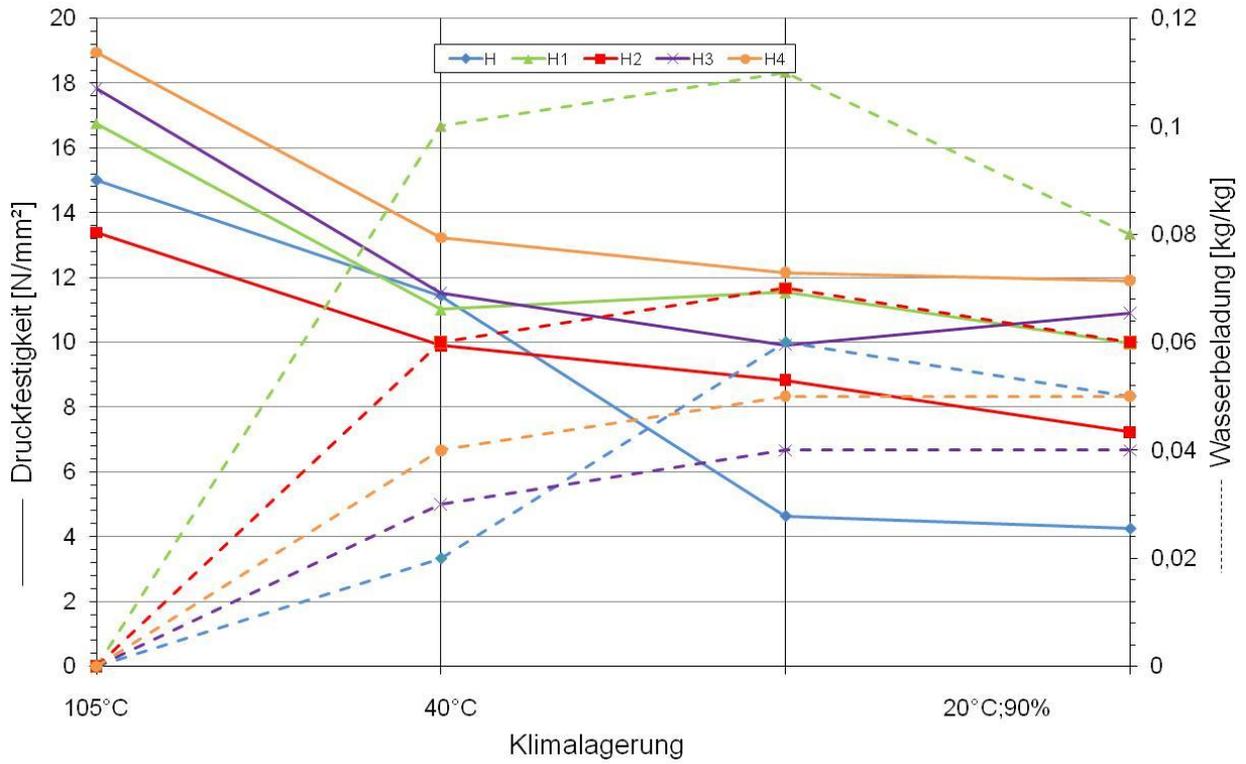


Abb. 13: Druckfestigkeiten und Wasserbeladung

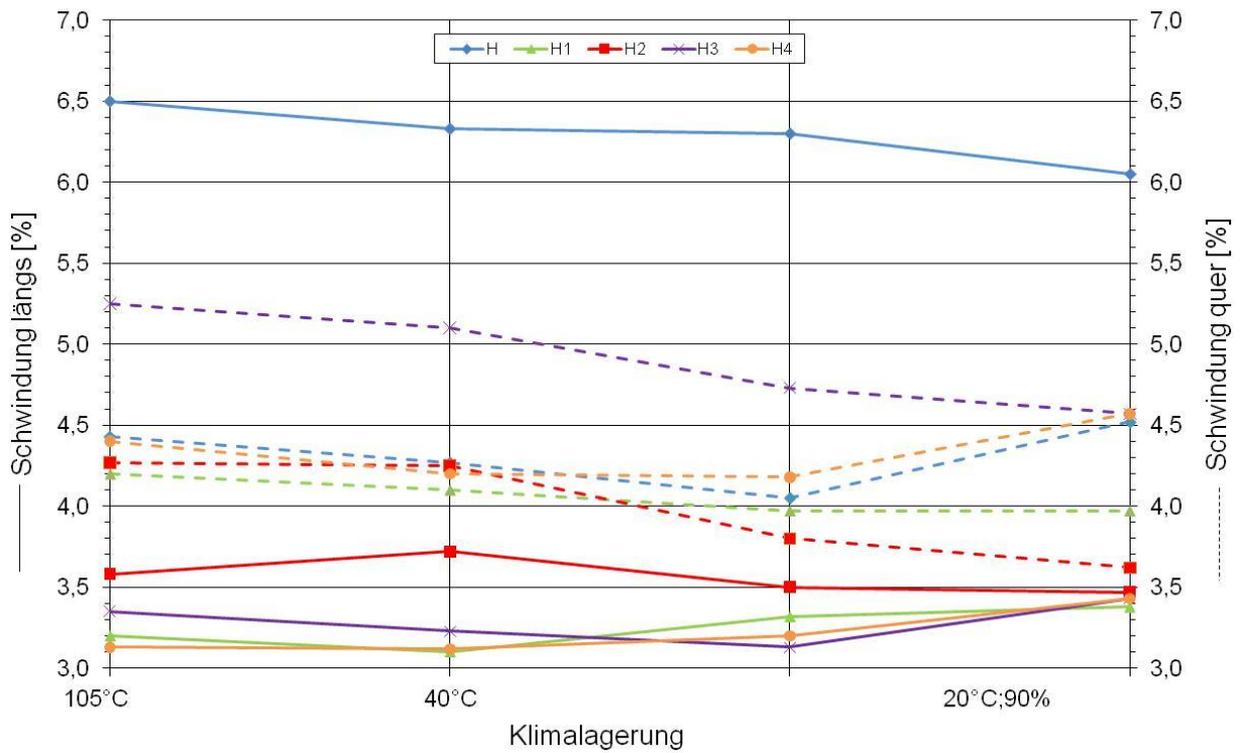


Abb. 14: Schwindungen

Alle Versätze mit Haidinger Ton weisen hohe Druckfestigkeiten auf. Die Festigkeit der Masse H4 hat die höchsten Festigkeiten. Der Apfelberger Schleifstaub im LCW wirkt sich fast genauso gut aus. H1 mit Hennersdorfer Schleifstaub hat wie bei der Zugfestigkeit auch einen Einbruch der Druckfestigkeit. Auffällig ist bei dieser Mischung auch die hohe Wasserbeladung nach Sorption, die aufgrund der Mikrorissbildung scheinbar sinkt.

Im Fall vom Haidinger Ton ist die lineare Schwindung längs zur Strangrichtung geringer als quer dazu. Durch den LCW-Zusatz kann die Längsschwindung um 3 % reduziert werden. Die Probekörper werden bei mehrfacher Klimalagerung leicht in Längsrichtung größer.

