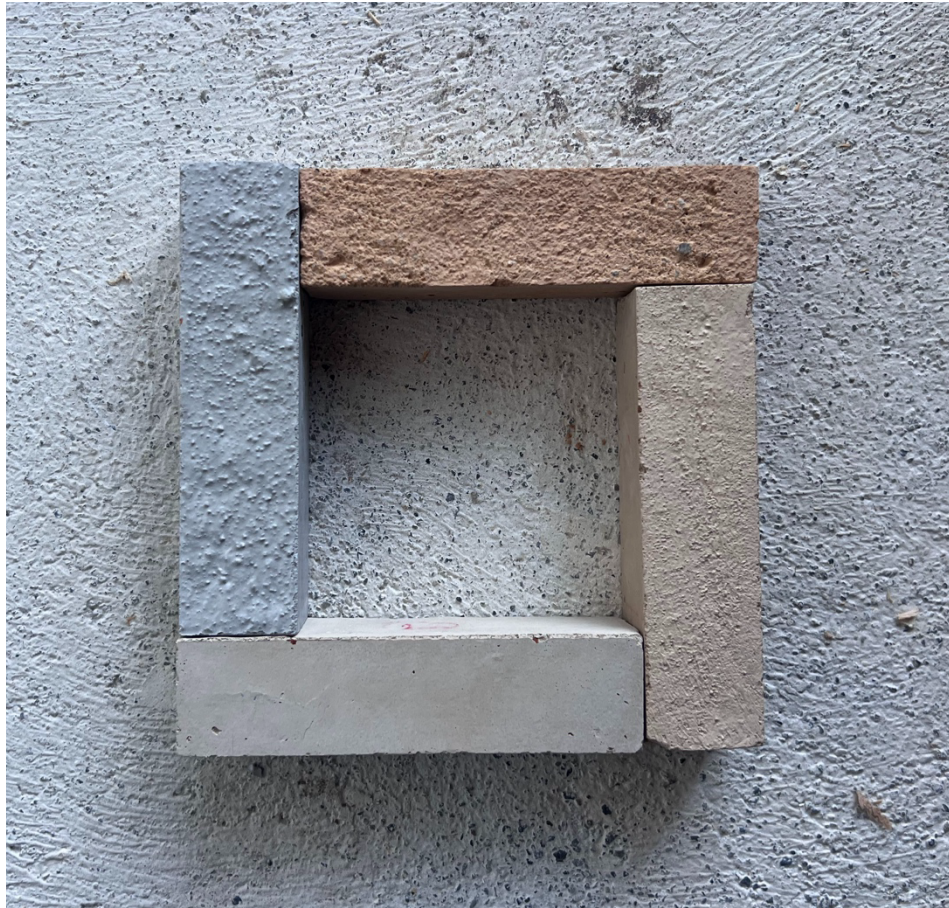


Lehmbeton: Potenzial von Aushubmaterial als Zement- und Kiesersatz.



Maturaarbeit von Simon Emanuel Stuber, M26e
Betreut durch Dr. Bernhard Edler

Gymnasium Kirchenfeld Bern Abteilung MN
Bern, Oktober 2025

Abstract

Beton ist für 7 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich, daher wird weltweit an Alternativen geforscht. Eines dieser Forschungsprojekte ist das Lehmbeetonprojekt der Studiengruppe von Dr. Ellina Bernard an der EMPA in Dübendorf. Ihr Ziel ist es, aus Aushubmaterial mit hohem Lehmgehalt einen giessbaren Beton herzustellen, welcher aufgrund seines Lehmgehalts und seiner anderen Komponenten weniger CO₂ emittiert als herkömmlicher Beton. Der Lehmbeeton besteht dabei aus vier Komponenten: Wasser, Aushubmaterial, Magnesiumoxid-Zement und Natriumhexametaphosphat.

Diese Maturaarbeit befasst sich mit dem Mischverhältnis von Aushubmaterial zu Magnesiumoxid-Zement. Dabei werden verschiedene Mischverhältnisse hinsichtlich ihrer Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit, hygroskopischen Fähigkeit, Wasserresistenz und ihres Schwindverhaltens geprüft, um daraus das ideale Verhältnis abzuleiten.

Die Arbeit zeigt, dass ein Mischverhältnis zwischen 10 % und 15 % MgO-Zement-Anteil die besten Eigenschaften aufweist. Mit diesem Beton könnten zweistöckige Häuser gebaut werden, welche wegen der hygroskopischen Wirkung des Betons zusätzlich die Raumluftfeuchtigkeit stabilisieren. Die CO₂-Bilanz ist bei einem solchen Mischverhältnisses niedriger als bei herkömmlichem Beton, weil der verwendete Magnesiumoxid Zement deutlich ressourcenschonender hergestellt werden kann und das verwendete Aushubmaterial ein Abfallprodukt ist, welches nicht neu gefördert werden muss. Ein bisher nicht gelöstes Problem ist das erhöhte Schwindverhalten von Lehmbeeton gegenüber herkömmlichem Beton.

Inhaltsverzeichnis

1. EINFÜHRUNG	5
2. ZUR GESCHICHTE VON BETON UND LEHMBAU	6
2.1 DIE GESCHICHTE DES LEHMBAUS	6
2.2 DIE GESCHICHTE VON BETON	6
2.2.1 HERSTELLUNG UND FUNKTION VON BETON	7
2.3 DER PORTLANDZEMENT	7
2.3.1 HERSTELLUNG VON PORTLANDZEMENT	8
3. THEORIE	9
3.1 AUSHUBMATERIAL	9
3.1.1 TONMINERALIEN	9
3.2 NAHMP	10
3.3 MAGNESIUMZEMENT	11
3.4 WASSER	12
3.5 BIEGEZUGFESTIGKEIT	12
3.6 DRUCKFESTIGKEIT	13
3.7 HYGROSKOPIE	13
3.8 WASSERRESISTENZ	13
3.9 SCHWINDEN	13
4. METHODIK	14
4.1 ZIEL	14
4.2 MATERIALIEN	14
4.3 HERSTELLUNG MGO-ZEMENT	15
4.4 VORBEREITUNG NAHMP LÖSUNG	15
4.5 HERSTELLUNG LEHMBETON	15
4.5.1 ZUBEREITUNG PROBE 1	15
4.5.2 ZUBEREITUNG PROBE 2	16
4.5.3 ZUBEREITUNG PROBE 3	16
4.5.4 ZUBEREITUNG PROBE 4	16
4.6 BIEGEZUGFESTIGKEIT	17
4.7 DRUCKFESTIGKEIT	18
4.8 HYGROSKOPIE	18
4.9 WASSERRESISTENZ	19
4.10 SCHWINDEN	19
5. RESULTATE	20
5.1 BIEGEZUGFESTIGKEIT	20
5.2 DRUCKFESTIGKEIT	20
5.3 HYGROSKOPIE	21

5.4 SCHWINDEN.....	22
5.5 WASSERRESISTENZ	22
<u>6. DISKUSSION.....</u>	<u>23</u>
6.1 BIEGEZUGFESTIGKEIT	23
6.2 DRUCKFESTIGKEIT.....	23
6.3 HYGROSKOPIE.....	24
6.4 SCHWINDEN.....	25
6.5 WASSERRESISTENZ	26
6.6 AUSBLICK	26
<u>7. FAZIT</u>	<u>27</u>
<u>DANKSAGUNG.....</u>	<u>29</u>
<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	<u>30</u>
<u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</u>	<u>32</u>
<u>HILFSMITTELVERZEICHNIS</u>	<u>34</u>
<u>ANHANG</u>	<u>35</u>
<u>SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....</u>	<u>39</u>

1. Einführung

Der Baustoff Beton ist nach Wasser der am zweitmeisten verwendete Stoff der Welt. Die Herstellung von Beton ist für etwa 7 % des weltweiten jährlichen CO₂-Ausstosses und für 2-3 % des jährlichen Energieverbrauchs verantwortlich. [1]. Um die Klimaziele zu erreichen und den CO₂-Ausstoss signifikant zu senken, muss daher nach Alternativen geforscht werden. Eine dieser Alternativen wird derzeit vom Team von Dr. Ellina Bernard an der EMPA in Dübendorf untersucht. Ihr Ziel ist es, einen auf Lehm basierenden Beton zu entwickeln, der giessbar ist und möglichst ähnliche Eigenschaften wie herkömmlicher Beton besitzt. Dieser Beton soll pro Kubikmeter nur noch ein Zehntel so viel CO₂ ausstossen wie herkömmlicher Beton. Für den auf Lehm basierenden Beton kann Aushubmaterial von Baustellen verwendet werden, das jeweils zwischen 10 % und 30 % Lehmanteil aufweist und gut abgestufte Aggregate enthält. Zum Aushubmaterial werden das Salz Natriumhexametaphosphat (NaHMP), Wasser sowie ein auf Magnesiumoxid basierender Zement zugesetzt. Dadurch entsteht eine giessbare Masse, welche innerhalb von 24 Stunden erhärtet.

Diese Maturaarbeit befasst sich mit dem Mischverhältnis von Aushubmaterial zu MgO-Zement. Es werden verschiedene Mischverhältnisse hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, Hygroskopie, Wasserresistenz und ihres Schwindverhaltens getestet, um auf das ideale Mischverhältnis schliessen zu können. Das Ziel ist es, festzustellen, welches Mischverhältnis sich für welche Anwendung eignet. Dabei ist die Hypothese, dass ein MgO-Zement-Anteil von 7.5 %-15 % zu Lehmbeton mit den meisten Anwendungsmöglichkeiten führt.

2. Zur Geschichte von Beton und Lehmbau

2.1 Die Geschichte des Lehmbaus

Das Bauen mit Lehm ist nichts Neues. Lehmbauten in der heutigen Türkei und in Israel sind bis zu 8000 Jahre alt. Damals hat man Lehmsteine als Wände benutzt und Dächer mit der Hilfe von Lehm regenfest gemacht.

Die Bautechnik, die für Lehmbau lange verbreitet war, nennt man Stampflehm. Der Stampflehm wurde höchstwahrscheinlich in China erfunden, wo man ihn auch teils für den Bau der Chinesischen Mauer benutzte. Die Konstruktionsweise des Stampflehms ist ziemlich banal. Der Lehm wird durch Stampfen komprimiert und somit hart gemacht. Man gibt also Lehm in eine Schalung und stampft von oben immer wieder, um den Lehm zu komprimieren (vgl. Abb.1). Danach gibt man erneut neuen Lehm auf den schon komprimierten Lehm hinzu und komprimiert diesen wieder durch Stampfen. Diese Lehmbautechnik hat sich bewährt und wird teils heute noch angewendet. Die Ägypter und andere Kulturen benutzten eine andere



Abbildung 1 Lehmstampfbau im Alten China
(Quelle: Lehmbau, Springer Vieweg, 2019)

Technik. Sie fertigten Lehmsteine vor. Dafür lufttrockneten sie geformte Lehmplatten, um sie anschliessend wie Ziegelsteine in Häusern oder oft auch in heiligen Stätten weiterzuverwenden. Der Bau mit Lehm fand historisch in Form dieser beiden Techniken statt. Das Team der EMPA arbeitet derzeit an einer neuen Technik, die den Lehmbau revolutionieren und das Bauen mit Lehm dem konventionellen Betonbau annähern soll. Wie der von der EMPA entwickelte Lehmbecon funktioniert, wird in Kapitel 3 genauer erläutert. [2] [3]

2.2 Die Geschichte von Beton

Das Prinzip hinter Beton, also das Binden von Kies und Sand durch ein Bindemittel, gibt es schon lange. Zement, wie wir ihn kennen, gibt es erst seit etwa 300 Jahren. Vorher wurde als Bindemittel für Kies und Sand gebrannter Kalkstein benutzt. Dafür erhitze man den Kalkstein auf 1000-1100 °C und benutzte anschliessend die Kalksteinmasse als Bindemittel. Die Römer waren es, welche den Baustoff Beton oft benutzten und auch stark weiterentwickelten. Aber erfunden hatten sie das Prinzip nicht. Die ersten Anwendungen von kalksteinbasiertem Beton datieren 10'000 bis 20'000 Jahre zurück. In der galiläischen Region fand man einen 180 m² grossen Hausboden, der mit Beton hergestellt wurde und auf etwa 9000 Jahre geschätzt wird. Auch die Mesopotamier benutzten eine Art Beton. Sie entdeckten ihn beim Zubereiten ihres Essens. Dabei gruben sie Löcher in den Boden und kochten darin ihr Essen über einem Feuer. Bei diesem Vorgang beobachteten sie, dass sich unter dieser hohen Hitze das Erdmaterial fragmentiert und verpulvert. Wenn diese Fragmente und Pulver dann im weiteren Verlauf Wasser abbekommen, formen sich Gesteinsklumpen, welche als natürlicher Zement dienen. Die Mesopotamier benutzten diese Technik unter anderem auch für den Bau des Turms von Babel.

Die Römer, welche ein Schlüsselement in der Entwicklung von Zement sind, mussten die Technik des Kalkstein-Betons von den Griechen erlernt haben. Die Römer entwickelten die Technologie weiter und verbreiteten ihr Wissen auf der ganzen Welt. Die neu entdeckte Technologie der Römer basierte auf einem pozzolanbasierten Zement.

Bei Pozzolan handelt es sich um rote, vulkanische Asche, welche aus Vulkanen wie zum Beispiel dem Vesuv stammt. Schon andere Kulturen mischten vor den Römern vulkanische Asche oder ähnliche Materialien in ihre Kalkmörtel, jedoch nutzten sie die möglichen chemischen Reaktionen der Asche nicht. Die Römer hingegen entwickelten mit der gezielten Mischung von gebranntem Kalk und Pozzolan einen pozzolanbasierten Zement, dessen Bindung auf einer hydraulischen Reaktion beruhte. Dieser konnte – im Gegensatz zu herkömmlichem Kalkmörtel – auch unter Wasser aushärten und war dadurch deutlich widerstandsfähiger. Dies ermöglichte eine breitere Anwendung von Beton und somit eine weitaus fortgeschrittenere Architektur. Die Römer bauten Bauwerke wie das Pantheon, das Kolosseum oder Aquädukte wie den Pont du Gard in der Provence mit dieser Technik. Ohne die Erfindung von pozzolanbasiertem Zement wären Bauten wie diese nicht möglich gewesen.

