

Julia Tourtelot^{1 2}, Imen Ghattasi³, Robert Le Roy³, Ann Bourgès⁴,
Emmanuel Keita¹

¹Laboratoire Navier, ²LRMH, Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de la Culture et de la Communication, CNRS, ³ENSAPM/GSA – all Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, ⁴Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Paris, Frankreich

Das Fließverhalten von Lehmbaustoffen für den 3D Druck

Das 3D Printverfahren ist eine im Entstehen begriffene Konstruktionsmethode. Das Verfahren lässt sich bei einer Vielzahl von Materialien anwenden, um komplexe Formen zu gestalten und zu bauen. Die Modellierung lässt sich an die klimatischen Bedingungen des Gebäudes anpassen, an die notwendige Ausformung der Wände oder auch um den seismischen Widerstand zu erhöhen [1] [2] [3].

Die Dimensionierung und Nutzung der 3D-Drucktechnik erfordert die Kontrolle des Fließverhaltens. Das Material muss während des Druckvorganges in das Gerät fließen können, jedoch nach Einbringung steif genug sein, um sein eigenes Gewicht zu tragen und zudem das Gewicht der folgenden Schichten. Dieses Verhalten wird durch Fließgrenzen-Messungen charakterisiert.

Der Wassergehalt ist der wichtigste Parameter des Fließverhaltens von Lehmbaustoffen. Allerdings zeigt Lehm sich uns bzgl. des Wassergehaltes in drei Beschaffenheiten: flüssig, plastisch und fest. Die erste bedeutet, dass Lehm genügend Wasser enthält, um ohne äußeren Einfluss zu fließen. Die zweite charakterisiert eine Konsistenz, die die Ausübung von Druck benötigt, um das Material fließen zu lassen. Die dritte Beschaffenheit beschreibt einen Zustand bei dem das Material bricht, wenn Druck darauf ausgeübt wird [4] [5] [6].

Im Allgemeinen wird die Untersuchung des Fließverhaltens von Baustoffen anhand von Rheometern durchgeführt [7] [8]. Jedoch erfordert diese Methode ein Material mit einer niedrigen Fließgrenze. Die Aushärtung von Lehmbaustoffen steht in einem direkten funktionalen Zusammenhang mit dem Trocknungsprozess. Es ist daher empfehlenswert mit Mischungen zu arbeiten, die einen geringen Wassergehalt

und somit eine höhere Fließgrenze aufweisen, als sie mit einem Rheometer gemessen werden kann.

Um unsere Baustoffe zu charakterisieren, wurde das Laborexperiment des Verdichtungstests/Komprimierungstests ausgeführt. Hierbei wird eine kontrollierte Kraft auf ein zwischen zwei parallelen Platten platziertes Material ausgeübt. Der Test misst die aufgewendete Kraft als Funktion der Probekörper-Höhe und errechnet daraus die Fließgrenze.

Dieser Test erfordert spezielles Equipment wie eine Presse, die mit einem sensiblen Detektor ausgestattet ist. Das Protokoll muss an die unterschiedlichen Materialien angepasst werden [9] [10] [11].

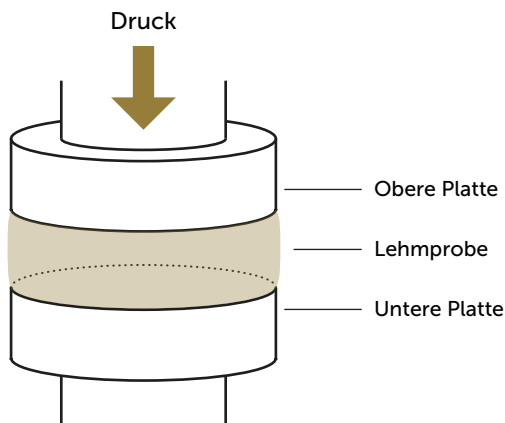
Dementsprechend wird ein klassischer und praktischer Test vorgeschlagen, um die Fließgrenze von Lehmbaustoffen zu messen. Ziel ist es, die Eindringtiefe in ein Material zu messen als Funktion in Abhängigkeit vom Gewicht des eindringenden Stößels. Die Fließgrenze wird dann als Verhältnis zwischen den Kräften und der Oberfläche errechnet. Dieser Test kann einfach neben dem Drucker durchgeführt werden [12].

So wurde die Fließgrenze für zwei Rohlehme mit großer Wassergehalts-Spanne gemessen. Der Komprimierungstest wurde als Referenztest genutzt und der Sauggewichtstest war der selbst entwickelte Test. Anschließend ist eine Diskussion geplant, wie der Sauggewichtstest für 3D-Druck Anlagen genutzt werden kann.