4.1.4 Festigkeiten und Schwindungen Ton Fürstenfeld

Die drei LCW-Kombinationen wurden auch dem Fürstenfelder Ton zugegeben.

F1: Hennersdorfer Schleifstaub

F2: aktivierter Ton

F3: Apfelberger Schleifstaub

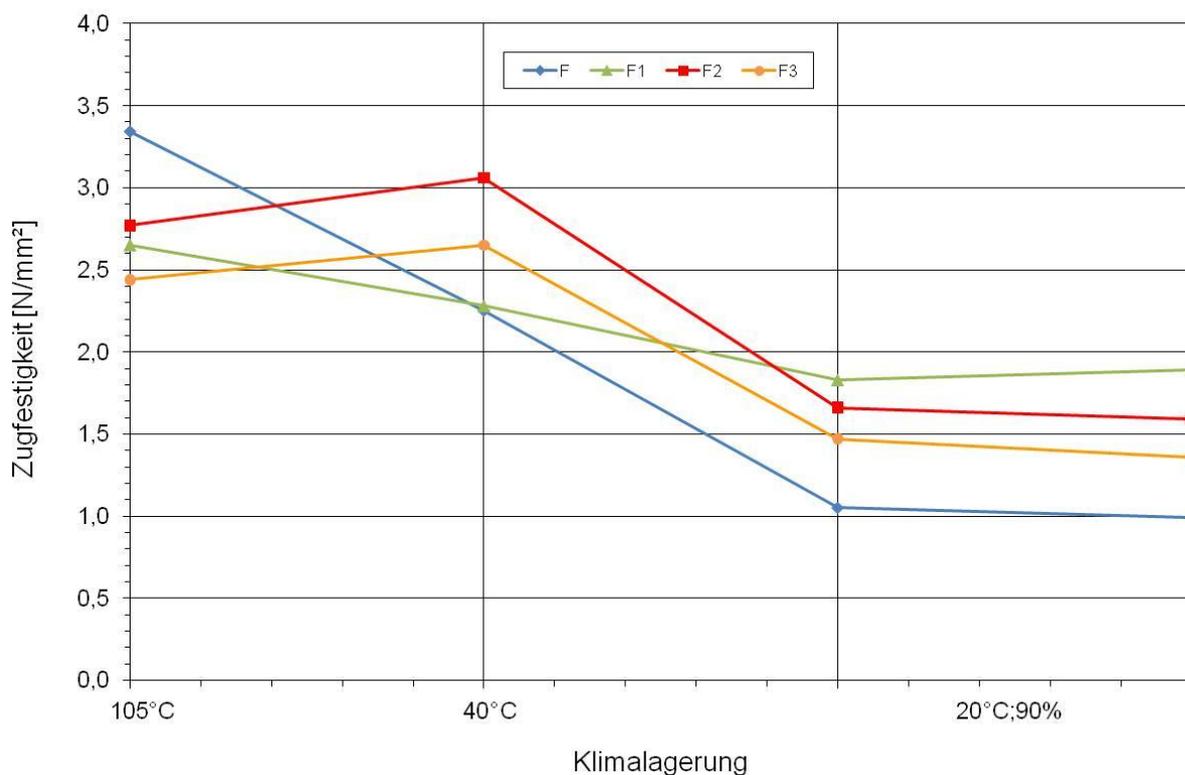


Abb. 15: Zugfestigkeiten

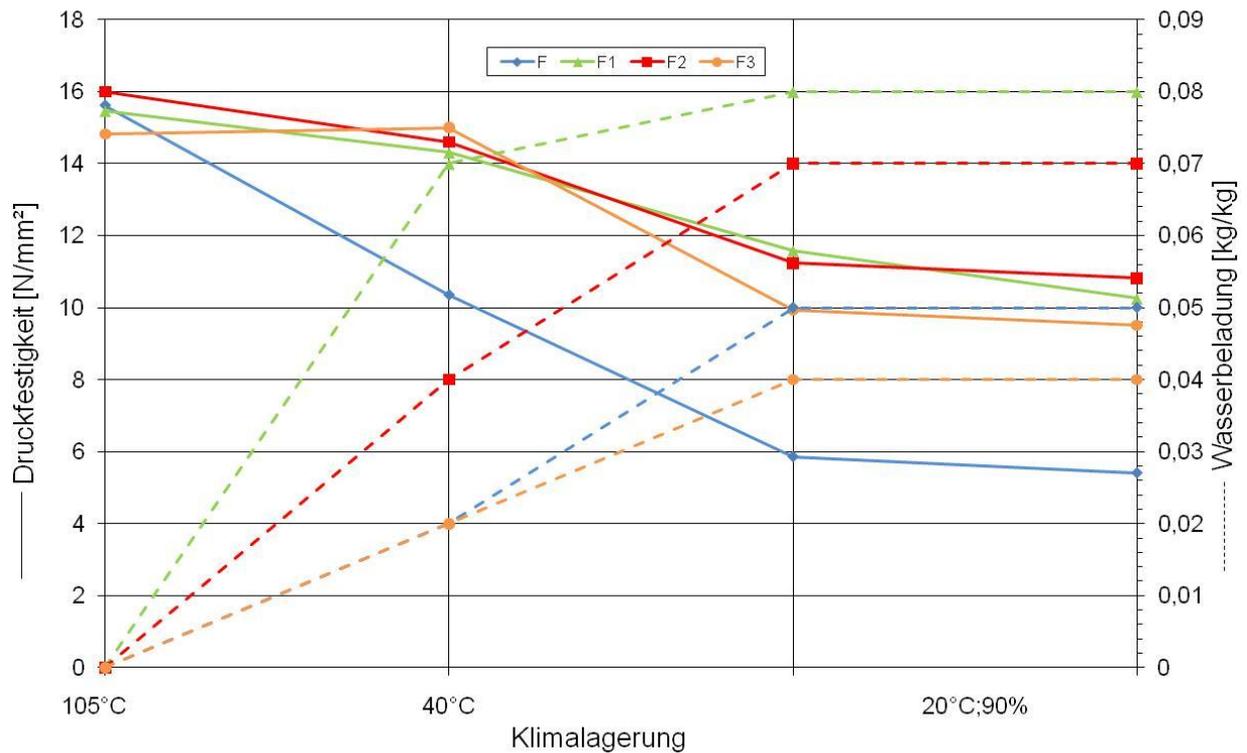


Abb. 16: Druckfestigkeiten und Wasserbeladungen

Die Zugfestigkeiten der Mischungen F2 und F3 sind bei 40 °C Lagerung höher als bei 105 °C. Nach Klimaschranklagerung weisen diese noch Zugfestigkeiten um 1,5 N/mm² auf. Der Abfall von 0,1 N/mm² liegt in der Größenordnung der Standardabweichung und hat nichts mit einer Verschlechterung der Ergebnisse zu tun. Selbst der unmodifizierte Fürstfelder Ton zeigt keinen Festigkeitsverlust bei mehrfacher Klimalagerung, jedoch heben alle drei LCW-Variationen die Zugfestigkeit an. Bei hohen Feuchten scheidet die Variation mit Hennersdorfer Schleifstaub am besten ab. Durch den LCW-Zusatz sinkt die Festigkeit nicht von 16N/mm² auf 5 sondern ungefähr nur auf 10 N/mm². Die CSH-Phasenbildung bildet also ein zweites Feststoffgerüst. Für LCW mit Hennersdorfer Schleifstaub verliert die Masse bei hohen Feuchten auf Dauer etwas an Festigkeit.