Der englische Name für Beton, *concrete*, kommt ebenfalls von den Römern, er stammt aus dem lateinischen Wort *concretus*, was so viel wie zusammenwachsen bedeutet.

Obschon Beton für die damalige Zeit ein unglaubliches Produkt war und die Römer ihn für Brücken, Strassen, Aquädukte und auch Gebäude benutzten, wurden die Materialien für Zement und Beton nicht gehandelt. Die Römer transportierten den Baustoff nicht überallhin. Man benutzte ihn vor allem dort, wo die Materialien lokal vorkamen. [4]

2.2.1 Herstellung und Funktion von Beton

Herkömmlicher Beton basiert heute noch auf demselben Prinzip wie damals. Er besteht aus etwa 81 % Kies und Sand, 12.5 % Zement und 6.5 % Wasser. Zur Herstellung des Betons werden die vier Materialien gemischt. Der Zement fungiert hier als Bindemittel zwischen Kies und Sand und ermöglicht es, eine gleichmässige Masse zu erhalten. Bei der Zugabe von Wasser bildet der Zement Hydrate, sogenannte Calcium-Silicate-Hydrat-Strukturen, auch C-S-H-Strukturen genannt. Diese verbinden Kies und Sand miteinander und härten den Beton. Die Hydratation wird in Kapitel 3.3. genauer erklärt, dort anhand von M-S-H statt C-S-H, beides verhält sich aber gleich. Der entscheidende Unterschied zwischen modernem Beton und dem der Römer liegt im verwendeten Zement: Es handelt sich hierbei heute um Portlandzement und nicht um Pozzolanement. [5] [6] [7]

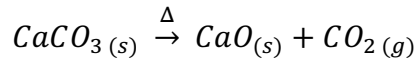
2.3 Der Portlandzement

Nach den Römern stagnierte die Entwicklung von Zement. Im Mittelalter wussten oft nur die Kleriker über die Herstellung Bescheid und benutzten die Technologie fast nur für den Bau von Kirchen. Dies sollte eine gewisse Überlegenheit signalisieren. Erst Ende des 18. Jahrhunderts nahm die Entwicklung von Beton und Zement wieder Fahrt auf. Der englische Ingenieur, James Parker, entwickelte einen auf Kalkstein und Zugabe von Vulkanasche basierenden Beton, welcher innerhalb von 10 Minuten fest wurde. Die Zementforschung erlebte in der Folge einen Aufschwung, und es wurde an anderen Mischverhältnissen und Kompositionen geforscht. Als Testobjekte für die neuen Zemente benutzte man oft Leuchttürme. Die extremen Wetterverhältnisse, denen ein Gebäude wie ein Leuchtturm ausgesetzt ist, waren ideal, um ein neues Beton-Zement-Gemisch aufs Äusserste zu testen.

Der Portlandzement ist der heutzutage meistverwendete Zement. Er wurde 1824 von Joseph Aspdin patentiert. Aspdin mahlte Kalkstein und Lehm zusammen. Unter Zugabe von Wasser fungierte der nun entstandene Zement als Bindemittel für den modernen Beton. Bis heute wird Portlandzement verwendet. Über die Zeit wurde er stetig verbessert und weiterentwickelt – etwa durch Charles Johnson, der die Brenntemperatur von Kalkstein und Lehm auf 1400 °C erhöhte, um Klinker zu erzeugen. Ermöglicht wurde dies jedoch erst durch die ursprüngliche Entdeckung von Joseph Aspdin. Der moderne Herstellungsprozess für Portlandzement ist die Ursache der hohen CO₂-Emissionen von Beton. [4]

2.3.1 Herstellung von Portlandzement

Portlandzement wird heutzutage aus Klinker, Gips und Wasser hergestellt. Klinker ist ein Gemisch aus Calciumoxid, Siliziumdioxid, Aluminiumoxid und Eisenoxid. Das hier benötigte Calciumoxid trägt 54 % der gesamten CO₂-Emission bei, denn um Calciumoxid (CO) herzustellen, nutzt man zurzeit Calciumcarbonat (CaCO₃), welches unter Hitze zu Calciumoxid und Kohlenstoffdioxid reagiert.



Die anderen 46 % der Emissionen werden in den benötigten Öfen für die Zementherstellung durch das Verbrennen von fossilen Brennstoffen emittiert.

Pro Kilogramm Zement werden deswegen etwa 600 Gramm CO₂ frei, was für einen Kubikmeter Beton 200 kg CO₂ bedeutet. Die Herstellung eines Kubikmeters Beton emittiert demnach etwa so viel wie das Verbrennen von 84 Litern Benzin. [7] [8] [9]

3. Theorie

Der Lehmbeeton, welchen das Team unter Dr. Bernard entwickelt, sollte dieselben Eigenschaften wie herkömmlicher Beton aufweisen. Er sollte vor Ort giessbar sein und schnell härten. Traditionelle Lehmbautechniken wie der Stampflehm besitzen diese Eigenschaften nicht, der Lehm ist dort nicht giessbar und die Härtung setzt nicht schnell ein. Um diese Eigenschaften zu erreichen, besteht der Lehmbeeton aus folgenden vier Komponenten.

3.1 Aushubmaterial

Als Aushubmaterial bezeichnet man die Erde, welche auf Baustellen ausgehoben und nicht verwendet wird. Es entsteht also als Abfallprodukt auf Baustellen. Damit sich das Aushubmaterial für die Anwendung im Lehmbeeton eignet, muss es einen zehn- bis dreissigprozentigen Anteil an Lehm (Tonmineralien) haben und gut abgestufte Aggregate. Dies bedeutet, es sollte von jeder Grösse Kies und Sand prozentual etwa die gleiche Menge enthalten sein. In der Schweiz qualifizieren sich aufgrund ihrer Eigenschaften die sogenannte Braunerde und der Podsol gut. Braunerde ist der häufigste Bodentyp im Mittelland, während Podsol eher einer der häufigsten Bodentypen in der Alpenregion ist. Im Querschnitt einer Braunerde (vgl. Abb2.) erkennt man die verschiedenen Bodenhorizonte der Braunerde. Für den Lehmbeeton braucht man vor allem den Horizont C. Horizont O und A sind essenziell für die Landwirtschaft und enthalten viele organische Verbindungen und eignen sich daher nicht als Material für den Lehmbeeton. Horizont B enthält immer noch viele Wurzeln und andere organische Stoffe und ist daher ebenfalls nicht geeignet. Der C-Horizont ist mit Abstand der grösste Horizont, er kann in der Schweiz bis zu 200 Meter Tiefe erreichen. Die EMPA geht davon aus, dass jährlich in der Schweiz 19 Millionen Kubikmeter dieses Aushubmaterials ausgehoben und nicht weiterverwendet werden. [6], [7] [10] [11]

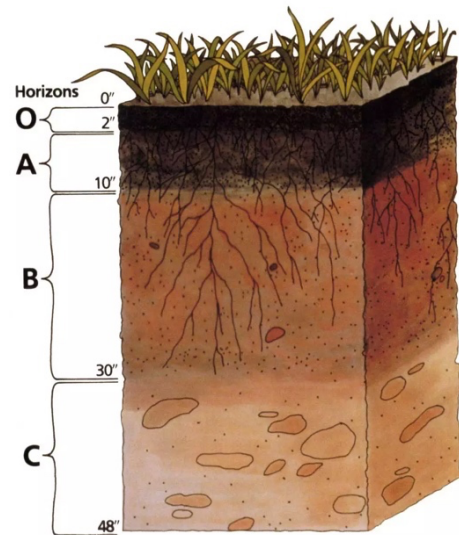


Abbildung 2 Querschnitt einer Braunerde unterteilt in ihre 4-Horizonte (Quelle: <https://www.wald.de/bodenkunde/bodentypen-braunerde/>)

3.1.1 Tonmineralien

Tonmineralien bestehen aus Tetraederschichten und Oktaederschichten. Dabei haben Tonmineralien eine Struktur, welche einem Sandwich gleicht. (vgl. Abb. 3) Sie besteht aus einer Tetraederschicht (in Abbildung 3 violett gefärbt), gefolgt von einer Oktaederschicht (in Abbildung 3 grau gefärbt), worauf wiederum eine Tetraederschicht folgt. Je nach Tonmineral unterscheiden sich die chemischen Verbindungen der Schichten. Beim Tonmineral Illit besteht die Tetraederschicht aus einer Silikat- zw. SiO_2 -Schicht und die

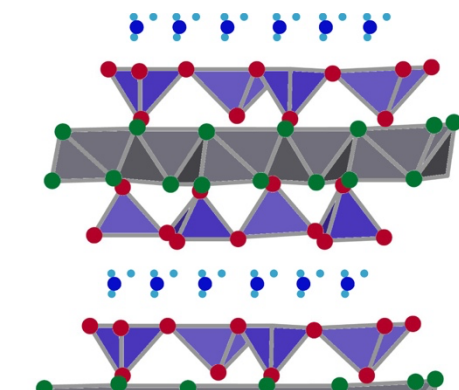


Abbildung 3 Tonmineral Struktur (Quelle: Simon Stuber 04.10.2025)

Oktaederschicht aus einer Aluminium- bzw. Al_2O_3 -Schicht. Zwischen diesen «Sandwiches» befindet sich ein sogenannter Zwischenraum, an dem sich Kationen oder auch Wassermoleküle aufhalten. Da Tonminerale aus Oxiden wie SiO_2 und Al_2O_3 bestehen – also denselben Hauptbestandteilen, aus denen auch Klinker hergestellt wird –, besitzt das Aushubmaterial bereits eine gewisse bindende bzw. reaktive Fähigkeit. Dies sollte den nötigen Zementanteil reduzieren, da die Tonminerale schon eigene Bindungen eingehen können. Tonminerale sind grundsätzlich auf der Ober- und Unterseite negativ und an ihren Kanten positiv geladen. Die Gesamtheit der verschiedenen Tonminerale nennt man Lehm. Ohne Zusatz verbinden sich Tonminerale aufgrund ihrer Ladung quer (Abb.4). So entstehen im Lehmbeton Hohlräume, in denen sich Wasser anlagert und später evaporiert. Wenn das Wasser evaporiert, lässt es diese Hohlräume/Poren zurück, welche den Beton schwächen und sich negativ auf mechanische Eigenschaften auswirken. [6]

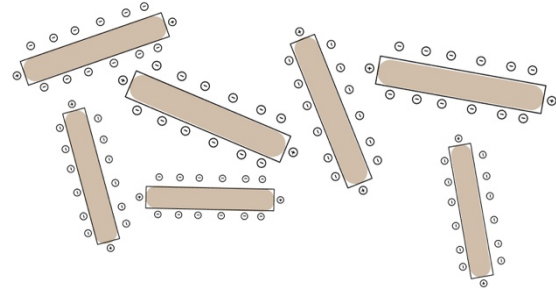


Abbildung 4 Bindung von Tonmineralien untereinander (Simon Stuber, 04.10.2025)

3.2 NaHMP

Natrium-Hexametaphosphat ist ein Salz, bestehend aus sechs Natriumionen und einem Hexametaphosphat-Ion (Abb. 5). Es handelt sich hierbei um einen sogenannten Betonverflüssiger (englisch *superplasticizer*). Für den Lehmbeton sind die Hexametaphosphat-Ionen (in Abbildung 6 blau gefärbt) wichtig. Sie binden an die positiv geladenen Seiten der Tonminerale. Dies verändert die seitliche Ladung der Tonminerale und macht diese negativ. Die rundum negative Ladung der Tonminerale verhindert somit eine verzweigte ungeordnete Struktur (vgl. Abb. 4) und ermöglicht eine bessere Schichtung der Tonminerale in der Betonmischung (vgl. Abb. 6). Dadurch entstehen weniger Poren im getrockneten Beton, da es weniger Stellen gibt, an denen sich Wasser anlagern und anschliessend evaporieren kann. Die Betonmischung fliesst durch diesen Effekt auch schon mit weniger Wasser, weil die Scherkräfte zwischen den einzelnen Tonmineralien viel schwächer sind. Die Tonminerale halten sich somit nicht gegenseitig und ein besserer Fluss wird möglich. Dieser Fluss ist wichtig für den Beton, da der Lehmbeton wie herkömmlicher Beton giessbar sein sollte, jedoch so wenig Wasser wie möglich verwendet werden soll, damit es nicht zu unnötigen Poren kommt. Ein Nebenversuch hat gezeigt, dass mit HMP-Ionen etwa nur halb so viel Wasser benötigt wird wie ohne. Der Nachteil der

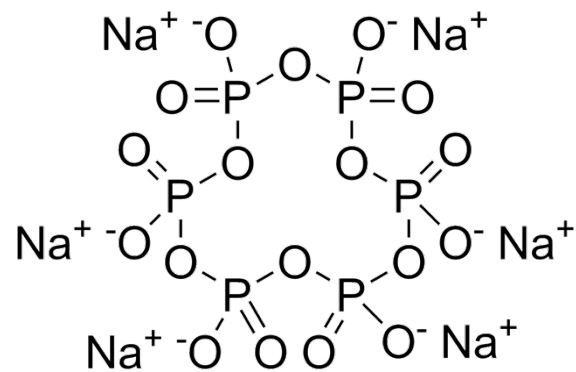


Abbildung 5 Chemische Struktur von NaHMP (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sodium_hexametaphosphate.png, 06.10.2025)

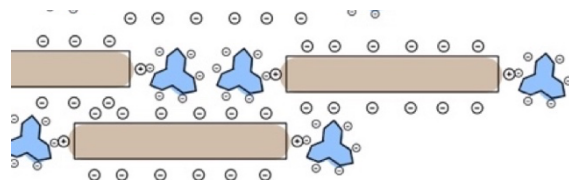


Abbildung 6 HMP-Ionen (blau) an Tonmineralien (braun) gebunden (Simon Stuber, 23.06.2025)