Material und Methoden

Material und Probenvorbereitung

Ein Lehmmörtel für Deckschichten von der Ziegelei "Briqueterie deWulf" in Frankreich und ein natürlicher



01 Schematischer Aufbau eines Komprimierungstests von einem Lehmprobekörper

Romainville Lehm aus dem Pariser Becken wurden für die aktuelle Studie ausgewählt. Der erste besteht zu weniger als 10% aus Ton und der zweite aus rund 53% Ton [13].

Mit einem Planetenmischer wurde eine Mörtelmischung aus Lehm und destilliertem Wasser vorbereitet. Der Mischvorgang besteht aus zwei Phasen: der erste dauert 1 Minute bei 67 rpm (Umdrehung pro Minute), die zweite 30 Sekunden bei 125 rpm. Die Mörtel durften vor der Testdurchführung mindestens 48h ruhen. Beide Lehme wurden mit sehr vielen verschiedenen Wassergehalten getestet.

Komprimierungstest

Der Komprimierungstest ist ein Fließtest, der genutzt wird, um die Fließgrenze von Materialien laboranalytisch zu erfassen. Er besteht aus der Verpressung eines Probekörpers zwischen zwei parallelen Platten (Abb. 1). Für das Experiment wurde eine Shimadzu AUTOGRAPH AGS-X Presse genutzt, die mit einem 1 kN Kräftemessgerät ausgestattet war. Der Radius (R) der Platten betrug 19.31 mm und die Höhe der Proben rund 20 mm. Die Komprimierung wurde bei 1 mm/s ausgeführt und die ausgeübte Kraft (F) wurde als Funktion der Distanz zwischen den Platten gemessen (h).

Der Komprimierungstest ist ein gut dokumentiertes Experiment [11] [14]. Die Fließspannung wurde anhand der folgenden Gleichung bestimmt. Es korrespondiert mit der reduzierten Druckkraft (F*) als Funktion des Verhältnisses zwischen h und R.

$$F^* = \frac{F * h}{\pi * R^3} = \frac{2K_a}{\sqrt{3}} * \left(\frac{h}{R}\right) + \frac{2K_b}{3}$$

Die Fließspannung wird im Anstieg (Ka) der Gleichung abgebildet und gilt für die gesamte Materialprobe. Sie kann auch durch den Achsenabschnitt (Kb) ermittelt werden und steht repräsentativ für das Materialverhalten an der Übergangsstelle zu den Platten. Weil es signifikanter ist, wurde die Fließspannung des Anstiegs genutzt.



02 Verwendung der Stößel-Gewichtstest zur Ermittlung der Fließspannung der Lehmprobekörper

Stößel-Gewichtstest

Der Stößel-Gewichtstest wurde inspiriert durch den NF EN 413-2:2017 Standard [15], der die Konsistenz von Mörtel bewertet. Dem Prinzip nach wird ein Stößel aus einer Höhe von 100 mm in den zu testenden Mörtel fallen gelassen, um die Eindringtiefe zu messen.

Beim Stößel-Gewichtstest wird dagegen ein Stößel von der Oberfläche des Materials aus losgelassen. Dann wird die Distanz der Eindringung gemessen als Funktion des Stößel-Gewichts (Abb. 2). Schlussendlich wird die Fließspannung als Anstieg der eingesetzten Totkraft ermittelt – die Summe des Stößelgewichts und der Schwerkraft – als Funktion der Durchdringungsoberfläche. Detaillierte Gleichungen wurden vollständig in einem vorhergehenden Beitrag präsentiert [12].

Ergebnisse und Diskussion

Die Fließspannung wurde bei beiden Lehmarten gemessen: dem Lehmörtel der Ziegelei „Briqueterie deWulf“ und den Romainville Lehm. Zuerst jeweils mit dem Komprimierungstest, der unser Referenztest ist. Danach wurde der Stößel-Gewichtstest durchgeführt, also der von uns selbst neu entwickelte. Abbildung 3 zeigt die Fließspannung, die durch den Komprimierungstest ermittelt wurde und den Stößel-Gewichtstest als Funktion in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Mischungen.