Die Wasserreadsorption (Abb. 16) wird durch den LCW-Zusatz auf Basis von Apfelfberger Schleifstaub verringert, mit den anderen Zusätzen (Hennersdorfer Schleifstaub und aktivierter Ton) jedoch erhöht. Mehrfache Klimalagerung verändert die Wasserreadsorption nicht.

Sowohl Längs- als auch Querschwindung der unmodifizierten Masse liegen über denen der anderen Tone. Quer zur Strangrichtung quillt der Fürstfelder Ton bei hohen Feuchten. Die linearen Trockenschwindungen liegen für die modifizierten Massen im Bereich zwischen 5 und 6 % und sind im Vergleich zu den anderen Tönen größer. Vorteilhaft ist, dass die Quer- und Längsschwindung gleich groß und feuchteunabhängig sind.

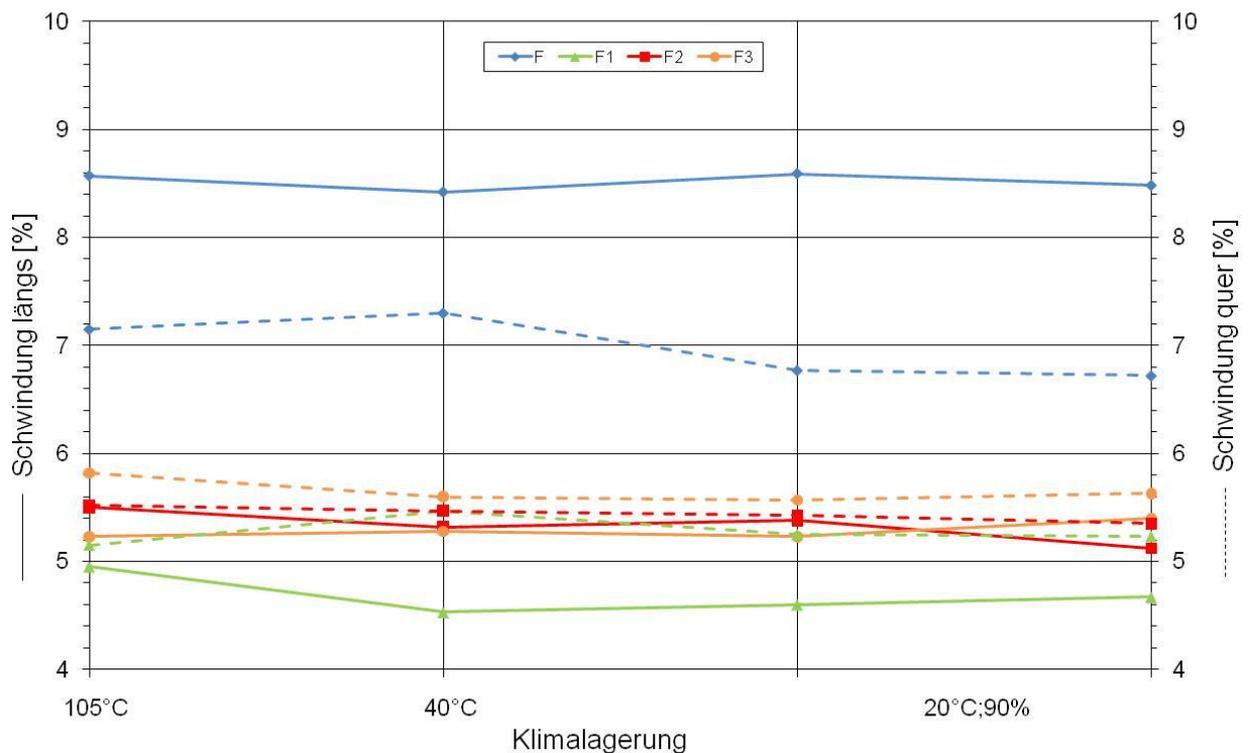


Abb. 17: Schwindungen Ton Fürstenfeld

4.2 Einfluss der absoluten Feuchte auf die Festigkeit

Anhand der Mischung H4 (Ton Haiding mit Kalkhydrat und aktiviertem Ton) wurde der Einfluss der absoluten Feuchte auf die Festigkeit untersucht. Bei jeweils 20 °C wurde die Gleichgewichtsfeuchte der Proben bei vier unterschiedlichen relativen Feuchten eingestellt. Wird bei steigenden relativen Luftfeuchten die Temperatur konstant gehalten, steigt definitionsgemäß auch die absolute Feuchte. Im Gleichgewichtszustand wurden die Druck- und Zugfestigkeit sowie lineare Trockenschwindungen längs und quer zur Strangrichtung ermittelt. Außerdem wurden die Wasserbeladungen im Gleichgewichtszustand berechnet. Abb. 21 stellt die Druck- und Zugfestigkeiten in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchte für die Mischung H4 (grüne Linien) und im Vergleich dazu die Nullmischung H (blaue Linien) dar. Die Druckfestigkeiten sind mit Dreiecken und die Zugfestigkeiten mit Vierecken markiert.