Zugabe von NaHMP ist, dass dadurch die bindende Fähigkeit der Tonmineralien vermindert wird. Dies führt dazu, dass man mehr Zement verwenden muss, als wenn die Tonmineralien auch Aggregate binden würden. [6] [12]

Hergestellt wird NaHMP durch das Erhitzen von einem NaCl- und Phosphorsäure-Gemisch. Das Mischverhältnis beträgt hierbei 1:1 und die Mischung muss auf 650 °C – 700 °C erhitzt werden. Es handelt sich hierbei um eine Schmelzpolymerisation. Da auch für diese Reaktion viel Energie aufgewendet werden muss, versucht man, möglichst wenig NaHMP zu verwenden, um den CO₂-Abdruck möglichst tief zu halten. [13]

3.3 Magnesiumzement

Die Forscher an der EMPA haben festgestellt, dass Zement, welcher auf Magnesiumoxid basiert, im Vergleich zu Portlandzement, im Lehmbeeton bessere mechanische Eigenschaften aufweist und auch weniger NaHMP als chemischen Zusatz benötigt. [12] Dieser Zement besteht aus reaktivem Magnesiumoxid (Magnesia) und einer reaktiven Siliziumquelle wie zum Beispiel Flugasche oder Metakaolin. Das molare Mischverhältnis für den Zement liegt hierbei bei 1.2 Teilen Magnesium zu 1 Teil Silicium. Die wichtigste Eigenschaft des Magnesiumzements ist der Ausfall von Magnesium-Silikat-Hydrat, kurz M-S-H (in Abbildung 7 und 8 rot gefärbt). Bei M-S-H handelt es sich um eine Vorstufe von Tonmineralien, welche bei der Zugabe von Wasser ausfallen. Sie haben dieselbe «Sandwich-Struktur» wie Tonmineralien, wobei die Oktaederschicht aus Magnesium und nicht wie bei Illit aus Aluminium besteht. Es handelt sich hierbei um eine nanokristalline Struktur, daher sind die M-S-H-Schichten viel kürzer als die Tonmineralien. Diese M-S-H bilden sich im Lehmbeeton in den Zwischenräumen der Tonmineralien aus und verbinden die Tonmineralien miteinander, was zu chemischer und hydraulischer Bindung führt. Dies macht den Beton stabiler und auch wasserfest. Zudem füllen die M-S-H-Schichten allfällige Poren, die durch evaporiertes Wasser entstehen (vgl. Abb.7). Die Kombination von M-S-H und den HMP-Ionen optimiert den Beton, da er nun fast keine porösen Hohlräume hat und die Tonmineralien gut querverbunden sind (vgl. Abb.8) [6]

Dass der MgO-Zement weniger NaHMP als der Portlandzement benötigt, ist mit Blick auf die CO₂-Bilanz ein Vorteil, da die Herstellung von NaHMP auch einigermassen viel CO₂ freisetzt. Zudem wird im Vergleich zum Portlandzement bei dem MgO-Zement nicht Calciumoxid benötigt. Dies sollte die Umweltbilanz wiederum positiv beeinflussen. Jedoch wird momentan Magnesiumoxid auch nicht nachhaltig gewonnen. Zurzeit wird Magnesiumoxid aus Magnesit (MgCO₃) gewonnen. Diese Gewinnung verursacht viel CO₂, da unter Zugabe von Hitze MgCO₃ zu MgO und CO₂ reagiert. Wie schon bei der Herstellung von Calciumoxid für den Portlandzement wird

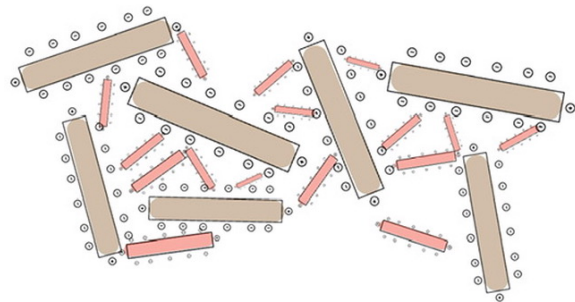


Abbildung 7 M-S-H(rot) als Bindemittel in für Tonmineralien (braun) (Simon Stuber, 04.10.2025)

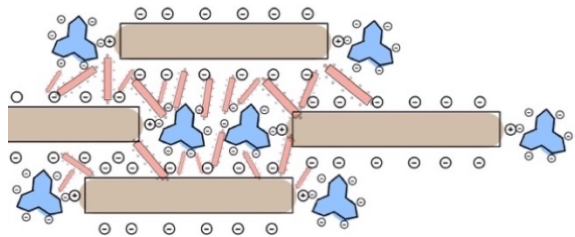


Abbildung 8 Kombination von HMP-Ionen und M-S-H im Lehmbeeton (Simon Stuber, 23.06.2025)

hier sowohl für den Betrieb der Öfen als auch als Nebenprodukt in der Reaktion CO_2 frei. [14] Würde man aber auf Magnesiumsilikatgestein als Magnesiumoxidquelle wechseln, wäre die Gewinnung deutlich weniger CO_2 -emittierend. Hier handelt es sich nicht um eine endotherme Reaktion, welche viel Energie beansprucht, sondern um eine Reaktion, die durch Zugabe von Salzsäure und später Natronlauge abläuft. [15] Eine andere mögliche Quelle wäre die zurückgebliebene Sole in der Salzförderung. Die darin enthaltenen Mg^{2+} -Ionen könnte man durch Zugabe von Natronlauge in $\text{Mg}(\text{OH})_2$ umwandeln. Das gewonnene Magnesiumhydroxid kann man durch Hitze zu Magnesiumoxid reagieren lassen. [16] Würden diese Methoden in Zukunft breiter zur Anwendung kommen, würde die Herstellung von MgO Schätzungen zu Folge nur noch 20 % so viel CO_2 ausstossen wie jetzt. [12]

3.4 Wasser

Wasser benötigt der Beton für das Hydratisieren der M-S-H und das Lösen der HMP-Ionen. Zudem muss für eine giessbare Konsistenz Wasser in der Mischung enthalten sein. Man versucht aber den Wassergehalt so tief wie möglich zu halten, da das Wasser nach Evaporation Poren hinterlässt. Für den Versuch wird milliQ Wasser benutzt, dies ist noch reiner als entionisiertes Wasser, da es zum Beispiel auch kein CO_2 mehr enthält. Bei einer späteren Anwendung mit grösseren Einheiten, würde normales Wasser benutzt werden. [6]

3.5 Biegezugfestigkeit

Die Definition der Biegezugfestigkeit lautet: «Die als Biegezugfestigkeit definierte Kenngrösse bezeichnet die maximale aufnehmbare Spannung eines biegbaren Werkstoffs – hier des Betonprismas – bei gleichzeitiger Beanspruchung auf Biegung bis knapp unter den Punkt, an dem der Werkstoff unter Einwirkung von Zugkraft reisst.» [17] Die zur Biegezugfestigkeit (σ_f) gehörende Einheit nennt sich Megapascal oder N/mm^2 . Für die Berechnung benutzt man die Formel:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2b * d^2}$$

Wobei F für die maximale Bruchlast in *Newton*, L für die Stützweite in *mm*, b für die Breite in *mm* und d für die Dicke in *mm* des Prüfkörpers steht. [18] Die Sika, ein Schweizer Betonproduzent, geht bei herkömmlichem Beton von einer Biegezugfestigkeit zwischen 2 und 7 Megapascal aus. [19]

Die Biegezugfestigkeit ist eine wichtige Kenngrösse im Bauwesen, weil viele Bauteile wie Platten, Brücken oder Balken nicht nur Druck, sondern auch Biegebeanspruchungen ausgesetzt sind. Beton weist im Allgemeinen eine hohe Druckfestigkeit, jedoch eine geringe Biegezugfestigkeit auf. Deshalb ist es interessant zu untersuchen, wie sich Lehmbecon unter Biegebelastung verhält. In der Praxis wird die geringe Biegezugfestigkeit von herkömmlichem Beton meist durch eine Verstärkung mit Stahl oder Glasfasern kompensiert. Für alternative Betonarten, wie Lehmbecon ist diese Kenngrösse vor allem wichtig, um abschätzen zu können, ob zusätzliche Verstärkungen notwendig wären oder ob das Material auch ohne Bewehrung einsetzbar wäre.

3.6 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit (σ_c) beschreibt den maximalen Druck, der auf ein Material ausgeübt werden kann, bevor es Risse erleidet. Sie wird in Megapascal angegeben. Die Druckfestigkeit ist für Baustoffe wie Beton besonders wichtig, da Betonwände dieser Druckkraft am meisten ausgeliefert sind. Als grobe Faustregel gilt, dass eine tragende Mauer 3 Megapascal pro Stockwerk aushalten können sollte. Herkömmlicher Beton wird je nach Druckfestigkeit in verschiedene Druckfestigkeitsklassen eingeteilt. Dabei ist die Klasse C8/10 die schwächste mit einer Druckfestigkeit von 8 Megapascal und die Klasse C100/115 die stärkste mit mindestens 100 Megapascal. [6] [20]

Zur Berechnung benutzt man die Formel:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

Wobei hier A für die Querschnittsfläche in mm^2 der Probe und F für die maximale Bruchlast in *Newton* steht. [21]

3.7 Hygroskopie

Die Hygroskopie verweist auf die Fähigkeit eines Materials, Wasserdampf aufzunehmen oder auch abzugeben, in Relation zu Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Beim Lehmbeeton ist die Relation zur Luftfeuchtigkeit wichtig. Durch eine hohe hygroskopische Fähigkeit kann das Material als Luftfeuchtigkeitspuffer wirken. Dies hilft somit dabei, die relative Luftfeuchtigkeit eines Raumes einigermaßen stabil zu halten. Zusätzlich reduziert es auch das Risiko von Schimmelbildung. Je höher die hygroskopische Eigenschaft eines Materials, desto höher ist also dieser Puffereffekt. Materialien wie Lehm oder Holz sind für hygroskopische Fähigkeiten bekannt. Für Lehmbeeton ist die Hygroskopie deshalb ein möglicher positiver Zusatznutzen, der ihn von herkömmlichem Beton unterscheidet. [22]

3.8 Wasserresistenz

Wasserresistenz bedeutet, dass sich der Werkstoff bei Kontakt mit Wasser nicht verändert, sondern seine Form und Eigenschaften behält. Die Wasserresistenz ist eine entscheidende Eigenschaft für Baustoffe, die im Freien verwendet werden. Betonbauteile sind ständig Regen, Bodenfeuchtigkeit und Frost-Tau-Zyklen ausgesetzt. Ist ein Material nicht wasserresistent, verliert es rasch an Festigkeit und zerfällt. Bei Lehmbeeton ist dies besonders kritisch, da Lehm Wasser aufnehmen und sich verformen kann. Der Zusatz von MgO-Zement soll dieses Problem durch die Bildung von M-S-H-Phasen lösen, die die Struktur des Betons stabilisieren.

3.9 Schwinden

Schwinden bezeichnet den Volumenverlust, welcher während der Härtung des Betons geschieht. Dieser kommt durch das Evaporieren von Wasser zustande, welches nicht hydratisiert wurde. Das hydratisierte Wasser bindet sich in den M-S-Hydraten, wo es nicht mehr evaporieren kann. Während überflüssiges Wasser in der Betonmischung bei der Härtung evaporiert und zur Porenbildung wie zu einem Volumenverlust, dem Schwinden, beiträgt. Das Schwinden des Betons ist ein Problem, da beim Bau einer Wand das Schwinden dazu führt, dass die Wand kürzer sein wird als geplant und Lücken zwischen anderen Wänden hinterlässt. Daher will man das Schwinden möglichst nahe bei null haben.

4. Methodik

4.1 Ziel

Der Versuch vergleicht vier verschiedene Mischverhältnisse von Aushubmaterial zu Zement auf mechanische Bruchfestigkeit, Druckfestigkeit und Hygroskopie. Das Ziel ist es, auf das optimale Mischverhältnis schliessen zu können, damit der Lehmbeeton sowohl mechanisch als auch hygroskopisch gute Eigenschaften aufweist. Dabei werden die einzelnen Mischverhältnisse in Prismen mit den Dimensionen 2.5 cm x 2.5 cm x 10 cm gegossen und anschliessend unter einer hydraulischen Presse auf Bruch- sowie Druckfestigkeit geprüft. Anschliessend wird die jeweilige Hygroskopie der Proben mit einem Hygrometer ermittelt. Dafür benutzt man die Methode der Dynamic Vapor Sorption (DVS). Zudem wird das Schwinden der Proben sowie die Wasserresistenz beobachtet.

Für den Versuch werden diese vier Mischverhältnisse verglichen:

	Anteil Aushubmaterial	Anteil MgO-Zement
Probe 1	100.00%	0.00%
Probe 2	92.50%	7.50%
Probe 3	85.00%	15.00%
Probe 4	50.00%	50.00%

Abbildung 9 Mischverhältnisse Aushubmaterial zu Zement der Proben

4.2 Materialien

- 1150 Gramm Aushubmaterial
- 310.1 Gramm Magnesiumoxid
- 31 Gramm Material X
- 307 Gramm Flugasche
- 152.9 Gramm Metakaolin
- 4.6 Gramm NaHMP
- 280 Gramm milliQ Wasser
- 3 Gramm ionenarmes Wasser
- Wasser
- Planetenrührmaschine Marke Hobart Katalog Nr. N-50-619
- 8 Gussformen an jeweils 2.5cm x 2.5cm x 10cm
- Vibriertisch Marke TESTING Katalog Nr. 1.0220.01U-SO2
- 3D-Schüttelmischer Marke WAB Model: T 2 G
- 50 kN Hydraulische Presse Marke Walter + Bai AG
- 3-Punkt-Biegezugversuchszubehör für 50 kN Hydraulische Presse
- Druckvorrichtung Marke Toni Technik
- DVS Marke Porotec Modell GraviSorp 120 changer
- Schieblehre
- Analysewaage Ablesbarkeit: 0,0001 g
- Küchenwaage

4.3 Herstellung MgO-Zement

Für die Herstellung des MgO-Zements gibt man 310.1 Gramm Magnesiumoxid, 307 Gramm Flugasche, 152.9 Gramm Metakaolin und 31 Gramm des Material X (genaue Formulierung auf Grund patentrechtlicher Gründe nicht bekannt) in einen Behälter und lässt sie mittels Planetenrührmaschine für 30 Minuten homogenisieren. Die Planetenrührmaschine sorgt dafür, dass trotz verschiedener Grösse der Partikel, die Endmischung gleichmässig ist.