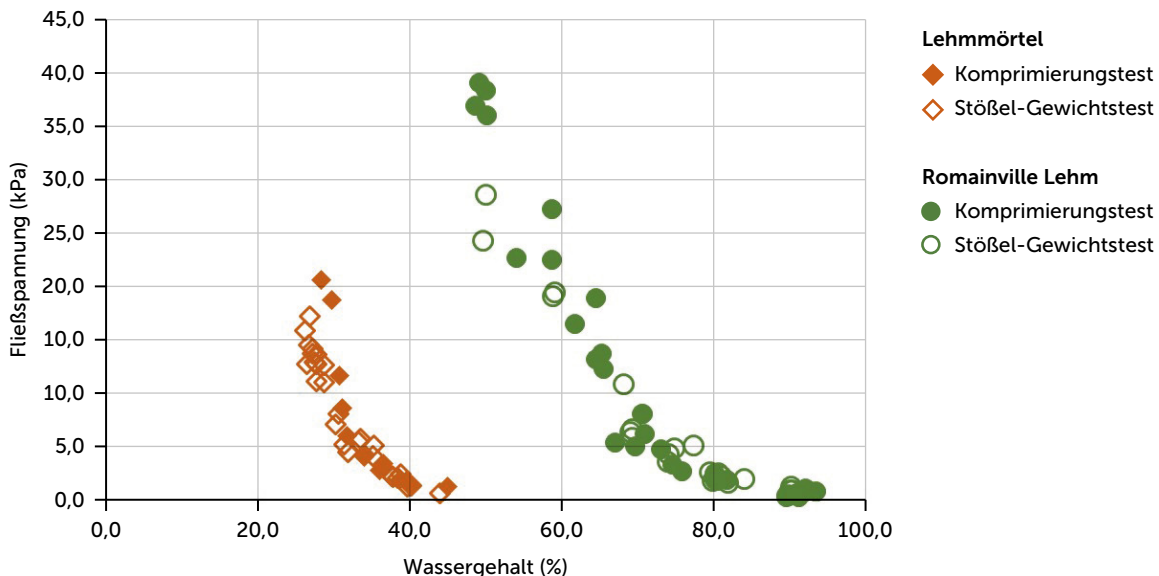
Wir können erkennen, dass sich die Werte aus beiden Tests überschneiden. Dies bestätigt, dass der Stößel-Gewichtstests ähnliche Ergebnisse zeitigt, wie der Komprimierungstest. Detaillierte Erklärungen zur Bestätigung des Stößel-Gewichtstests wurden bereits in einer vorhergehenden Arbeit veröffentlicht [12].

Darüber hinaus können wir die breite Palette von Verhaltensweisen erkennen, die uns diese beiden Experimente zu messen ermöglichen. Die geringere Fließspannung ist mit dem Stößel-Gewichtstest messbar. Sie beträgt bei dem Lehmörtel der „Briqueterie deWulf“ rund 0.67 kPa bei einem Wassergehalt von 44% und beim Romainville Lehm rund 0.46 kPa bei einem Wassergehalt von 90%. Im Gegensatz dazu ist die höhere Fließspannung mit dem Komprimierungstest messbar. Sie beträgt beim Lehmörtel der „Briqueterie deWulf“ in etwa 20 kPa bei einem Wassergehalt von 30% und beim Romainville Lehm rund 40 kPa bei einem Wassergehalt von 50%.

Das Ziel der Entwicklung des Stößel-Gewichtstests war es, die Fließspannung von Lehm während des 3D Druckvorgangs zu messen. Der Prozess benötigt eine Mischung, die in den Drucker fließen kann und gleichzeitig steif genug ist, um nicht unter die bereits abgesetzten Schichten zu fließen.

Somit gibt es zwei Schritte vor dem 3D-Drucken von Lehmstoffen. Der erste ist, die Lehmmischung zu

03 Fließspannung der zwei Lehmproben als Funktion des Wassergehalts, gemessen mittels des Komprimierungstests sowie auch des Stößel-Gewichtstests



wählen, indem die erreichbare Fließspannung ermittelt wird. Der zweite ist es zu gewährleisten, dass die vorbereitete Mischung die gewünschte Fließspannung aufweist und sie ggf. anzupassen. Für beide Schritte liefert der Stößel-Gewichtstest schnell und einfach die Ergebnisse.

Natürlich ist der Komprimierungstest ein Labortest, der besonderes Equipment erfordert, da er eine Verdichtungsmaschine mit einem sensiblen Detektor und ein immer wieder an jeden Lehm anzupassendes Protokoll benötigt. Im Gegensatz dazu kann der Stößel-Gewichtstest direkt neben dem 3D-Drucker und mit vielen verschiedenen Lehmbaustoffen durchgeführt werden.

Zusammenfassung

Der Hauptzweck dieser Arbeit war es, eine Methode anzugeben, die die Fließspannung von Lehm für den 3D-Druck messen kann. Die Dimensionierung und Nutzung des 3D Druckers erfordert die Kontrolle des Fließverhaltens. Während des Druckvorganges muss das Material in das Gerät fließen können, nach dem Einfüllen darf es jedoch nicht unter seinem eigenen Gewicht oder dem der oberen Schichten wegfließen.