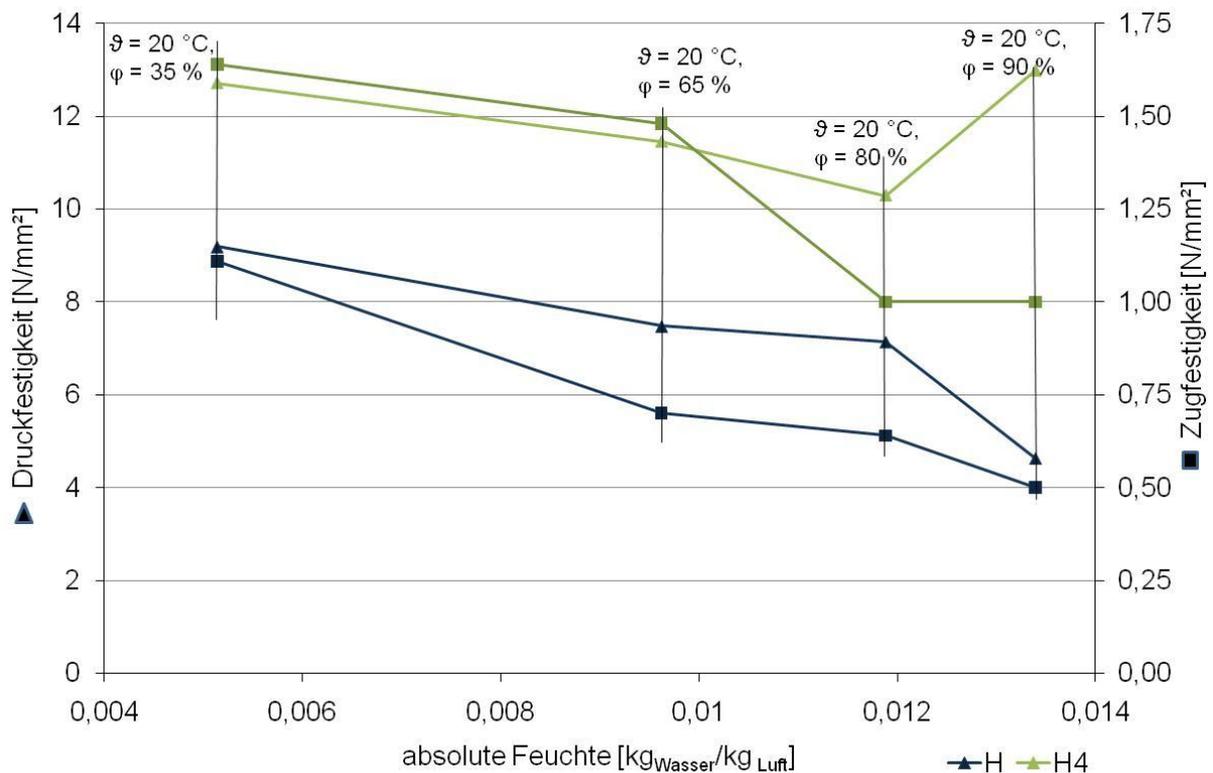


Abb. 18: Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Festigkeiten

Mit steigender absoluter Luftfeuchtigkeit nimmt die Wasserbeladung der Lehmkörper zu. Die Wasserbeladung steigt in den Lehmkörper der Mischung H4 (mit 40 % Lochanteil) auf 0,069 kg/kg. Die Sorptionsfeuchten der unmodifizierten Massen sind etwas geringer. Erwartungsgemäß fallen die Festigkeiten mit steigender Wasserbeladung. Die Druckfestigkeiten sind um den Faktor 6-10 höher als die Zugfestigkeiten. Das Diagramm zeigt außerdem, dass die Festigkeiten der Lehmkörper mit LCW höher sind. (Die Probekörper für die Messung bei 20 °C und 90 % relative Luftfeuchte wurden zum Schluss extrudiert. Dabei wurde teilweise Material mehrfach durch den Extruder geführt, wodurch die Masse leicht ansteift und stärker verdichtet wird. Bei einfacher Extrusion sind ungefähr 10 N/mm² Druckfestigkeit zu erwarten.)

4.3 Ritzhärte / Festigkeit nach Wasserlagerung

Zum qualitativen Vergleich der mechanischen Festigkeit der Oberflächen wurden die Lehmproben einem Ritztest unterzogen. Dabei wird eine Spitze mit definierter Normalbelastung in gleichmäßiger Geschwindigkeit über die Probenoberfläche gezogen. Die in der Bewegung auftretenden Druck-, Schub-, Zug- und Scherspannungen sind nicht quantifizierbar. Bei 0,25 mm² Auflastfläche an der Spitze ergibt sich für die Probe eine Druckspannung von 6,8 N/mm². Taucht die gesamte Spitze in die Probe ein, vermindert sich aufgrund der vergrößerten Auflagefläche (10,97 mm²) die Druck-

spannung auf 0,15 N/mm²). Die Festigkeitsunterschiede der Oberflächen können anhand der Tiefe und der Breite der gezogenen Furche verglichen werden.

Die Ritzhärte erbrachte keine deutliche Differenzierung für verschiedene relative Luftfeuchten. Im Vergleich mit einer Wasserlagerung ergaben sich aber sehr klare Unterschiede. Während die Spitze in die Proben nach Wasserlagerung tief in die Oberfläche eindringt und breite Gräben zieht, beobachtet man bei 65 % relativer Luftfeuchte nur leichte oberflächliche Kratzer. Abb. 19 zeigt beispielhaft drei mit LCW versetzte Proben. Jeweils links sind kaum sichtbare Furchen zu sehen (rote Markierung), diese entstehen bei der Ritzhärtebestimmung bei 20 % und 65 % relativer Luftfeuchte. Die Probekörper wurden anschließend eine Stunde unter Wasser gelagert und erneut die Ritzhärte bestimmt. Die deutlich tieferen Furchen sind rechts auf den Probekörpern zu sehen. Vergleicht man die Proben untereinander, so weist die Probe F2 die tiefsten und breitesten Furchen auf sowie die geringste Kantenbruchfestigkeit.

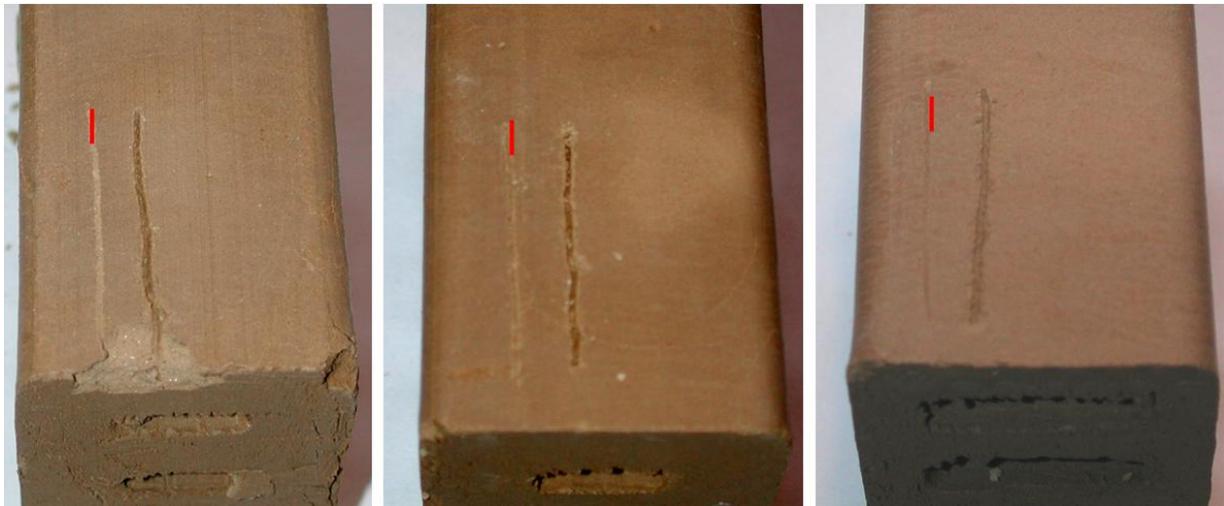


Abb. 19: links: F2; Mitte: G2; rechts: H4

Die höchste Ritzhärte und damit Kantenfestigkeit zeigt H4. Körper gleicher Zug- und Druckfestigkeiten können unterschiedliche Ritzhärten aufweisen. Es zeigt sich, dass die Proben mit geringen Furchen also hoher Härte die besten Langzeiteigenschaften aufweisen.