4.4 Vorbereitung NaHMP Lösung

Für jede Probe wird zusätzlich eine unterschiedliche Menge von in Wasser gelöstem NaHMP zugegeben. Dafür werden insgesamt 4.6 Gramm NaHMP eingewogen und in 280 Gramm milliQ Wasser gelöst. Pro Probe wird immer so viel Lösung hinzugegeben, bis die Betonmasse verarbeitbar ist. Da es einen Moment dauern kann, bis die HMP-Ionen an den Tonmineralien binden und die Mischung fliessbarer wird, sollte man nicht zu schnell die zugegebene Menge an Lösung erhöhen.

4.5 Herstellung Lehmbeeton

Der Massenanteil des Betons sollte immer 350 Gramm entsprechen. Daraus ergeben sich die folgenden Massen für die jeweilige Probe:

	Menge Aushubmaterial	Menge MgO-Zement
Probe 1	350g	0g
Probe 2	323.75g	26.25g
Probe 3	297.5g	52.5g
Probe 4	175g	175g

Abbildung 10 Massenanteil der verschiedenen Komponenten pro Probe

Von jedem Mischverhältnis wurden zwei Proben gegossen. Für die Auswertung wurde jeweils nur eine Probe getestet, während die zweite als Anschauungsmaterial behalten wurde.

4.5.1 Zubereitung Probe 1

Um den Beton zu erhalten, gibt man die 350 Gramm Aushubmaterial zusammen mit 35 Gramm der NaHMP-Lösung in eine Schüssel und mischt diese Probe mit der Planetenrührmaschine, bis sie eine verarbeitbare Konsistenz hat. Anschliessend spannt man die Gussform auf den Vibriertisch und gibt unter ständiger Vibration schichtweise den Beton in die Form. Die Vibration dient dazu, dass sich Luftbläschen lösen und sich der Beton gut setzen kann. Anschliessend wird die Probe für 24 Stunden in einen Raum mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90 % gegeben. Nach

den 24 Stunden wird die Probe in einen Raum mit 70 % relativer Luftfeuchtigkeit für 48 Stunden gegeben.

4.5.2 Zubereitung Probe 2

Da sich in Probe 2, Probe 3 und Probe 4 Zement befindet, sollten die Proben immer für die gleiche Zeit gemischt werden, da das Mischen den Ausfall von M-S-H unterbricht und somit die Stabilität zu einem kleinen Teil verschlechtert. Damit also alle Proben dieselben Voraussetzungen haben, sollte für etwa 3 Minuten gemischt werden, bevor man die Masse in die Gussform gibt. Für das Mischen gibt man die 323.75 Gramm Aushubmaterial mit den 26.25 Gramm MgO-Zement und im Fall von Probe 2 40 Gramm der Lösung in eine Schüssel und rührt alles von Hand für 3 Minuten, bis die Masse eine verarbeitbare Konsistenz aufweist. Danach wird die Masse auf dem Vibriertisch unter Vibration schichtweise in die Gussform gegeben. Anschliessend wird die Probe für 48 Stunden in einen Raum mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 98 % gegeben.

4.5.3 Zubereitung Probe 3

Für Probe 3 gibt man 297.5 Gramm Aushubmaterial, 52.5 Gramm MgO-Zement und 55 Gramm der Lösung in eine Schüssel und rührt alles von Hand für 3 Minuten, bis die Masse eine verarbeitbare Konsistenz aufweist. Danach wird die Masse auf dem Vibriertisch unter Vibration schichtweise in die Gussform gegeben. Anschliessend wird die Probe für 48 Stunden in einen Raum mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 98 % gegeben.

4.5.4 Zubereitung Probe 4

Für Probe 4 gibt man 175 Gramm Aushubmaterial, 175 Gramm MgO-Zement, 117 Gramm der Lösung und weitere 3 Gramm ionenarmes Wasser in eine Schüssel und rührt alles von Hand für 3 Minuten, bis die Masse eine verarbeitbare Konsistenz aufweist. Danach wird die Masse auf dem Vibriertisch unter Vibration schichtweise in die Gussform gegeben. Anschliessend wird die Probe für 48 Stunden in einen Raum mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 98 % gegeben.

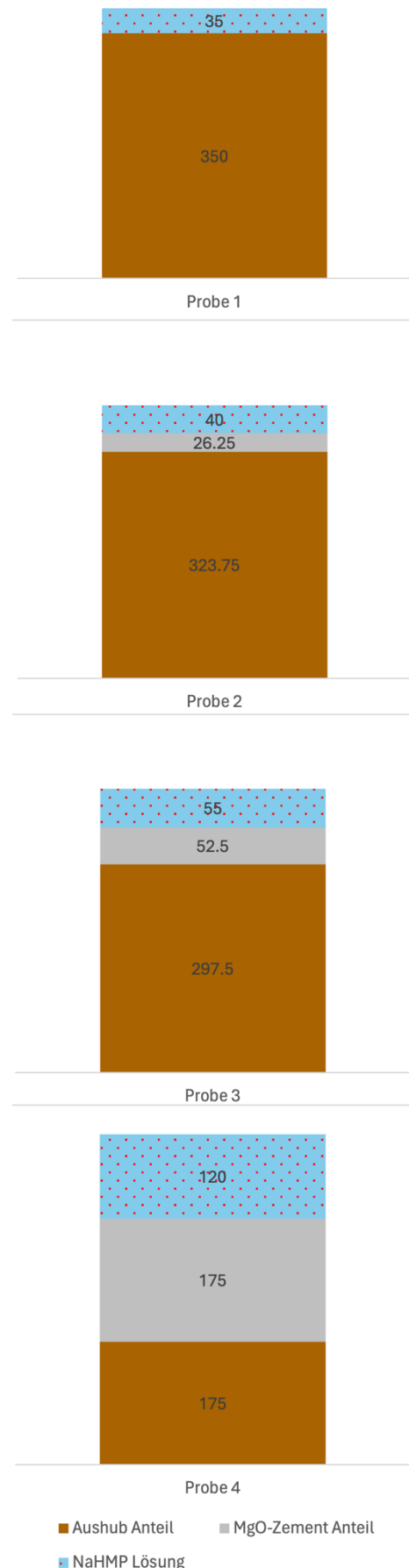


Abbildung 11: Menge der jeweiligen Komponente in Gramm (Quelle: Simon Stuber, 24.06.2025)

Die hohe relative Luftfeuchtigkeit benötigt der Beton, um die maximale Menge an Wasser aus der Luft aufnehmen zu können und dadurch die maximale Menge an M-S-H hydratisieren zu können. Dadurch kann die Leistung des Zementes verstärkt werden. Da Probe 1 keinen Zement beinhaltet, der M-S-H hydratisiert, muss Probe 1 nicht in den Raum mit 98 % relativer Luftfeuchtigkeit. Stattdessen muss Probe 1 in einen Raum, in dem die Luftfeuchtigkeit stabil ist, damit man standardisiert eine Aussage treffen kann.

Nach den 48 beziehungsweise 72 Stunden werden alle Proben aus ihrer Form genommen. Die Proben sind nun hart. Man beschriftet die Proben mit Kreide, bestimmt mit einer Schieblehre die Dimensionen der Prismen und berechnet ihr Volumen. Bei mehreren Prismen pro Probe kann noch das Durchschnittsvolumen berechnet werden.

4.6 Biegezugfestigkeit

Um die Proben zu testen, müssen diese mindestens 28 Tage gelagert werden. Dies ist in der Industrie Standard. Daher wird Probe 1 in einen Raum mit 57 % relativer Luftfeuchtigkeit und Proben 2-4 in den ersten 2 Wochen in einen Raum mit 98 % und anschliessend in einen Raum mit 57 % Luftfeuchtigkeit gegeben. Dort bleiben die Proben, bis sie geprüft werden. Dieser Schritt ist nicht nur für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit wichtig, sondern für alle folgenden Tests. In unserem Fall wurden die Proben 38 Tage lang gelagert.

Um die Biegezugfestigkeit zu überprüfen, benötigt man eine hydraulische Presse mit einem 3-Punkt-Biegezugversuchszubehör. Sodass das Prisma an beiden Enden hochgehalten und in der Mitte von oben Druck ausgeübt wird (Abb. 12). Dabei benutzt man ein Programm, welches die Kraft, mit der die hydraulische Presse wirkt, stetig erhöht. Sobald der Widerstand des Betonprismas nachgibt, stellt die Presse ab. Die Kraft wird in Kilonewton gemessen. Als Resultat erhält man die höchste Kraft, welche das Prisma aushält, bevor es in der Mitte bricht. Diese Kraft nennt man maximale Bruchlast (F). Die Stützweite (L) ist auf 75 mm eingestellt. Die Dimensionen (Breite und Dicke) der jeweiligen Proben variieren, da nicht alle das gleiche Schwindverhalten aufweisen. Anschliessend gibt man alle Komponenten in die Formel und erhält die Biegezugfestigkeit in Megapascal. Ein Bild des echten Versuchsaufbaus befindet sich im Anhang, Abbildung 23.

Zu erwarten ist, dass mit zunehmendem MgO-Zement-Anteil, auch die Biegezugfestigkeit zunimmt.

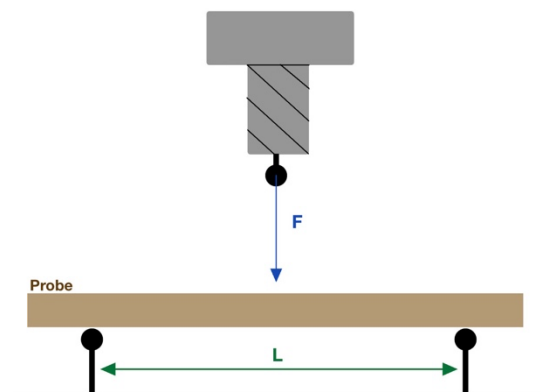


Abbildung 12 Versuchsaufbau Biegezugfestigkeit
(Quelle: Simon Stuber, 04.10.2025)

4.7 Druckfestigkeit

Um die Druckfestigkeit zu überprüfen, benutzt man die eine Hälfte des im Biegezugfestigkeitstest geteilten Prismas. Zudem benutzt man dieselbe hydraulische Presse. Diesmal braucht man als Zubehör eine Druckvorrichtung. Diese erlaubt es, den Druck gleichmässig auf das Prisma zu verteilen (Abb. 13). Auch für diesen Test wird ein Programm benutzt, welches stetig die auszuübende Kraft der Presse auf das Prisma erhöht, bis das Prisma nachgibt. Dieser Prozess lässt sich gut nachvollziehen beim Betrachten der

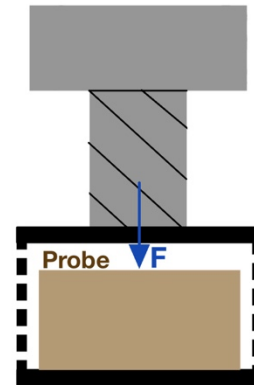


Abbildung 13 Versuchsaufbau Druckfestigkeit
(Quelle: Simon Stuber, 04.10.2025)

Abbildungen 31, 32, 33 und 34 im Anhang. Dort zu sehen ist die stetige Erhöhung der Kraft bis zu dem Punkt, an dem das Prisma nachgibt. Die maximale Drucklast wird anschliessend durch die Querschnittsfläche des Prismas geteilt. Dabei erhält man die Druckfestigkeit in Megapascal. Ein Bild des echten Versuchsaufbaus befindet sich im Anhang, Abbildung 24. Zu erwarten ist, dass, wenn der MgO-Zement Anteil zunimmt, auch die Druckfestigkeit zunimmt.

4.8 Hygroskopie

Zur Bestimmung der hygroskopischen Eigenschaften wird die Methode der Dynamic Vapor Sorption (DVS) angewendet. Dabei handelt es sich um ein gravimetrisches Verfahren, bei dem die Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit präzise erfasst wird. Die Messungen werden mit einem vollautomatischen GraviSorp 120 (Porotec) durchgeführt. Das Gerät erlaubt die simultane Untersuchung der vier Proben bei relativen Luftfeuchtigkeiten zwischen 0.1 % und 98 % und Temperaturen von 20-40 °C. Als Probenmaterial dienen die bei der Druckfestigkeitsprüfung entstandenen Bruchstücke, die in separate Probenschalen hineingegeben werden. Die Messung beginnt bei 30 % relativer Luftfeuchtigkeit; anschliessend wird die Luftfeuchtigkeit schrittweise bis 95 %, danach bis 10 % und schliesslich wieder auf 30 % variiert. Nach jeder Änderung der Luftfeuchtigkeit werden die Proben erneut gewogen, bis sich ein stabiles Gewicht eingestellt hat. Erst dann wird zur nächsten Feuchtigkeitsstufe gewechselt. Die Messungen erfolgen bei 20 °C und konstantem Luftstrom (1 m/s). Aus diesen wiederholten Gewichtsmessungen entstehen Kurven, die den Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Wasseraufnahme bzw. -abgabe zeigen. Solche Kurven werden als Sorptionskurve (bei steigender Feuchtigkeit) und Desorptionskurve (bei sinkender Feuchtigkeit) bezeichnet. Sie machen sichtbar, in welchem Umfang die einzelnen Mischungen als Feuchtigkeitspuffer wirken. [6] Die Einheit zur Angabe der Gewichtsänderung ist das Massenprozent (Massen-%). Es beschreibt, wie stark die Masse einer Probe im Vergleich zu ihrem ursprünglichen Wert prozentual zunimmt oder abnimmt. Eine skizzierte Darstellung des Funktionsaufbaus einer DVS befindet sich in Abbildung 14 auf der nächsten Seite. Bilder des echten Versuchsaufbaus befinden sich im Anhang in Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27.