Für den Test von zwei Rohlehm wurden zwei Tests zur Fließspannungsmessung durchgeführt. Zuerst wurde der Komprimierungstest als Referenztest genutzt. Er kann allerdings nicht draußen vor Ort zum Einsatz kommen, da er spezielles Equipment benötigt und Zeit, das Experiment durchzuführen. Daraus folgend wurde der Stößel-Gewichtstest, ein klassischer und praktischer Test vorgeschlagen, um die Fließspannung von Lehmbaustoffen zu ermitteln. Dieser Test kann sehr einfach direkt neben dem 3D-Drucker durchgeführt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Vielzahl an Fließspannungstests an zwei Lehmarten durch zwei Methoden durchgeführt wurde. Einer davon ist nützlich im Labor, der andere kann simpel direkt auf der Baustelle durchgeführt werden. Schlussendlich wurde eine Diskussion vorgeschlagen, wie der Stößel-Gewichtstest für 3D-Drucker genutzt werden kann.

Kontaktangaben

E-Mail: julia.tourtlot@univ-eiffel.fr

Referenzen

- [1] Taher Ibrahim, A. 3D PRINTING CLAY FACADE WALLS Integrating Ventilation Systems Into Printing Process. (Delft University of Technology, 2019).
- [2] Dubor, A., Cabay, E. & Chronis, A. *Enewrgy Efficient Design for 3D Printed Earth Architecture*. in Humanizing Digital Reality: Design Modelling Symposium Paris 2017 (eds. De Rycke, K. et al.) 383–393 (Springer Singapore, 2018). doi:10.1007/978-981-10-6611-5_33
- [3] Perrot, A., Rangeard, D. & Courteille, E. *3D printing of earth-based materials: Processing aspects*. Constr. Build. Mater. 172, 670–676 (2018).
- [4] Andrade, F. A., Al-Qureshi, H. A. & Hotza, D. *Measuring the plasticity of clays: A review*. Appl. Clay Sci. 51, 1–7 (2011).
- [5] Fitton, T. & Seddon, K. *Relating Atterberg limits to rheology*. in Proceedings of the 15th International Seminar on Paste and Thickened Tailings 273–284 (2012). doi:10.36487/ACG_rep/1263_23_Fitton
- [6] Gutiérrez, A. *Determination of Atterberg Limits: Uncertainty and Implications*. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 132, 420–424 (2006).
- [7] Azeredo, G., Morel, J. C. & Lamarque, C. H. *Applicability of rheometers to characterizing earth mortar behaviour. Part I: Experimental device and validation*. Mater. Struct. Constr. 41, 1465–1472 (2008).
- [8] Lootens, D., Jousset, P., Martinie, L., Roussel, N. & Flatt, R. J. *Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests*. Cem. Concr. Res. 39, 401–408 (2009).
- [9] Cardoso, F. A., John, V. M. & Pileggi, R. G. *Rheological behaviour of mortars under different squeezing rates*. Cem. Concr. Res. 39, 748–753 (2009).
- [10] Roussel, N., Lanos, C. & Toutou, Z. *Identification of Bingham fluid flow parameters using a simple squeeze test*. J. Nonnewton. Fluid Mech. 135, 1–7 (2006).
- [11] Engmann, J., Servais, C. & Burbidge, A. S. *Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review*. J. Nonnewton. Fluid Mech. 132, 1–27 (2005).
- [12] Tourtelot, J., Ghattasi, I., Leroy, R., Bourgès, A. & Keita, E. *Yield stress measurement for clay based materials: The Weighted Plunger Test*. submitted (2020).
- [13] Luzu, B., Duc, M., Djerbi, A. & Gautron, L. *High Performance Illitic Clay-Based Geopolymer: Influence of the Mechanochemical Activation Duration on the Strength Development*. in Calcined Clays for Sustainable Concrete (ed. Bishnoi, S.) 363–373 (Springer Singapore, 2020). doi:10.1007/978-981-15-2806-4_43
- [14] Roussel, N. & Lanos, C. *Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test*. Appl. Rheol. 13, 132–141 (2003).
- [15] NF EN 413-2:2017 *Ciment à maçonner–Partie 2: Méthodes d’essai*.
- [16] Tourtelot J, Ghattasi I, Leroy R, Bourgès A, Keita E (2020) *Yield stress measurement for earth-based building materials: The Weighted Plunger Test*, Materials and Structures, accepted.