Unmittelbar nach einstündiger Wasserlagerung beträgt die Druckfestigkeit der Hochlochziegel der Mischung im Mittel 1,3 N/mm². Gegenüber dem trockenen Zustand bei 105 °C nimmt das Volumen des Körpers 1,5 % zu. Die kapillare Wasseraufnahme beträgt dabei 0,21 kg/kg atro. Dieses Wasser verdunstet bei Luftlagerung, bis sich die Gleichgewichtsfeuchte eingestellt hat. Das zur Gleichgewichtsfeuchte gehörende Festigkeitsniveau wird wieder erreicht (siehe 4.1).

4.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit erfolgt nach dem Heizdrahtverfahren (Kreuzstromanordnung) in Anlehnung an DIN 51046. Bei diesem instationären

Messverfahren wird der Temperaturanstieg einer im Probekörper befindlichen linienförmigen Wärmequelle in Form eines Heizdrahtes gemessen. Diesem Draht wird über die gesamte Messzeit eine konstante Leistung zugeführt. Das auf die Mitte des Heizdrahtes aufgeschweißte Thermoelement registriert den zeitlichen Temperaturanstieg, welcher ein Maß für den Wärmeleitkoeffizienten λ ist. Zuvor werden die Stegplatten planparallel geschliffen und zur Aufnahme des Heizdrahtes mit einer über die Mittenachsen angeordneten Einkerbung versehen.

	λ H [W/(m·K)]	λ H 4 [W/(m·K)]
40 °C	0,6264	0,6349
105 °C ($\lambda_{10, \text{tr}}$)	0,5135	0,4629

Die Wärmeleitfähigkeiten beider Massen sind nach 40 °C Trocknung annähernd gleich groß, jedoch ist die Wasserbeladung der mit LCW modifizierten Probe deutlich höher. Bei anderen Baustoffen werden die $\lambda_{10, \text{tr}}$ -Werte angegeben also nach 105 °C Trocknung. Die Wärmeleitfähigkeit ist proportional der Rohdichte. Wie bereits beschrieben, sinkt die Rohdichte der Proben durch den LCW-Zusatz. Beim Haidinger Ton fällt die Dichte um 120 kg/m³ auf 1570 kg/m³ ab. Erwartungsgemäß hat die modifizierte Probe eine geringere Wärmeleitfähigkeit als der unveränderte Haidinger Ton. Im Vergleich zu hochporosierten Ziegel ist die Scherbenwärmeleitfähigkeit hoch.

4.5 Kriechen

Kriechen beschreibt die zeitabhängige Formveränderung unter ständig wirkender Spannung. Das Kriechen setzt sich aus einem reversiblen Anteil, der nach der Entlastung im Laufe der Zeit wieder verschwindet und einem irreversiblen Anteil zusammen.

Die Verformung durch langzeitige Lasteinwirkung wurde jeweils an einem stranggepressten Prüfkörper der Lehmischungen H und H4 bei einer Umgebungstemperatur von 20°C und 65 % relativer Feuchte ermittelt. Die mit LCW modifizierten Proben H4 wurden mit 1/3 bzw. 1/4 der Bruchlast belastet.

Für die Prüfung wurde jeweils ein Probekörper mit den Abmessungen (ca. 60 x 40 x 78 mm³) zusammen mit einer Druckmessdose zwischen zwei Stahlplatten positioniert (siehe Abb. 20). Die Höhe der Belastung wurde durch Anziehen von Schrauben an den Ecken der Stahlplatten befindlicher Gewindestangen eingestellt. Die Messung der Verformung erfolgte durch zwei an den Längsseiten der Probekörper in Strangrichtung angebrachter Wegaufnehmer.



Abb. 20: Kriechprüfstand

Beim Probekörper H mit 11% Lochanteil (Nullmischung) wurde bei Messbeginn eine Vorlast von 5 kN aufgebracht, dies entspricht ca. 1/3 der Druckfestigkeit. Die Verformung steigt nach 1 Tag auf ca. 0,77 mm/m an. Bedingt durch einen geringen Lastabfall kommt es anschließend zum Absinken der Verformung, im weiteren Verlauf erfolgt ein stetiger Anstieg. Nach einer Messdauer von 312 h, bei einer Gesamtverformung von 0,87 mm/m wurde die Probe entlastet, es bleibt ein plastischer Anteil von 0,23 mm/m. Nach anschließender Belastung auf 5 kN erreicht die Gesamtverformung wieder den Wert von 0,87 mm/m und steigt auf 0,92 mm/m bei Abbruch der Messung nach 400 h. Das Ende der Verformung ist noch nicht erreicht.

Beim Probekörper H4 mit 11% Lochanteil (Mischung mit LCW) wurde bei Messbeginn eine Vorlast von 10 kN (3,75 N/mm² Netto) aufgebracht, dies entspricht ca. 1/3 der Druckfestigkeit. Bei dieser Probe steigt die Verformung nach 1 Tag auf ca. 1,63 mm/m und steigt im weiteren Verlauf stetig an. Nach einer Messdauer von 312 h, bei einer Gesamtverformung von 2,14 mm/m wurde die Probe entlastet, die Verformung sinkt bis auf den plastischen Anteil von 1,41 mm/m. Nach anschließender Belastung auf 10 kN erreicht die Gesamtverformung wieder den Wert von 2,14 mm/m und steigt auf 2,36 mm/m bei Abbruch der Messung nach 406 h. Auch bei dieser Messung ist das Ende der Verformung noch nicht erreicht, es ist noch kein Abflachen der Verformungskurve erkennbar.

Bei der letzten Prüfung wurde Probekörper H4 mit 40 % Lochanteil (Mischung mit LCW) bei Messbeginn mit einer Vorlast von 5 kN (2,77 N/mm² Netto) belastet, dies entspricht ca. 1/4 der Druckfestigkeit. Bei dieser Probe beträgt die Verformung nach 1 Tag ca. 0,65 mm/m, und steigt im weiteren Verlauf stetig an. Nach einer Messdauer von 1024 h, bei einer Gesamtverformung von 1,25 mm/m wurde die Probe entlastet, der plastische Anteil beträgt 0,69 mm/m. Nach anschließender Belastung auf 5 kN erreicht die Gesamtverformung wieder den Wert von 1,25 mm/m und steigt auf 1,29 mm/m bei Abbruch der Messung nach 1080 h (45 Tage). Auch bei dieser Mes-

sung ist das Ende der Verformung noch nicht erreicht, es ist noch kein Abflachen der Verformungskurve erkennbar nach einer Messdauer von 45 Tagen.