Zu erwarten ist, dass mit zunehmendem MgO-Zement-Anteil, die hygroskopische Fähigkeit abnimmt.

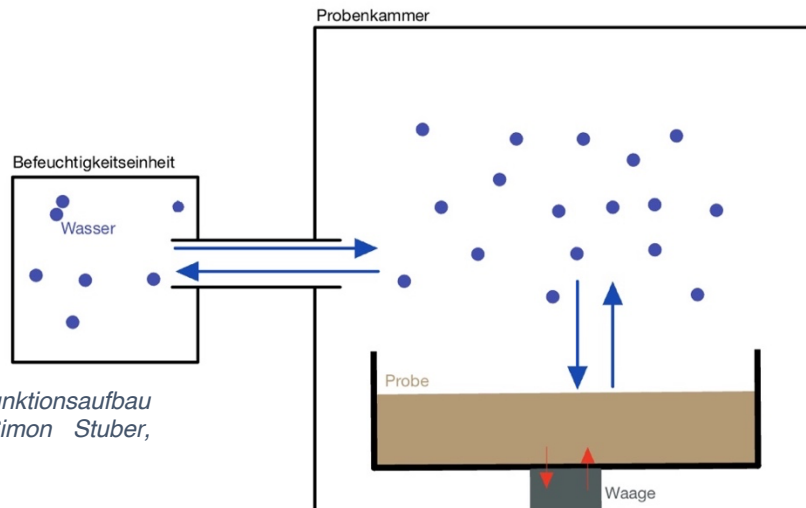


Abbildung 14 Funktionsaufbau DVS (Quelle: Simon Stuber, 04.10.2025)

4.9 Wasserresistenz

Für den Test wird die Hälfte der Probe, welche nicht für die Druckfestigkeit benutzt wurde, für 30 Minuten vollständig in Wasser eingetaucht. Befindet sich die Probe nach dieser Zeit noch im ursprünglichen Zustand, qualifiziert sich das jeweilige Mischverhältnis als wasserresistent. Nach 10 und 20 Minuten werden die Proben kurz aus dem Wasser genommen, um den zeitlichen Verlauf zu beobachten. Die Wasserresistenz vom Lehmbeeton beruht auf der Bildung von M-S-Hydraten bei der Hydratation des MgO-Zements. Diese nehmen deutlich weniger Wasser auf als reine Tonminerale und stabilisieren dadurch das Gefüge. Ist die Wasseraufnahme ohne M-S-H zu hoch, können sich die Tonminerale im Innern lösen, was zum Zerfall der Probe führt. [6]

Zu erwarten ist demnach, dass die Proben 2-4 den Test bestehen werden.

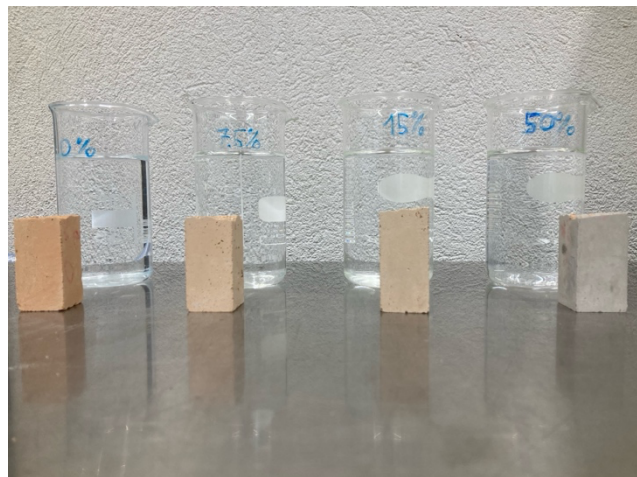


Abbildung 15 Versuchsaufbau Ermittlung Wasserresistenz (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)

4.10 Schwinden

Das Schwinden der Proben berechnet man, indem man das Volumen der Probe nach 2 Tagen mit dem Volumen der fertigen Probe – in unserem Fall nach 38 Tagen – vergleicht. Diese Vorgehensweise lehnt sich an die Normen für konventionellen Beton an, bei denen ebenfalls Zeiträume von 28 Tagen und länger berücksichtigt werden. Subtrahiert man nun das Volumen der fertigen Probe von dem Volumen nach 2 Tagen, erhält man das geschwundene Volumen. Da jeweils zwei Prismen gegossen wurden, kann man zusätzlich das durchschnittliche Schwindverhalten berechnen. Weil das Hydratisieren von M-S-H Wasser benötigt, evaporiert bei den Proben mit Zement weniger Wasser. Somit sollte der Lehmbeeton mit höherem Zementanteil auch weniger schwinden. Dies stellt schon das erste Problem des Lehmbetons dar, denn mehr Zement bedeutet auch mehr CO₂. Wenn also Lehmbeeton nur anwendungsfähig wird, durch Zumischung von viel Zement, verliert der Lehmbeeton seinen Vorteil – die niedrige CO₂-Emission – gegenüber dem herkömmlichen Beton.

5. Resultate

5.1 Biegezugfestigkeit

Die Ergebnisse in Abbildung 28 im Anhang zeigen, dass Probe 1 mit 1.40 Megapascal klar die schwächste Biegezugfestigkeit aufweist. Mit zunehmendem Zementanteil steigt auch die Biegezugfestigkeit; Probe 2 weist schon eine Zugfestigkeit von 1.76 MPa auf, was schon 0.36 MPa mehr sind als Probe 1. Weitere 0.44 MPa stärker ist Probe 3, bei der eine Biegezugfestigkeit von 2.20 MPa gemessen wurde. Probe 4 hat die deutlich stärkste Biegezugfestigkeit. Mit 3.51 MPa ist sie ganze 1.31 MPa höher als die von Probe 3.

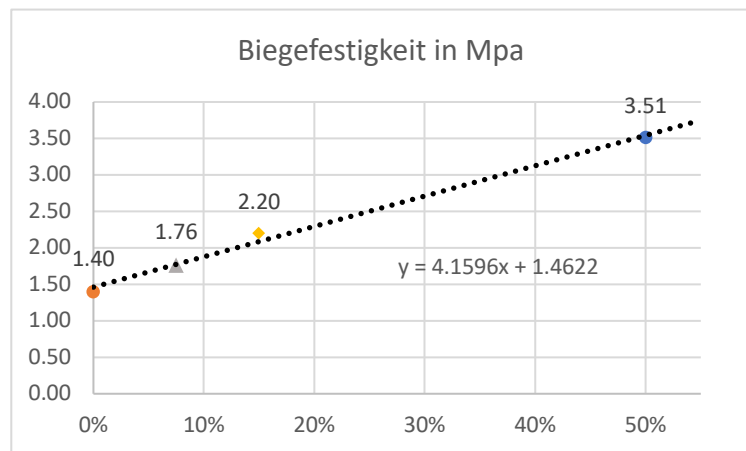


Abbildung 16 Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom Mischverhältnis des MgO-Zements

Betrachtet man die unterschiedlichen Werte in einem Koordinatensystem wie in Abbildung 16, ergibt sich eine Trendlinie mit der Funktionsgleichung:
 $y = 4.1596x + 1.4622$.

5.2 Druckfestigkeit

Die Ergebnisse in Abbildung 29 im Anhang zeigen, dass Probe 1 mit 4.17 Megapascal die schwächste Druckfestigkeit hat. Probe 2 hat bereits eine Druckfestigkeit von 8.29 MPa und somit fast doppelt so viel. Darauf folgt mit 14.15 MPa Probe 3, welche somit eine um 5.86 MPa höhere Druckfestigkeit hat als Probe 2. Auch hier ist Probe 4 mit 22.9 MPa die stärkste Probe. Sie hat eine um insgesamt 8.75 MPa stärkere Druckfestigkeit als Probe 3.

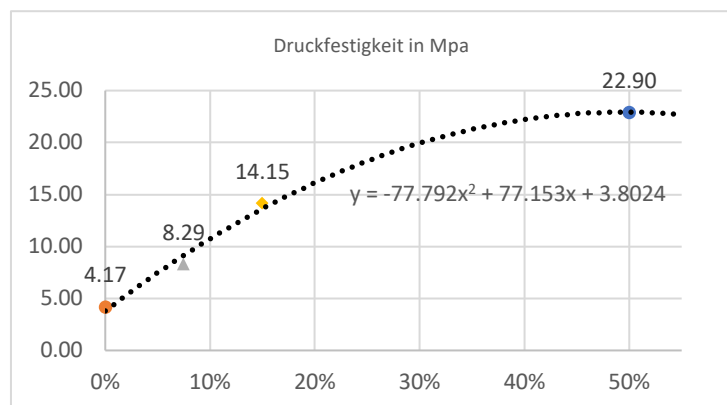


Abbildung 17 Druckfestigkeit in Abhängigkeit von dem Mischverhältnis des MgO-Zements.

Betrachtet man die unterschiedlichen Werte in einem Koordinatensystem wie in Abbildung 17, ergibt sich eine Trendlinie mit der Funktionsgleichung:
 $y = -77.792x^2 + 77.153x + 3.8024$.

5.3 Hygroskopie

Betrachtet man die Sorptionskurve in Abbildung 18, erkennt man, dass Probe 4 mit 8.2 Massenprozent am meisten Feuchtigkeit aufnehmen kann. Probe 3 kann mit 2.8 Massenprozent am zweitmeisten Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen. Dies sind 5.4 Masse-% weniger. Nochmals 1.2 Masse-% weniger Feuchtigkeit aufnehmen kann Probe 2 mit 1.6 Masse-%. Probe 1 nimmt 0.4 Masse-% weniger auf und kann somit mit insgesamt 1.2 Masse-% am wenigsten Wasser aufnehmen. In Abbildung 19 wird das Ganze nochmals dargestellt. Hier ist das Koordinatensystem auf 50% Luftfeuchtigkeit referenziert, sodass man sieht, wie viel Wasser jede Probe abgeben respektive aufnehmen kann, nachdem sie bei 50% Luftfeuchtigkeit gewesen ist. Probe 1 kann 0.7 Masse-% aufnehmen und 0.4 Masse-% abgeben. Probe 2 kann 0.9 Masse-% aufnehmen und 0.7 Masse-% abgeben. Probe 3 kann 1.4 Masse-% aufnehmen und 1.4 Masseprozent abgeben. Und Probe 4 kann 3.1 Masse-% aufnehmen und 4.7 Masse-% abgeben.

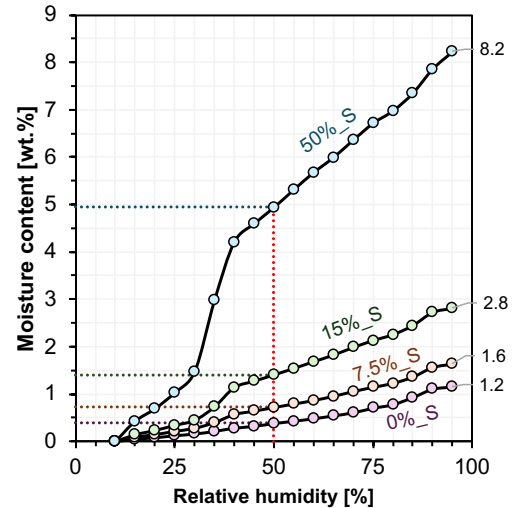


Abbildung 18 Sorptionskurve der Hygroskopie
Messung auf 10 % referenziert

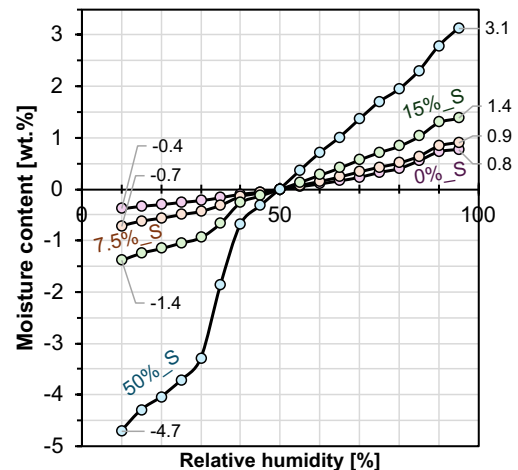


Abbildung 19 Sorptionskurve der Hygroskopie
Messung auf 50 % referenziert

5.4 Schwinden

Beim Betrachten von Abbildung 35 im Anhang lässt sich erkennen, dass Probe 3 mit durchschnittlich 3.58 % am stärksten schwindet. Wobei die Differenz zwischen Probe 3a und 3b etwa 1 % beträgt. Am zweitmeisten schwindet im Durchschnitt Probe 1 mit 3.1 %, hier beträgt die Differenz zwischen 1a und 1b 0.53 %. Probe 4 schwindet am zweitwenigsten, durchschnittlich 2.17 Prozent. Die Differenz von Probe 4a und 4b beträgt 0.17 %. Probe 2 schwindet am wenigsten, im Durchschnitt nämlich 2.09 %. Jedoch ist die Differenz zwischen 2a und 2b mit 2.73 % am höchsten. Abbildung 30 zeigt die Veränderung des Volumens in 38 Tagen. Hierbei fällt auf, dass Probe 1 und Probe 2 ein deutlich tieferes Volumen bei der 1. Messung haben als Probe 3 und Probe 4.

5.5 Wasserresistenz

Die Abbildung 20 zeigt das Zwischenergebnis des Wasserresistenz-Tests nach 10 Minuten. Man erkennt, dass die Proben 2-4 alle noch intakt sind. Nur bei Probe 1 lässt sich erkennen, dass sich der Prüfkörper verändert hat. Er sieht ausgewaschener aus und ist nicht mehr glatt. Abbildung 21 zeigt das Zwischenergebnis nach 20 Minuten. Auch hier scheinen die Proben 2-4 noch voll intakt und Probe 1 scheint noch kleiner geworden zu sein. Abbildung 22 zeigt das Endergebnis des Tests nach 30 Minuten. Proben 2-4 sind immer noch wie am Anfang des Versuchs. Probe 1 ist nun noch kleiner geworden, man erkennt einzelne Steine in der Struktur und das Wasserbad der Probe 1 ist hellbraun gefärbt.

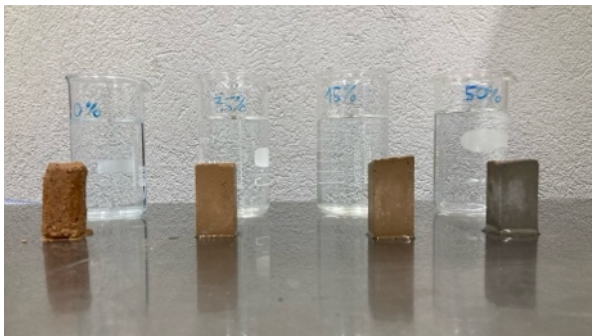


Abbildung 20 Proben nach 10 Minuten im Wasser
(Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)

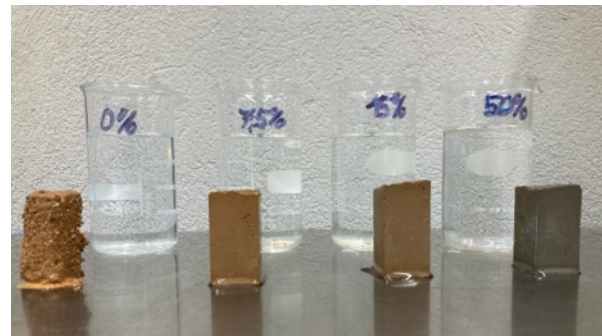


Abbildung 21 Proben nach 10 Minuten im Wasser
(Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)

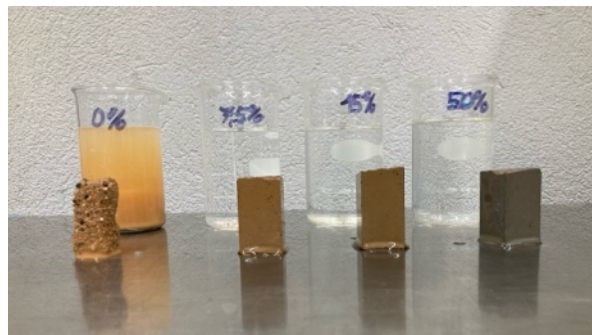


Abbildung 22 Proben nach 30 Minuten im Wasser
(Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)

6. Diskussion

6.1 Biegezugfestigkeit

Betrachtet man die einzelnen Resultate und vergleicht sie mit dem Richtwert der Sika, erkennt man, dass Probe 1 und 2 die Untergrenze von 2 Megapascal nicht erreichen. Somit wäre dieses Mischverhältnis nicht geeignet für eine gute Stabilität. Probe 3 und 4 sind jedoch im Bereich von normalem Beton, wenngleich eher im unteren Bereich. Dies zeigt, dass ein MgO-Zement-Anteil von 7.5 % nicht genügt, um den Lehmbe- ton in Bezug auf Biegezugfestigkeit konkurrenzfähig zu machen. Allgemein ist aber die Biegezugfestigkeit nicht die wichtigste Kerngrösse für Beton. Da diese allgemein eher tief ist und in der Regel durch das Einarbeiten von Stahl oder Glasfaser in den Beton die Biegezugkraft erhöht werden muss. Diese Technik würde sicher auch dem Lehmbe- ton der Probe 2, sowie auch Probe 1, ermöglichen, eine genügend hohe Biegezugfestigkeit zu erreichen. Das Hauptproblem liegt hierbei in der CO₂-Bilanz, da diese durch die Verwendung von Stahl auch steigt und der Vorteil von Lehmbe- ton kleiner wird.

Wichtig ist ausserdem die Funktionsgleichung der Trendlinie. Es handelt sich hierbei um eine lineare Funktion, was auf eine Proportionalität, bezüglich MgO-Zement-Anteil und Biegezugfestigkeit hindeutet. Diese Linearität kann man für die Berechnung eines Mischverhältnisses nutzen. Dies kann für die gezielte Einstellung einer spezifischen Biegezugfestigkeit nützlich sein. Dafür muss man in der Funktionsgleichung die gewünschte Biegezugfestigkeit als y einfügen und danach die Gleichung nach x lösen. Dadurch erhält man die Gleichung:

$$\text{Mischverhältnis} = \frac{\text{Biegezugfestigkeit} - 1.4622}{4.1596}$$

Um die Linearität verlässlich nachweisen und die angenäherte Funktionsgleichung bestätigen zu können, wären Wiederholungsmessungen notwendig. Diese würden zufällige Ausreisser erkennen lassen und die Ergebnisse statistisch absichern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Proben 3 und 4 in Bezug auf die Biegezugfestigkeit anwendungstauglich sind. Eine Verstärkung durch Stahl- oder Glasfaserzusätze könnte zwar auch Probe 1 und 2 anwendungstauglich machen, würde jedoch die Klimabilanz deutlich verschlechtern.

6.2 Druckfestigkeit

Weil die ungefähre Richtgrösse der Druckfestigkeit von der Grösse des geplanten Gebäudes abhängt, würde sich jedes Mischverhältnis eignen. Rechnet man mit 3 Megapascal pro Stockwerk, würde sich beispielsweise Probe 1, ohne MgO-Zement, für ein einstöckiges Haus qualifizieren. Dies wäre zwar ausreichend, allerdings werden in der Schweiz Gebäude in der Regel mehrgeschossig errichtet. Daher würde der Lehmbe- ton ohne MgO-Zement nicht oft zur Anwendung kommen. Probe 4 würde sich mit 22 Megapascal Druckfestigkeit für ein Haus mit bis zu 7 Stockwerken eignen – besser wären wahrscheinlich 6 Stockwerke, da man sonst nicht viel Reserve hat. Dieses Ergebnis ist eindrücklich, da es uns zeigt, dass der Lehmbe- ton auch eine hohe Festigkeit aufweisen kann, jedoch besitzt ein MgO-Zement-Anteil von 50 % einen klar zu hohen CO₂-Austoss. Interessant sind die Resultate der Probe 2 und der Probe 3. Probe 2 würde sich bereits für die Betonklasse C8/10 qualifizieren, während Probe 3 sich für die Klasse C12/15 qualifizieren würde. [20] Die Proben können also mit

schwächeren Industriebetons verglichen werden. Bei Probe 2 könnte das Haus beispielsweise schon zwei und bei Probe 3 gar drei Stockwerke hoch sein. Würde man den Lehmbeeton beim Bau von Einfamilien- oder Zweifamilienhäusern verwenden, erscheinen demnach die Mischungen von Probe 2 und 3 als besonders geeignet. Insgesamt haben 77 % der Wohngebäude in der Schweiz 2 oder 3 Stockwerke. [23] Diese Daten zeigen uns, dass hier der Markt sehr gross und die Druckfestigkeit der Proben gut genug wäre. Zudem können die Mischverhältnisse zwischen 7.5 % und 15 % MgO-Zement eine gute CO₂-Bilanz aufweisen.

Vergleicht man die Funktionsgleichung der Trendlinie mit der Biegezugfestigkeit, fällt auf, dass es sich hier um keine lineare Funktion handelt. Die hier entstandene polynomische Funktion bildet die Werte zwar gut ab, liefert aber ausserhalb des untersuchten Bereiches unrealistische Zahlen. Somit würde die Trendlinie ab einem Anteil von 50 % eine abnehmende Druckfestigkeit prognostizieren. Es gibt demnach keinen klaren Zusammenhang. Man erkennt aber, dass die Druckfestigkeit zu Beginn noch schneller zunimmt und die Steigung dann immer mehr abflacht.

Auch hier sind die Resultate mit Sorgfalt zu betrachten, da der Versuch nur einmal durchgeführt wurde. Für klare Ergebnisse müsste auch hier der Versuch mehrmals wiederholt werden.

6.3 Hygroskopie

Bei der Hygroskopie gibt es keinen klar festgelegten Zielwert, den der Lehmbeeton erreichen müsste. Sie ist vielmehr ein zusätzlicher Vorteil: Durch die Aufnahme und Abgabe von Wasserdampf kann Lehmbeeton die Luftfeuchtigkeit regulieren und wirkt dadurch wie ein Puffer. Das verbessert das Raumklima und kann Schimmel vorbeugen. Grundsätzlich gilt: Je höher die Hygroskopie, desto besser. Eine niedrige Hygroskopie hat aber auch keinen negativen Einfluss auf die Anwendung.

Die Resultate in Kapitel 5.3 widerlegen, die in Kapitel 4.8 aufgestellte Hypothese, dass mit zunehmendem MgO-Zement-Anteil die hygroskopischen Eigenschaften abnehmen würden. Denn Probe 4 mit 50 % Zementanteil nahm mit 8.2 % am meisten Feuchtigkeit auf, während Probe 1 ohne Zement nur 1.2 % aufnehmen konnte. Probe 2 und 3 lagen dazwischen mit 1.6 % bzw. 2.8 %. Die Hypothese konnte somit nicht bestätigt werden. Eine Erklärung liegt wahrscheinlich in der Menge an Wasser, die den Proben bei der Herstellung zugesetzt wurde. Um die Verarbeitbarkeit konstant zu halten, erhielten Proben mit mehr Zement auch mehr Wasser. Dadurch entstanden beim Verdunsten zusätzliche Poren, die Wasser aufnehmen konnten. Zwar füllen sich viele dieser Poren durch die Hydratation von M-S-H, doch wenn nicht alle Poren ausgefüllt werden, bleiben Hohlräume zurück, die leicht Wasser speichern. Das erklärt, warum gerade Probe 4 trotz hohem Zementanteil die stärkste Hygroskopie zeigte. Hätte man die Proben mit identischem Wassergehalt hergestellt, wären wahrscheinlich die vermuteten Ergebnisse eingetreten.

Bemerkenswert ist zudem, dass Festigkeit und Hygroskopie nicht im Widerspruch stehen müssen. Stattdessen zeigen die Resultate, dass beides gleichzeitig hoch ausfallen kann. Dies unterstreicht das Potenzial des Lehmbetons, sowohl tragfähig als auch raumklimatisch wirksam zu sein.

Ein Nachteil des hohen Wassergehaltes ist, dass porösere Mischungen zu höherem Schwindverhalten neigen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Lehmbeeton in allen Varianten hygroskopische Eigenschaften aufweist. Dies ist ein klarer Vorteil gegenüber herkömmlichem Beton, der praktisch keine Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen kann.

Weiterführend könnte man untersuchen, wie sich die hygroskopische Eigenschaft verändert, wenn man in jeder Mischung gleich viel Wasser hinzugibt. Und dann zusätzlich untersuchen, wie sehr die Festigkeit sowie das Schwinden darunter leiden. Dadurch könnte man vielleicht bei Proben 1-3 eine höhere Hygroskopie erreichen, mit nur leichtem Verlust an Festigkeit.

6.4 Schwinden

Betrachtet man die Resultate, erkennt man gut, dass alle Proben eher stark schwinden.

Es gibt zwar keinen klar definierten Grenzwert, der das maximale Schwinden definiert. Die Holcim, ein Betonhersteller, geht aber von einem Schwinden von 0.3-0.8 % bei herkömmlichem Beton aus. [20] Diesen Wert erreicht keine der Proben. Zudem widersprechen die Resultate hier wieder den vermuteten Resultaten. Denn auch hier weist Probe 4 ein stärkeres Schwinden auf, als erwartet und es lässt sich allgemein keine Korrelation erkennen. Ein möglicher Grund für diese Ergebnisse ist wieder, dass die höhere Menge an Wasser in den Proben 3 und 4 auch zu mehr Wasserverlust im Härteprozess führen und somit auch zu mehr Schwinden.

Eine weitere Ursache sind Messungsungenauigkeiten. Die Dicke des Prismas kann je nach Messstelle variieren und so kann das Volumen nie ganz genau bestimmt werden. Dies erkennt man gut, wenn man die Messung von Probe 2a und 2b vergleicht: Probe 2a schwindet fast um 3.5% und Probe 2b nur um 0.7 %. Hätte man die Prismen vielleicht an anderen Stellen vermessen, wären die Volumen möglicherweise näher beieinander.

Zudem fällt auf, dass Probe 1 und Probe 2 nach den ersten 3 Tagen ein deutlich tieferes Volumen hatte als Proben 3 und Probe 4. Dies könnte darauf deuten, dass sie schon in den ersten 3 Tagen enorm schwinden. Und da die offizielle Ermittlung erst nach dem Ausschalen beginnt, lässt sich dieses frühere Schwinden nicht dokumentieren. Auch wenn die Resultate Ungenauigkeiten aufweisen, lässt sich dennoch feststellen, dass alle Proben ein ausgeprägtes Schwinden aufweisen. Der Lehmbeeton ist demnach, was das Schwinden angeht, nicht konkurrenzfähig gegenüber herkömmlichem Beton.

Wenn also die Schwindung des Lehmbetons zu gross ist und nach dem Giessen Abstände zwischen Wänden hinterlässt, muss man auf andere Lösungsansätze zurückgreifen.

So könnte man zum Beispiel, nachdem der Beton gehärtet und geschwunden ist, die Lücke zwischen zwei Wandmodulen erneut mit Lehmbeeton füllen. Man könnte auch Wandmodule vorproduzieren, wie es manchmal auch mit herkömmlichem Beton gemacht wird. Dadurch kann man die Schwindung mit einberechnen und die Wand leicht zu gross giessen, sodass sie dann die korrekte Grösse aufweist.