Eine grafische Darstellung der Messergebnisse zeigt Abb. 21:

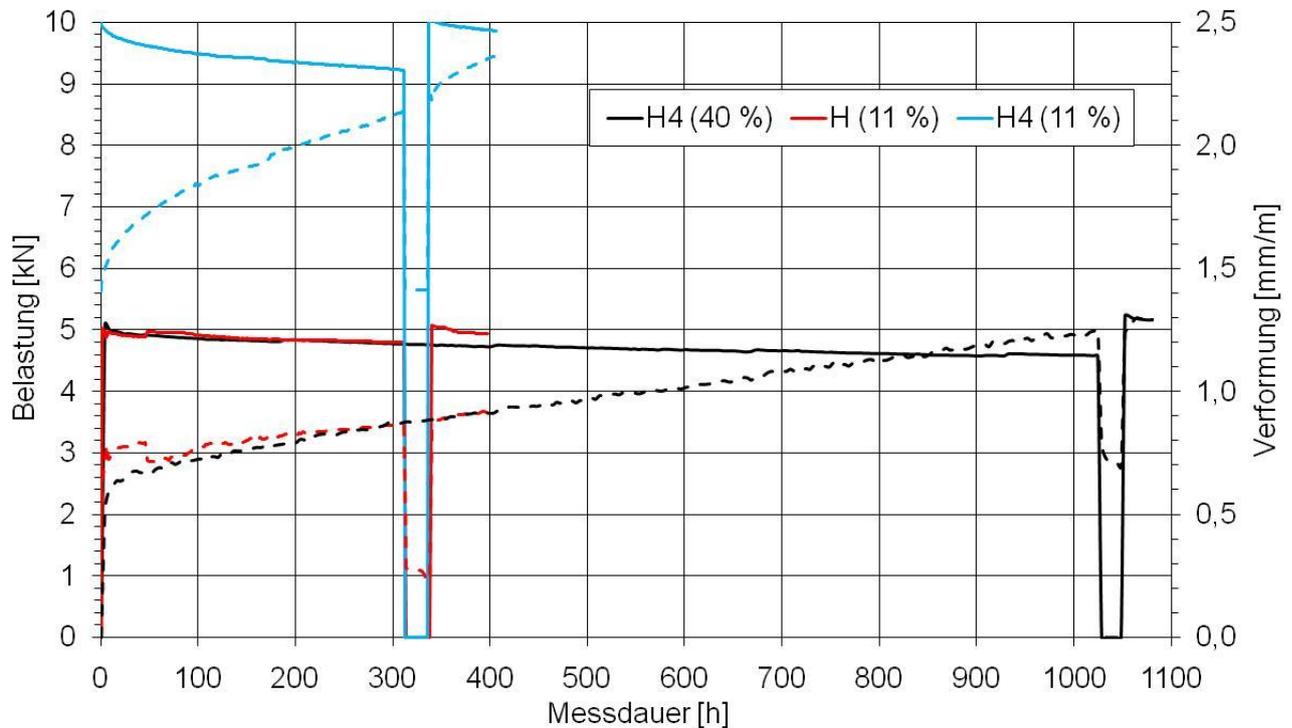


Abb. 21: Kriechverformung

Aus den Messkurven ist ersichtlich, dass die Verformung bis Abbruch der Messung stetig ansteigt, auch bei Probekörper H4 (40%Lochanteil) ist nach einer Belastungsdauer von 1080h (45 Tagen) kein Abflachen der Kurve erkennbar.

Vergleichsdaten zu anderen Baustoffen für Einzelsteine liegen nicht vor. Die gemessene Verformung liegt bei Ziegelmauerwerk bei max. 0,2 mm/m (nach ½ Jahr). Im Vergleich dazu ist die nicht abgeschlossene Kriechverformung bei Probekörper H4 mit 2 mm/m nach ¼ Jahr deutlich höher.

4.6 Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur

Abb. 15 zeigt den Druckfestigkeitsverlauf der Mischung H4 bei unterschiedlicher Trocknung. Die blaue Kurve zeigt die Festigkeit, wenn mit 40 °C und 20 % relativer Feuchte getrocknet wird. Nach 24 Stunden ist die Endfestigkeit fast erreicht. Die Probekörper sind zu diesem Zeitpunkt problemlos stapelbar. Insgesamt konnten die Probekörper rissfrei getrocknet werden und sind wie erwartet auch bei 40 °C Trocknung wasserfest. Im Gegensatz dazu findet eine Festigkeitssteigerung statt, wenn die Trocknung bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte durchgeführt wird. Nach vier

Tagen beträgt die Festigkeit 8 N/mm². Die Druckfestigkeit nach sieben Tagen 20 °C und anschließender 40 °C Trocknung liegt bei 19 N/mm². Die Endfestigkeiten unterscheiden sich also um 7 N/mm².

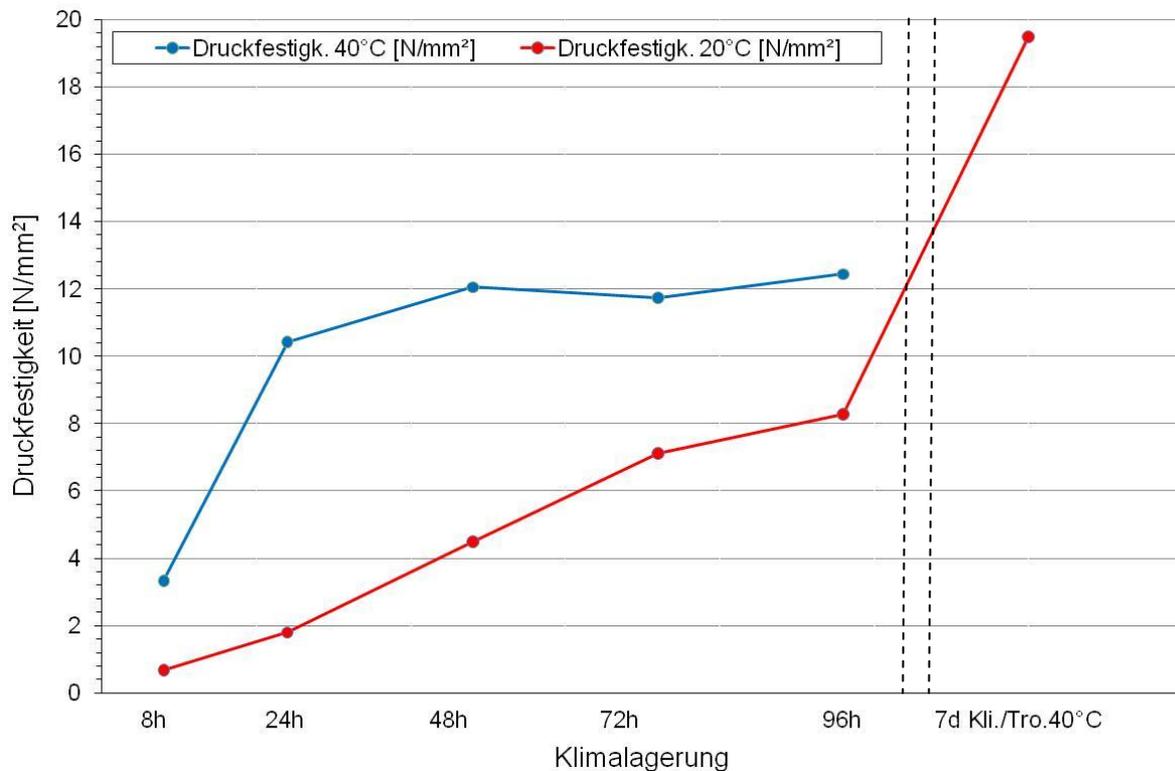


Abb. 15: Druckfestigkeitsentwicklung

5. Fazit

Durch LCW, einem mineralischen Stoffgemisch aus Kalk, calciniertem Ton und Gips, ist es möglich, wasserresistente stranggepresste Lehmziegel herzustellen. Bei steigenden Zugabemengen von LCW zum Lehm ist bei gleicher Plastizität (Pfefferkornwert) ein höherer Anmachwassergehalt notwendig. Rohdichte und Zugfestigkeit werden durch die Zugabemenge nur unwesentlich beeinflusst. Während die Druckfestigkeit bei 56,9 M.-% Ton, 14,5 M.-% LCW und 28,6 M.-% Wasser ein Maximum erreicht. LCW setzt sich dabei aus 8,5 M.-% bei 750 °C aktivierten und gemahlenem Ton, 4,5 M.-% Branntkalk und 1,7 % Gips zusammen. LCW ohne Gips hat höhere Anmachwassergehalte und Sorptionsfeuchten. Bedingt durch den Wasserbedarf ist die Porosität der Lehmziegel ohne Gips größer, so dass die Rohdichte kleiner ist. Gips wirkt als Abbindebeschleuniger und wird in die CSH-Phasen eingebunden. Durch die Einbindung wird der Lehmziegel wasserresistent. Gips ist also zwingend in der LCW-zusammensetzung. Die Differenz zwischen berechnetem Anmachwassergehalt durch Trocknung bei 105 °C (Tabellen B im Anhang) und dem Wassergehalt

halt der Mischungszusammensetzung kennzeichnet den Anteil an hydraulisch gebundenem Wasse.

Brantkalk kann durch gelöschten Kalk ersetzt werden. Dadurch sinkt der Gesamtwassergehalt der Mischung. Außerdem sind die Druckfestigkeiten im untersuchten Feuchte- und Temperaturbereich geringer, aber immer noch ausreichend hoch für den Wohnungsbau. Durch Einsatz von gelöschtem Kalk sinkt die geringe Bindigkeit der Masse nochmals.

Das Recyclingprodukt Schleifstaub aus Hochlochziegel-Planschleifanlagen kann anstelle aktivierten Tons verwendet werden. Aktivierter Ton muss extra für LCW in geeigneten Aggregaten produziert werden. Die Brenntemperatur des Tons und damit die Brenntemperatur der geschliffenen Ziegel haben großen Einfluss auf die Lehmziegeleigenschaften. Bei höheren Temperaturen nimmt die Reaktivität ab, die Folge ist, dass die Lehmziegel geringere Kantenfestigkeiten aufweisen und bei Wasserlagerung Mikrorisse bilden. Außerdem sollte der Schleifstaub möglichst fein gemahlen sein, damit dieser eine große Reaktionsoberfläche besitzt.

LCW ist auf unterschiedlichste Tone anwendbar. Durch LCW kann sowohl die Druck- als auch Zugfestigkeit der Lehmziegel erhöht werden. Die Höhe der Festigkeiten variiert nach Tonzusammensetzung. In den meisten Fällen fallen die Festigkeiten bei mehrfacher Feuchtlagerung nicht ab. Gemeinsam ist bei allen Proben, dass unabhängig vom Ton die Lehmziegel durch das mineralische Stoffgemisch LCW wasserresistent werden und die lineare Trockenschwindung vermindert wird. Dies trifft vor allem auf die Längsschwindung zu. Die modifizierten Lehmziegel schwinden in allen Richtungen ungefähr gleich stark.

Die Kriechverformung der Lehmziegel ist weiter zu beobachten. Nach 45 Tagen ist die Verformung bei Belastung mit $\frac{1}{4}$ der Bruchlast noch nicht abgeschlossen. Außerdem ist die Verformung mit Vergleich zu anderen Baustoffen recht hoch.

Da nur anorganische Bestandteile im Lehmstein eingesetzt werden, wird es nicht zu Ausblühungen und Schimmelbildung kommen.

LCW führt zum schnellen Ansteifen der Masse. Daher ist die Zugabe zum Ton möglichst kurz vor dem Extruder anzustreben. Außerdem sollte die Pressenreinigung bei Stillstandszeiten berücksichtigt werden. Die Endfestigkeiten der Lehmziegel sind bei Trocknung mit Umgebungsluft höher als bei künstlicher Trocknung mit beispielsweise 40 °C. Die langsamere Trocknung ermöglicht wahrscheinlich eine stärkere CSH-Phasenbildung. Zur Qualitätssicherung ist eine Endtrocknung zwischen 30 und 60 °C anzustreben, da nur bei gleichen Sorptionsfeuchten die Festigkeiten miteinander verglichen werden können. Über 60 °C sollte nicht getrocknet werden, da dann die Wasserabspaltung zu irreversiblen Strukturveränderungen (Unterschied De- und Hydratation) führt. Ursache ist, dass die Hydrathüllen einiger Ionen bereits bei 60 °C nicht vollständig reversibel abgespalten werden. Diese verschlechtern die Wasserre-

sistenz deutlich. Außerdem stellt sich nach Trocknung eine Gleichgewichtsfeuchte in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ein.

Wirtschaftlich können Lehmziegel nur mittels Niedrigenergietrocknung hergestellt werden. Neben den zuvor genannten Nachteilen einer Hochtemperaturtemperetrocknung kann der Energiebedarf für die Lehmziegelherstellung nur um die Ofenverluste minimiert werden. Hinzu kommt, dass durch die höheren Anfangswasserbeladungen der LCW-Lehmziegel der Trocknungsenergiebedarf im Vergleich zu Ziegelrohlingen größer ist. Sinnvoll ist die Trocknung zunächst mit Umgebungsluft und einer Endtrocknung mit Abwärme.

6. Literatur

- [1] European Commission Research Project: ROCEM: EVK4-CT-2002-00084- RO-CEM 2006
- [2] Bergaya, F.; Theng, B.K.G.; Lagaly, G.: Handbook of clay science; Elsevier Amsterdam, 2006
- [3] Buchwald, A.; Kriegel, R.; Kaps, C.; Zellmann, H.-D.: Untersuchungen zur Reaktivität von Metakaolinen für die Verwendung in Bindemittelsystemen. Proceedings 5. Bauchemie 2003, 9.-10. Oktober 2003 in München, 2003
- [4] Müller, C.J.: Pozzolan activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics, Dissertation Zürich 2005
- [5] Krischer, O; Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 3. Auflage 1978

Anhang

A: Mischungszusammensetzung in Masseprozent

B: Ergebnistabellen

B1: Ton Göllerdorf

B2: Ton Haiding

B3: Ton Fürstenfeld

Mischungen

	Eigenton	aktiv. Ton 750 °C	Schleifstaub Hd 930 °C	Schleifstaub Ab 1000 °C	Branntkalk	Kalkhydrat	Gips	Wasser
G	84,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,6
G0	55,8	11,2	0,0	0,0	5,6	0,0	2,2	25,3
G1	61,5	6,2	0,0	0,0	3,1	0,0	1,2	28,0
G2	56,9	8,5	0,0	0,0	4,3	0,0	1,7	28,6
G3	54,0	10,8	0,0	0,0	5,4	0,0	0,0	29,8
G4	59,7	9,0	0,0	0,0	0,0	4,5	1,8	25,1
G5	60,2	9,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,8	25,9
G6	59,3	0,0	8,9	0,0	0,0	4,5	1,8	25,5
G7	59,3	0,0	0,0	8,9	0,0	4,5	1,8	25,5
H	83,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,1
H1	59,3	0,0	8,9	0,0	0,0	4,5	1,8	25,5
H2	57,3	0,0	8,6	0,0	0,0	4,3	1,7	28,1
H3	59,0	0,0	0,0	8,8	0,0	4,4	1,8	26,0
H4	58,3	8,7	0,0	0,0	0,0	4,4	1,7	26,8
F	83,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,4
F1	59,2	0,0	8,9	0,0	0,0	4,4	1,8	25,7
F2	59,0	8,8	0,0	0,0	0,0	4,4	1,8	26,0
F3	59,0	0,0	0,0	8,8	0,0	4,4	1,8	26,0

Hd: Hennersdorf
Ab: Apfelberg

Mischungszusammensetzungen in Masseprozent

G

Anfangswasserbeladung: 0,25 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	3,61	13,6	7,5	5,2	1915
40 °C	0,02	1,71	8,64	7,4	5,1	1904
20 °C / 90% r.F.	0,04	0,69	3,82	7,3	4,9	1904
20 °C / 90% r.F.	0,04	0,64	3,77	7,3	4,5	1898

G1

Anfangswasserbeladung: 0,34 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,72	12,66	5,2	4,7	1613
40 °C	0,02	1,99	9,96	5,2	4,6	1610
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,27	6,28	5,0	4,4	1599
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,17	6,67	5,1	4,5	1609

G2

Anfangswasserbeladung: 0,35 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,6	17,89	5,5	5,0	1620
40 °C	0,04	2,20	14,68	5,1	4,8	1601
20 °C / 90% r.F.	0,06	1,09	10,67	5,1	4,7	1603
20 °C / 90% r.F.	0,05	1,12	10,99	5,2	4,7	1604

G3

Anfangswasserbeladung: 0,35 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,23	8,69	4,0	4,2	1543
40 °C	0,01	1,53	6,04	4,3	4,6	1548
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,15	3,76	4,2	4,5	1550
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,16	4,91	4,2	4,5	1551

G4

Anfangswasserbeladung: 0,33 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,8	11,54	4,4	4,4	1603
40 °C	0,03	2,63	9,29	4,1	4,2	1586
20 °C / 90% r.F.	0,05	1,3	5,99	4,1	3,9	1581
20 °C / 90% r.F.	0,05	1,22	4,83	4,1	4,0	1583

G5

Anfangswasserbeladung: 0,34 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,67	11,67	4,7	4,5	1597
40 °C	0,03	2,19	11,28	4,7	4,5	1601
20 °C / 90% r.F.	0,06	0,93	7,29	4,6	4,2	1602
20 °C / 90% r.F.	0,06	1,07	7,32	4,5	4,3	1594

G6

Anfangswasserbeladung: 0,34 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	1,90	12,24	4,8	4,4	1603
40 °C	0,04	2,03	6,26	4,6	4,5	1601
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,09	6,76	4,6	4,4	1602
20 °C / 90% r.F.	0,03	1,04	7,68	4,7	4,5	1594

G7

Anfangswasserbeladung: 0,33 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,03	12,4	5,3	4,7	1630
40 °C	0,01	2,31	9,95	5,3	4,6	1628
20 °C / 90% r.F.	0,03	1,05	6,14	5,2	4,2	1625
20 °C / 90% r.F.	0,02	0,79	5,79	5,3	4,2	1625

Die Wassergehalte nach den Zyklen 1, 2 und 4 (40 °C und 20 °C / 90 % rel. Luftfeuchte) sind Sorptionsfeuchten (auf 105 °C getrocknete Proben bezogen).

H

Anfangswasserbeladung: 0,27 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,1	15	6,5	4,43	1758
40 °C	0,02	1,52	11,44	6,33	4,27	1758
20 °C / 90% r.F.	0,06	0,5	4,63	6,3	4,05	1760
20 °C / 90% r.F.	0,05	0,31	4,24	6,05	4,52	1753

H1

Anfangswasserbeladung: 0,35 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,33	16,75	3,2	4,2	1512
40 °C	0,1	2,39	11,02	3,1	4,1	1523
20 °C / 90% r.F.	0,11	1,88	11,54	3,32	3,97	1502
20 °C / 90% r.F.	0,08	0,52	9,96	3,38	3,97	1522

H2

Anfangswasserbeladung: 0,38 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	1,74	13,38	3,58	4,27	1473
40 °C	0,06	1,33	9,9	3,72	4,25	1475
20 °C / 90% r.F.	0,07	1,18	8,83	3,5	3,8	1477
20 °C / 90% r.F.	0,06	0,39	7,23	3,47	3,62	1471

H3

Anfangswasserbeladung: 0,33 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	1,79	17,83	3,35	5,25	1598
40 °C	0,03	1,56	11,52	3,23	5,1	1603
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,18	9,92	3,13	4,73	1602
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,03	10,91	3,43	4,57	1603

H4

Anfangswasserbeladung: 0,33 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	1,88	18,94	3,13	4,4	1522
40 °C	0,04	2,12	13,23	3,12	4,2	1531
20 °C / 90% r.F.	0,05	1,45	12,15	3,2	4,18	1530
20 °C / 90% r.F.	0,05	1,13	11,9	3,43	4,57	1525

F Anfangswasserbeladung: 0,27 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	3,34	15,61	8,57	7,15	1966
40 °C	0,02	2,25	10,35	8,42	7,3	1972
20 °C / 90% r.F.	0,05	1,05	5,86	8,59	6,77	1968
20 °C / 90% r.F.	0,05	0,99	5,41	8,48	6,72	1967

F1 Anfangswasserbeladung: 0,37 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,65	15,46	4,95	5,15	1577
40 °C	0,07	2,28	14,31	4,53	5,47	1543
20 °C / 90% r.F.	0,08	1,83	11,59	4,6	5,25	1563
20 °C / 90% r.F.	0,08	1,89	10,26	4,67	5,23	1564

F2 Anfangswasserbeladung: 0,38 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,77	16	5,5	5,52	1572
40 °C	0,04	3,06	14,6	5,32	5,47	1570
20 °C / 90% r.F.	0,07	1,66	11,24	5,38	5,43	1575
20 °C / 90% r.F.	0,07	1,59	10,82	5,12	5,35	1557

F3 Anfangswasserbeladung: 0,37 kg/kg

Lagerung	Wassergehalt	Zugfestigkeit längs	Druckfestigkeit	Schwindung längs	Schwindung quer	Rohdichte
	[kg/kg]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[kg/m ³]
105 °C	0	2,44	14,82	5,23	5,82	1617
40 °C	0,02	2,65	15	5,28	5,6	1623
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,47	9,94	5,23	5,57	1621
20 °C / 90% r.F.	0,04	1,36	9,51	5,4	5,63	1625