6.5 Wasserresistenz

Betrachtet man die drei Abbildungen, lässt sich klar feststellen, dass Probe 1 ohne MgO-Zement nicht wasserresistent ist. Probe 1 hat sich aufgelöst, während die Proben 2-4 nach 30 Minuten unverändert erscheinen. Dieses Experiment zeigt gut die Wichtigkeit von M-S-H aus dem MgO-Zement. Die Hydratation von M-S-H füllt die Poren und verankert so auch die Tonmineralien, welche sonst durch Wasser von ihrer Verteilung gelöst werden können. Auch wenn Probe 4 eine hohe Porosität aufweist, verhindert die Bindung von M-S-H an den Tonmineralien, dass sich die Tonmineralien von der Struktur lösen. Die fehlende Wasserresistenz schliesst Probe 1 faktisch von einer praktischen Anwendung aus, da eine Wand immer auch der Witterung ausgesetzt ist. Dass bereits Probe 2 mit 7.5 % MgO-Zement-Anteil schon eine deutliche Wasserresistenz aufweist, lässt vermuten, dass es nicht einen hohen MgO-Zementanteil benötigt für die Wasserresistenz. Somit reichen schon verhältnismässig wenige M-S-Hydrate, um den Lehmbeeton vor Wasser zu schützen. Weiterführend könnte man untersuchen, welcher minimale Zementanteil erforderlich ist, um den Lehmbeeton wasserresistent zu machen. Benötigt das Gemisch beispielsweise nur 1-2 Prozent MgO-Zement und weist gleichzeitig eine hohe Hygroskopie auf, könnte man damit Innenwände von Gebäuden mit einer dünnen Schicht dieses Betons versehen. Dadurch entstünde ein Luftfeuchtigkeitspuffer, der zusätzlich durch eine tiefe CO₂-Bilanz überzeugt.

6.6 Ausblick

Das Team hinter Dr. Bernard entwickelt den Beton stets weiter. Ein Forschungsschwerpunkt liegt hierbei aktuell auf der Synergie zwischen den verschiedenen Rohmaterialien und Bodentypen. Je nach Zusammensetzung kann durch eine gezielte Abstimmung der Komponenten eine Aktivierung der Tonminerale erreicht werden, sodass diese als interne Quelle für zum Beispiel Silizium dienen. Dadurch liesse sich die Menge an extern zugeführten Siliziumquellen im Zement verringern, da im Aushubmaterial somit schon Silizium für M-S-H enthalten ist.

Auch die Zusammensetzung des Magnesiumoxid-Zements wird weiter untersucht, um dessen Reaktivität und Festigkeit zu verbessern. Zudem werden geeignete chemische Zusatzmittel getestet, die das Fliessverhalten, die Rissbildung und das Schwindverhalten gezielt beeinflussen sollen.

Insgesamt zielt die laufende Forschung darauf ab, die Festigkeit, Dimensionsstabilität und Nachhaltigkeit des Lehmbetons weiter zu steigern und damit die Grundlage für eine breitere praktische Anwendung zu schaffen. [6]

7. Fazit

Die in dieser Arbeit erzielten Resultate zeigen deutliche Tendenzen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften sowie der Hygroskopie des Lehmbetons. Aufgrund der einmaligen Durchführung der Versuche konnten die Resultate nicht statistisch abgesichert werden. Für eine belastbare Bestätigung der Resultate wären daher Wiederholungsmessungen nötig.

Dennoch erlauben es die Ergebnisse, eine Annahme bezüglich der möglichen Anwendungen zu treffen.

Das Mischverhältnis von Probe 1 ist aufgrund mangelnder Wasserresistenz sowie eher schwacher mechanischer Eigenschaften als Betonalternative ungeeignet. Das Mischverhältnis von Probe 2 hingegen, weist ausreichende mechanische Eigenschaften auf, wenn auch nur für Gebäude bis zu zwei Stockwerken. Obwohl das Mischverhältnis eine geringere Hygroskopie aufweist, hat auch Probe 2 den Vorteil der hygroskopischen Eigenschaft gegenüber herkömmlichem Beton. Eine höhere Hygroskopie ist für die Anwendung nicht zwingend erforderlich, sondern kann vielmehr, als zusätzlicher Nutzen betrachtet werden. Das Mischverhältnis von Probe 3 eignet sich für eine breite Anwendung am besten, denn durch seine mechanischen Eigenschaften wäre eine Anwendung für Häuser bis zu drei Stockwerken möglich. In der Schweiz besteht hierfür ein grosses Anwendungspotenzial. Zusätzlich ist auch die hygroskopische Eigenschaft bei Probe 3 stärker als bei Probe 2. Diese kann bei der Gebäudeinnenwand als idealer Luftfeuchtigkeitpuffer dienen. Das Mischverhältnis von Probe 4 weist zwar die stärksten mechanischen Eigenschaften, sowie die höchste hygroskopische Kapazität auf, stösst aber aufgrund seines hohen MgO-Zement-Anteils am meisten CO₂ aus. Das Problem des Schwindens tritt bei allen Mischverhältnissen auf, was bedeutet, dass dafür ein anderer Lösungsansatz gefunden werden muss. Hier käme zum Beispiel die Vorfabrikation von Wänden infrage.

Ein für eine breite Anwendung geeignetes Mischverhältnis liegt also zwischen 7.5 % und 15 %. Wahrscheinlich ist ein Anteil im oberen Bereich, also näher bei 15 %, optimal, da das 7.5 % Mischverhältnis zwar genügende, trotzdem aber eher schwache Festigkeitswerte aufweist. Diese Arbeit geht daher von einem idealen Mischverhältnis zwischen 10 % und 15 % MgO-Zement aus. Vergleicht man den Zementanteil des Lehmbetons mit jenem von herkömmlichem Beton (ca. 15.4 %), lässt sich erkennen, dass nur leicht weniger Zement benötigt wird. Die Idee, dass der Lehm beton durch die bindende Fähigkeit der Tonminerale weniger Zement benötigt, funktioniert also nicht im vollen Mass, weil die Zugabe von HMP-Ionen diese bindende Fähigkeit der Tonminerale hemmt. Daher forscht das Team von Dr. Bernard an verschiedenen Kompositionen, die die Tonminerale aktivieren könnten, und somit bei der Hydratation von M-S-H helfen würden. Wenn dies möglich wird, würde man mehr Zement einsparen. Eine tiefere CO₂-Bilanz entsteht daher im Moment nicht hauptsächlich, weil man weniger Zement benötigt, sondern vor allem durch die Einsparung bei der klimafreundlicheren Herstellung des MgO-Zements sowie durch die Nutzung des bereits vorhandenen Aushubmaterials, das nicht zusätzlich gefördert werden muss. Beim Bau von Einfamilien- und Zweifamilienhäusern könnte Lehm beton zur Anwendung kommen, und folglich würde CO₂ eingespart werden. Hier liesse sich je nach Bodengebiet gerade das Aushubmaterial der Baustelle für den Bau des Hauses verwenden. Dies würde zusätzlich Ressourcen einsparen, da man den Materialtransport nicht benötigt. Die Skalierung alternativer Herstellungsmethoden von

Magnesiumoxid könnte zukünftig die CO₂ Bilanz des Lehmbetons weiter senken. Lehm beton weist somit Potenzial auf, auch wenn an einigen Stellen das Verfahren noch optimiert werden muss. Den traditionellen Lehm bau durch einen giessbaren Lehm beton breiter anwendbar zu machen, stellt einen wichtigen Schritt in Richtung nachhaltiges Bauen dar. Auch wenn der Lehm beton noch nicht in allen Eigenschaften die Qualität von herkömmlichem Beton erreicht, kommt er ihm in gewissen Eigenschaften nahe und besitzt gleichzeitig den Vorteil der ausgeprägten Hygroskopie. Damit vereint der Lehm beton Tragfähigkeit mit raumklimatischem Nutzen. Probleme wie das erhöhte Schwindverhalten zeigen jedoch, dass weitere Forschung und Innovation nötig ist. Das Benutzen eines Lehm betons mit geringem Zementanteil an Innenwänden als Luftfeuchtigkeitspuffer, wie in Kapitel 6.5 beschrieben, wäre eine weitere Möglichkeit, das Prinzip des Lehm betons anzuwenden. Insgesamt lässt sich erkennen, dass Lehm beton insbesondere für ein- bis dreigeschossige Gebäude und Innenanwendungen realistische Einsatzmöglichkeiten hat und mit weiterer Forschung zu einem wichtigen Teil des klimafreundlichen Bauens werden könnte.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen herzlich für ihre Unterstützung und Betreuung bei der Maturaarbeit bedanken.

Herrn Edler danke ich für die engagierte Betreuung meiner Arbeit und die hilfreichen Rückmeldungen im Verlauf des Projekts.

Ellina Bernard danke ich für die Möglichkeit, einen Einblick in das Lehmbeetonprojekt zu erhalten, sowie für die Gelegenheit, im Labor selbst mitarbeiten zu dürfen.

Raphael Kuhn danke ich für die Betreuung an der EMPA und die stetige Bereitschaft auf meine Fragen einzugehen und mich im Labor zu unterstützen.

Meiner Familie danke ich für ihre Verbesserungsvorschläge und die stetige Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] Van Roijen, E., Sethares, K., Kendall, A. et al. (2024) *The climate benefits from cement carbonation are being overestimated*. In: *nature communication*, Juni.
- [2] Schroeder, Horst (2019) *Lehmbau Mit Lehm ökologisch planen und bauen*, 3rd edition, Weimar: Springer Vieweg.
- [3] Dewitte, Charolotte (2024) *Compressed earth applications Poster für Tag der offenen Tür 2024*, Dübendorf: EMPA.
- [4] Jahren, Per & Sui, Tongbo (2017) *CONCRETE A Very Old and Modern Material*, Singapur: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. and Chemical Industry Press.
- [5] *betonsuisse.ch* (2021) <https://betonsuisse.ch/Wissen/Betonwissen/Produktion-und-Verwendung/Was-es-zur-Betonherstellung-braucht/> (abgerufen am 24.Juni.2025).
- [6] Raphael, Kuhn (2025) *Mündliche Überlieferung*, Dübendorf.
- [7] Bernard, Ellina (2024) *Construction-Industry Switzerland Poster für Tag der offenen Tür 2024*, Dübendorf: EMPA.
- [8] August, Kristine (2020) *helmholtz.de*, 8. Januar <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/wie-viel-co2-steckt-in-einem-liter-benzin/> (abgerufen am 9.Oktober.2025).
- [9] Unbekannt (2001) *Calculating CO2 process emissions from Cement Production (Cement-based Methodology)*.
- [10] Erwin Frei, Karl Peyer (1984) *Atlas der Schweiz: Böden, Übersicht*, 2nd edition, Wabern: Bundesamt für Landestopographie.
- [11] Matthias Probst, Corinne Labudde, Hans-Rudolf Egli, Martin Hasler (2025) *Geografie Wissen und verstehen – Ein Handbuch für die Sekundarstufe II*, 7th edition, Bern: hep Verlag.
- [12] Ellina Bernard, Daniel Rentsch, Raphael Kuhn, Guillaume Habert, Pietro Lura (2024) *Earth stabilisation with MgO-based cement*. In: *Cement and Concrete Research*, vol. 186, December.
- [13] Hrishikesh Yadav, Prathamesh Katkar, Amod Padge (n.d) *A project report on "Production of Sodium Hexametaphosphate" Submitted in partial fulfillment for the course of Bachelor of Engineering in Chemical Engineering*, Mumbai.
- [14] Christian Knoll, Danny Müller, Werner Artner, Jan M. Welch, Elisabeth Eitenberger, Gernot Friedbacher, Andreas Werner, Peter Weinberger, Michael Harasek (2019) *Magnesium oxide from natural magnesite samples as thermochemical energy storage material*. In: *Energy Procedia*, vol. 158, Februar, 4861-4869.
- [15] Allan Scott, Aaron Marshall, Matthew Watson, Christopher Oze, Vineet Shah, Nan Yang, Barney Shanks, Chris Cheeseman (2021) *Transformation of abundant magnesium silicate minerals for enhanced CO2 sequestration*. In: *communications earth & environment*, vol. 2, Februar.
- [16] Haoliang Dong, Cise Unluer, En-Hua Yang, Abir Al-Tabbaa (2018) *Recovery of reactive MgO from reject brine via the addition of NaOH*. In: *Desalination*, vol. 429, März, 88-95.

- [17] *chemie-schule.de* <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Biegezugfestigkeit> (abgerufen am 22.August.2025).
- [18] Testressources (2024) *testresources.net*, 24 Oktober https://www.testresources.net/blog/a-complete-guide-to-the-three-point-bending-flexural-test?utm_source=chatgpt.com (abgerufen am 29.August.2025).
- [19] Jürg Schlumpf, Bastian Bicher, Oliver Schwoon, Ayça Kavas (2024) *SIKA BETONTECHNOLOGIE HANDBUCH*, Schweiz.
- [20] Holcim (Deutschland) GmbH (2022) *Betonpraxis - Der Weg zu dauerhaftem Beton*, 4th edition, Deutschland.
- [21] *Merriam-Webster.com Dictionary* <https://www.merriam-webster.com/dictionary/compressive%20strength> (abgerufen am 22.August.2025).
- [22] Maher Al-Jabari, Maen Husein (2022) *Physical and chemical interactions of water with surfaces and particles*. In: Al-Jabari, Maher (Hrsg.) *Integral Waterproofing of Concrete Structures*, Elsevier.
- [23] Statistisches Bundesamt (2024) *bfs.admin.ch* https://www.bfs.admin.ch/bfs/en/home/statistics/construction-housing/buildings/size.html?utm_source=chatgpt.com (abgerufen am 7.September.2025).
- [24] Lysett, Tim (2022) *cor-tuf.com*, 22 Juni https://cor-tuf.com/2022-everything-you-need-to-know-about-concrete-strength/?utm_source=chatgpt.com (abgerufen am 10.September.2025).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Lehmstampfbau im Alten China (Quelle: Lehmbau, Springer Vieweg, 2019)	6
Abbildung 2 Querschnitt einer Braunerde unterteilt in ihre 4-Horizonte (Quelle: https://www.wald.de/bodenkunde/bodentypen-braunerde/)	9
Abbildung 3 Tonmineral Struktur (Quelle: Simon Stuber 04.10.2025)	9
Abbildung 4 Bindung von Tonmineralien untereinander (Simon Stuber, 04.10.2025)	10
Abbildung 5 Chemische Struktur von NaHMP (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sodium_hexametaphosphate.png , 06.10.2025)	10
Abbildung 6 HMP-Ionen (blau) an Tonmineralien (braun) gebunden (Simon Stuber, 23.06.2025)	10
Abbildung 7 M-S-H(rot) als Bindemittel in für Tonmineralien (braun) (Simon Stuber, 04.10.2025)	11
Abbildung 8 Kombination von HMP-Ionen und M-S-H im Lehm (Simon Stuber, 23.06.2025)	11
Abbildung 9 Mischverhältnisse Aushubmaterial zu Zement der Proben	14
Abbildung 10 Massenanteil der verschiedenen Komponenten pro Probe	15
Abbildung 11: Menge der jeweiligen Komponente in Gramm (Quelle: Simon Stuber, 24.06.2025)	16
Abbildung 12 Versuchsaufbau Biegezugfestigkeit (Quelle: Simon Stuber, 04.10.2025)	17
Abbildung 13 Versuchsaufbau Druckfestigkeit (Quelle: Simon Stuber, 04.10.2025)	18
Abbildung 14 Funktionsaufbau DVS (Quelle: Simon Stuber, 04.10.2025)	19
Abbildung 15 Versuchsaufbau Ermittlung Wasserresistenz (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)	19
Abbildung 16 Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom Mischverhältnis des MgO-Zements	20
Abbildung 17 Druckfestigkeit in Abhängigkeit von dem Mischverhältnis des MgO-Zements	20
Abbildung 18 Sorptionskurve der Hygroskopie Messung auf 10 % referenziert	21
Abbildung 19 Sorptionskurve der Hygroskopie Messung auf 50 % referenziert	21
Abbildung 20 Proben nach 10 Minuten im Wasser (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)	22
Abbildung 21 Proben nach 10 Minuten im Wasser (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)	22
Abbildung 22 Proben nach 30 Minuten im Wasser (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)	22
Abbildung 23 Versuchsaufbau Biegezugfestigkeit (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)	35
Abbildung 24 Versuchsaufbau Druckfestigkeit (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)	35
Abbildung 25 DVS Modell GraviSorp (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)	35
Abbildung 26 Bruchstücke der 4 Proben in jeweiligen Probenschalen für die DVS ..	36
Abbildung 27 Befeuchtungseinheit der DVS (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025) ...	36

Abbildung 28 Resultate der Biegezugfestigkeitsermittlung	36
Abbildung 29 Resultate der Druckfestigkeitsermittlung	37
Abbildung 30 Veränderung des Volumens nach 38 Tagen	37
Abbildung 31 Diagramm der Druckfestigkeitsprüfung von Probe 1	37
Abbildung 32 Diagramm der Druckfestigkeitsprüfung von Probe 2	37
Abbildung 33 Diagramm der Druckfestigkeitsprüfung von Probe 3	38
Abbildung 34 Diagramm der Druckfestigkeitsprüfung von Probe 4	38
Abbildung 35 Messwerte der Proben: Abmessungen, Volumina und Schwindwerte, bei erster Messung (2 Tage nach Giessen) und zweiter Messung (38 Tage nach erster Messung)	38

Hilfsmittelverzeichnis

Hilfsmittel	Einsatzform	Betroffene Teile der Arbeit
ChatGPT 5	Textüberarbeitung	Einzelne Teile verteilt auf gesamter Arbeit
languagetool.org	Korrektur der Rechtschreibung	Gesamte Arbeit

Anhang



Abbildung 23 Versuchsaufbau Biegezugfestigkeit (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)



Abbildung 24 Versuchsaufbau Druckfestigkeit (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)

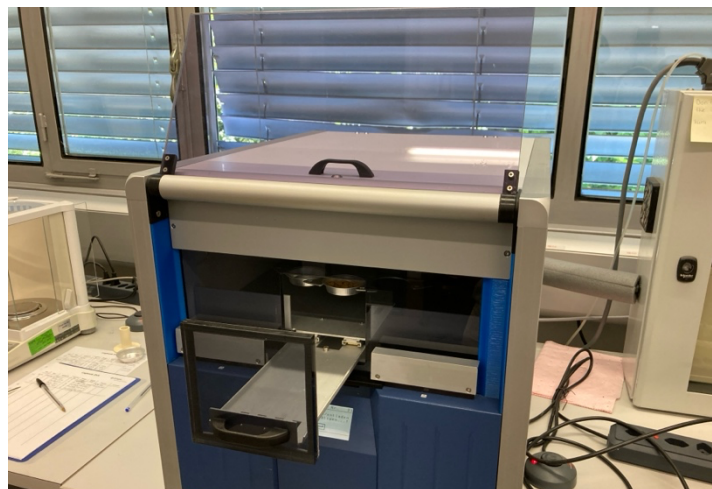


Abbildung 25 DVS Modell GraviSorp (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)



Abbildung 26 Bruchstücke der 4 Proben in jeweiligen Probenschalen für die DVS



Abbildung 27 Befeuchtungseinheit der DVS (Quelle: Raphael Kuhn, 08.08.2025)

Spalte1	Breite	Dicke	Länge	Biegebruchlast in N	Biegefestigkeit in Mpa
Probe 1	24.3	23.7	96.9	170	1.40
Probe 2	24.6	25	98.7	240	1.76
Probe 3	24.6	25	98.7	300	2.20
Probe 4	25	24.8	100.3	480	3.51

Abbildung 28 Resultate der Biegezugfestigkeitsermittlung

Spalte1	Breite	Dicke	Länge	Druckbruchlast in N	Durckfestigkeit in Mpa
Probe 1	24.3	23.7	96.9	2400	4.17
Probe 2	24.6	25	98.7	5100	8.29
Probe 3	24.6	25	98.7	8700	14.15
Probe 4	25	24.8	100.3	14200	22.90

Abbildung 29 Resultate der Druckfestigkeitsermittlung

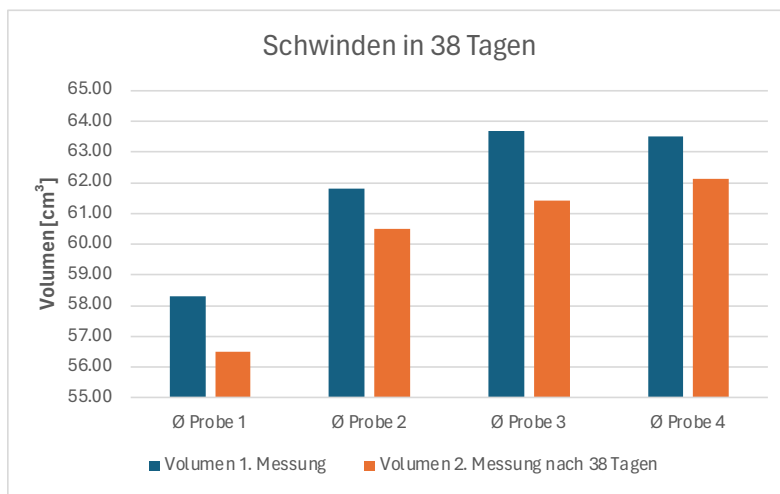


Abbildung 30 Veränderung des Volumens nach 38 Tagen

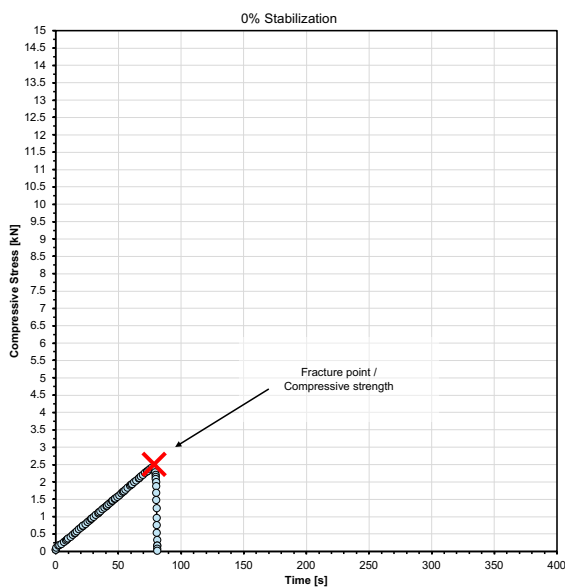


Abbildung 31 Diagramm der Druckfestigkeitsprüfung von Probe 1

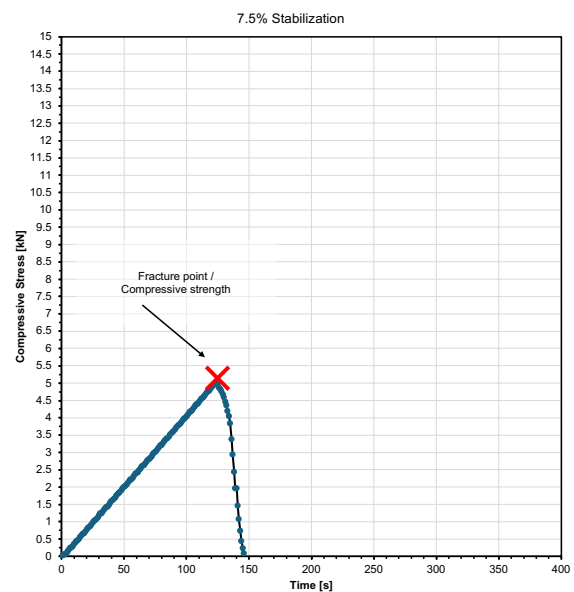


Abbildung 32 Diagramm der Druckfestigkeitsprüfung von Probe 2

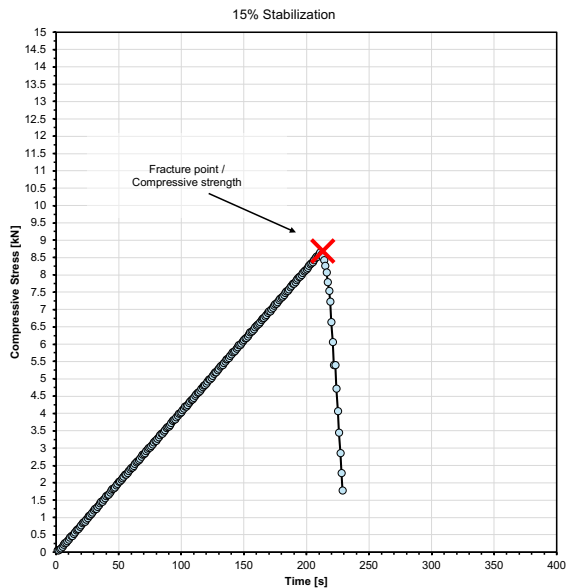


Abbildung 33 Diagramm der Druckfestigkeitsprüfung von Probe 3

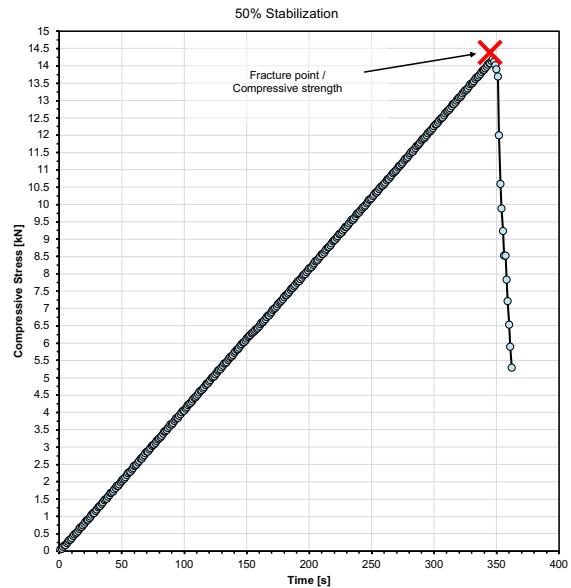


Abbildung 34 Diagramm der Druckfestigkeitsprüfung von Probe 4

Proben	Dimensionen Messung [mm]	1. Volumen 1. Messung [mm ³]	Dimensionen 2. Messung [mm]	Volumen 2. Messung [mm ³]	Schwinden [cm ³]	Schwinden [%]
Probe 1a	24.3*24.5*97.4	57987.09	23.7*24.3*97.3	56036.04	1.95	3.36%
Probe 1b	24.5*24.6*97.3	58642.71	24.3*24.2*96.9	56983.01	1.66	2.83%
Durchschnitt Probe 1		58314.90		56509.53	1.81	3.10%
Probe 2a	25.5*24.7*99.8	62859.03	25.0*24.6*98.7	60700.50	2.16	3.43%
Probe 2b	24.9*24.6*99.2	60763.97	24.8*24.6*98.9	60336.91	0.43	0.70%
Durchschnitt Probe 2		61811.50		60518.71	1.29	2.09%
Probe 3a	24.9*25.3*99.4	62619.02	24.6*25.0*98.7	60700.50	1.92	3.06%
Probe 3b	25.2*25.8*99.6	64755.94	24.8*25.3*99.0	62116.56	2.64	4.08%
Durchschnitt Probe 3		63687.48		61408.53	2.28	3.58%
Probe 4a	25.2*25.0*99.8	62874.00	25.0*24.8*99.3	61566.00	1.31	2.08%
Probe 4b	25.5*25.0*100.6	64132.50	25.1*25.0*99.9	62687.25	1.45	2.25%
Durchschnitt Probe 4		63503.25		62126.625	1.38	2.17%

Abbildung 35 Messwerte der Proben: Abmessungen, Volumina und Schwindwerte, bei erster Messung (2 Tage nach Giessen) und zweiter Messung (38 Tage nach erster Messung)

Zu den durchgeführten Messungen liegen umfangreiche Excel-Rohdaten vor. Die Rohdaten der verschiedenen Messungen sind lokal gespeichert. Falls ein Interesse an den Rohdaten besteht, können diese auf Anfrage an simonstuber@icloud.com erhalten werden.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Maturaarbeit eigenständig angefertigt und dabei keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe. Wörtliche oder inhaltliche Übernahmen aus fremden Werken oder Quellen sind ausnahmslos durch korrekte Zitate ausgewiesen.

Muri, 16. Oktober 2025

Unterschrift: