

Diplomarbeit

Neuer und ökologisch nachhaltiger Ansatz zur Mauerwerksverfestigung im Altbestand in Wien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Novel and eco-sustainable approach for consolidation of old masonry buildings in Vienna

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Jeannine Brigitte Leimer

Matr.Nr.: 01525315

Betreuung: Projektass.in Benedetta Costa, MSc BSc
Univ.Prof. PhD Agathe Robisson
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
TU Wien
Forschungsbereich Baustofflehre und Werkstofftechnologie
Technische Universität Wien,
Lilienthalgasse 14, Gebäude OC, 1030 Wien, Österreich

Wien, im Juni 2024



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juni 2024

Jeannine Brigitte
Leimer BSc



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

In der Zukunft wird der Fokus der Bauindustrie weiter in Richtung der Revitalisierung von Bestandgebäuden gehen. Dies hängt einerseits mit einem Umdenken in Richtung Nachhaltigkeit, aber auch mit verschärften Baurichtlinien zusammen. Um ein altes Gebäude den heutigen Standards und Wohnanforderungen anzupassen sind oftmals umfangreiche Baumaßnahmen notwendig. Dies erfordert auch eine Erhöhung der Tragfähigkeit der alten Gebäude, um den neuen Lasten Stand zu halten. Die gängigste Methode zur Mauerwerksverfestigung ist die Injektion mittels Epoxidharz. Dieses bringt jedoch einige Nachteile mit sich und daher stellt sich die Aufgabe der Findung eines Alternativproduktes zur Mauerwerksinjektion.

Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, ob Wasserglas eine festigkeitssteigernde Wirkung auf alten Mauermörtel hat. Wasserglas hat das Potenzial, bei Kontakt mit Calcium (Ca) Calciumsilikathydrat (C-S-H) zu bilden, welches aus dem Erhärtungsprozess von Zement bekannt ist. Kalzium ist in altem Kalkmörtel zwar in Form von Kalzit enthalten, aber nicht ausreichend konzentriert oder löslich, weshalb ein Injektionsverfahren aus zwei Komponenten geschaffen werden soll. Die erste Komponente sollte eine Portlandit-Suspension sein, um die Anzahl der freien Ca^{2+} -Ionen im System zu erhöhen, gefolgt von einer Injektion mit Wasserglas. Das resultierende C-S-H sollte in der Lage sein, dem durch Risse und Feuchtigkeit beeinträchtigten Mörtel neue Festigkeit zu verleihen. In den vorliegenden Tests wurde jedoch nur die Reaktion zwischen Wasserglas und gehärtetem Mörtel als erster Schritt getestet. Zuvor wurden bereits mehrere Tests zur Überprüfung der Kompatibilität zwischen dem alten Mörtel, Portlandit und Wasserglas durchgeführt, die in dieser Arbeit jedoch nicht im Detail vorgestellt werden.

Dank der Zusammenarbeit mit der Porr Bau GmbH war es möglich, eine Reihe von Bohrkernen aus verschiedenen Mauerwerken in Österreich zu erhalten, um deren Zusammensetzung und Eigenschaften zu untersuchen. In Anbetracht der geringen Verfügbarkeit des alten Mörtels und der Schwierigkeit, diesen zu beschaffen, wurde ein hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und der Zusammensetzung vergleichbares Material ausgewählt. Für diese Forschungsarbeit wurde natürlicher Hydratkalk (NHL) 3.5 verwendet, und sein Verhalten mit Wasserglas untersucht. Alle Tests wurden unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt, wobei auch der Feuchtigkeitszustand simuliert wurde, der in diesen alten Gebäuden sehr häufig auftritt.

Diese Arbeit bietet daher eine Grundlage für weitere Forschungen zu einem neuen, ökologisch nachhaltigen Injektionsmaterial für bestehende Gebäude in Wien.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

In the future, the focus of the construction industry will continue to shift towards the revitalisation of existing buildings. On the one hand, this is due to a shift in thinking towards sustainability, but also to stricter building regulations. Extensive construction work is often necessary to adapt an old building to today's standards and living requirements. This also requires an increase in the load-bearing capacity of the old building in order to withstand the new loads. The most common method of reinforcing masonry is injection using epoxy resin. However, this has a number of disadvantages and therefore the task of finding an alternative product to masonry injection arises.

The aim of this thesis was to analyse whether waterglass has a strength-enhancing effect on old masonry mortar. Waterglass has the potential to form calcium silicate hydrate (C-S-H) in contact with calcium, which is known from the hardening process of cement. Although calcium is contained in old lime mortar in form of calcite, it is not sufficiently concentrated or soluble, which is why an injection process consisting of two components is to be created. The first component should be a Portlandite suspension to increase the Ca^{2+} free ions in the system, followed by an injection with waterglass. The resulting C-S-H should have the ability to give new strength to mortar that has been affected by cracks and moisture. In the present tests, however, only the reaction between waterglass and hardened mortar was tested as first step. Previously, several tests to verify the compatibility between the old mortar, portlandite and waterglass have been done, but they will not be presented in detail in this work.

Thanks to the collaboration with Porr Bau GmbH, it was possible to obtain a couple of cores from several masonry buildings in Austria, permitting to investigate their composition and features. Considering the low availability in the old mortar and the difficulty to getting hold of it, a comparable material, in terms of mechanical properties and composition has been selected. This research work is done using the Natural Hydrated lime (NHL) 3.5, and its behavior with waterglass has been studied. All the tests were conducted in different conditions, also simulating the moisture state, that occurs very often in these old buildings.

This work therefore provides a basis for further research into a new, ecologically sustainable injection material for existing buildings in Vienna.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
1 Einleitung	5
2 Grundlagen	7
2.1 Gründerzeit	7
2.1.1 Gebäudetypen	8
2.1.2 Aufbau eines Gründerzeithauses	10
2.1.3 Heutige Bedeutung des Altbestandes.....	11
2.2 Mauerwerksfestigkeit.....	11
2.3 Mauerwerksinjektion.....	15
2.3.1 Füllstoffe.....	16
2.3.2 Injektionsverfahren.....	17
2.3.3 Wasserglas als Alternative zu Epoxidharz.....	20
2.4 Kalkmörtel im Altbestand.....	21
2.4.1 Analyse des historischen Mörtels	21
2.4.2 Neuer NHL-Mörtel.....	25
2.4.3 Ausbreitmaß & Wasserbindemittelwert.....	26
2.4.4 Herstellung NHL-Probewürfel	28
3 Methodik	30
3.1 Karbonatisierung	30
3.2 Wasseraufnahmekoeffizient	30
3.3 Druckversuche	32
3.4 In Wasserglas getränkte Proben	32
3.4.1 Absorption von Wasserglas.....	33
3.4.2 Reversibilität der Wasserglas-Reaktion.....	34
4 Resultate und Diskussion.....	36
4.1 Porosität/ Durchlässigkeit.....	36
4.1.1 Karbonatisierung.....	36
4.1.2 Wasseraufnahmekoeffizient	37
4.1.3 Aufnahme von Wasserglas.....	37
4.1.4 Diskussion.....	39
4.2 Druckfestigkeit.....	40
4.2.1 Wirkung von Wasserglas.....	42
4.2.2 Reversibilität von Wasserglas	44

4.2.3	Diskussion.....	46
5	Ausblick.....	49
6	Anhang.....	50
6.1	Anhang 1: Massenentwicklung nach Herstellung der Proben	50
6.2	Anhang 2: Relation zwischen Dichte der Proben und Druckfestigkeit	52
7	Literaturverzeichnis	53
8	Abbildungsverzeichnis	55
9	Formelverzeichnis	57
10	Tabellenverzeichnis	58
11	Abkürzungsverzeichnis	59

1 Einleitung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Thema der Mauerwerksinjektion und dem Ersatz der herkömmlichen Produkte wie beispielsweise Epoxidharz.

Die Grundlage für die Wichtigkeit dieses Themas bilden diverse Punkte. Die Bausubstanz in Wien ist vor allem durch Gründerzeithäuser geprägt. Diese entstanden in der Zeit zwischen 1848 und 1918¹ und zirka ein Drittel der Wiener Bevölkerung lebt laut Stand 2011 in eben diesen.² Auch wenn diese Gebäude in der damaligen Zeit als sogenannte Zinskasernen mit sehr geringer Wohnqualität entstanden, erfreuen sich Altbauwohnungen heute großer Beliebtheit. Vor allem die großzügigen Raumhöhen sind in Neubauten nicht mehr zu finden. Bereits in den 1970er Jahren wurden die ersten Schutzzonen für den Altbestand geschaffen, da ein Großteil der Häuser verwaorlost war, sich jedoch ein reger Protest der Bevölkerung gegen den Abbruch eben dieser Bauten einstellte. Zunehmend wurde der Schutz der Gründerzeithäuser verstärkt.³ Ende 2023 wurde eine neue Wiener Bauordnung herausgegeben, welche den Abbruch von Häusern, welche vor dem Jahr 1945 erbaut wurden, weiter erschwert. Es sind allerdings nicht nur die gesetzlichen Regulative, welche Herausforderungen an den Altbestand setzen. Lebensumstände und Wohnqualität unterliegen dem Wandel der Zeit. Somit müssen sich Gebäude immer wieder anpassen und auf eine Art und Weise adaptierbar bleiben, um ihr Fortbestehen im Sinne der Nachhaltigkeit auch in Zukunft rechtfertigen zu können.⁴ Um den Bestand, welcher vor über 100 Jahren errichtet wurde, auf den heutigen Standard zu bringen, sind etliche Baumaßnahmen erforderlich. Daraus ergibt sich, dass bestehende Häuser entsprechend revitalisiert und gegebenenfalls aus- und umgebaut werden müssen. Dachgeschossausbauten und andere statische Eingriffe sind in diesem Falle unumgänglich, um die Erträge und Wohnqualität eines Gebäudes zu erhöhen. Allerdings geht mit den meisten Baumaßnahmen auch eine Erhöhung der Gebäudelasten einher und daher gelten neue Mindestanforderungen laut Eurocode 8.⁵ Im Zuge dieser Bemessung spielen auch die Materialqualitäten eine gewisse Rolle.⁶ Jahrzehnte alter Mauermörtel besitzt andere Festigkeitseigenschaften, da die Herstellung damals nicht auf genormten Prozessen basierte. Ebenfalls beeinträchtigen äußere Einflüsse wie beispielsweise Feuchtigkeit oder Salze die Festigkeit.⁷ Um nun im Zuge der Umbauarbeiten, die Festigkeiten gewisser Wandbauteile zu erhöhen und die Kohäsion des Mauermörtels wieder herzustellen gibt es die Möglichkeit der Mauerwerksinjektion. In den folgenden Kapiteln wird das Verfahren mit dem gebräuchlichsten Injektionsmittel Epoxidharz näher beschrieben. Allerdings handelt es sich bei diesem Produkt um ein Erzeugnis auf Basis von Erdöl. Aus umwelttechnischer Sicht wird der Verzicht auf Erdölprodukte in den nächsten Jahren immer mehr an Bedeutung gewinnen. Ebenso steht auch die Frage im Raum wie nach Ablauf der Lebensdauer mit dem injizierten Material umgegangen werden soll oder auch wie sich Epoxidharz im Brandfall verhält und welche gesundheitlichen Gefahren daraus entstehen können. Eine weitere Problematik ist, dass Epoxidharz sehr hohe

¹ vgl. Deix, K.; Rusnov, B.; Dzudzevic, E.; Huber, C. (2023) *Analyse von Mauerwerksuntersuchungen von Gründerzeithäusern in Wien*. Bautechnik 100, H. 10, S. 627

² vgl. Tockner Lukas: *Nettoangebotsmieten in Wiener Altbauten* in: Arbeiterkammer Wien, April 2015, https://wien.arbeiterkammer.at/service/studien/wohnen/Nettoangebotsmieten_in_Wiener_Altbauten.pdf (abgerufen am: 09.11.2023)

³ vgl. Bucherer, Barbara (2022): *Der Wert des gebauten Erbes der Wiener Innenstadt*, Wien, Dissertation Tu Wien, S.12-13

⁴ vgl. Bucherer, Barbara (2022): S.17

⁵ Austrian Standards International *ÖNORM B 1998-3:2018-10-15 Eurocode 8 – Auslegung von Bauwerken gegen Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden*, A.3.2. Wien: Austrian Standards International, 2018.

⁶ vgl. Deix, K.; Rusnov, B.; Dzudzevic, E.; Huber, C. (2023) S. 627

⁷ vgl. Deix, K.; Korjenic, S. (2012) *Bestimmung der Tragfähigkeit von altem Ziegelmauerwerk und Untersuchung von neuen Injektionsmaterialien gegen aufsteigende Feuchtigkeit*. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 157. Jg., Heft 7–12/2012, S. 2

Festigkeiten erreicht, und dadurch das Gebäude im Zuge der Injektion auch übermäßig ausgesteift werden kann. Ebenso wird die Dampfdurchlässigkeit des Gebäudes massiv beeinträchtigt, da sich das Epoxidharz wie eine Versiegelung verhält. Dadurch wird nicht nur die Wohnqualität gemindert, sondern auch das Schadenspotential erhöht, da die Luftfeuchtigkeit in den Räumen gefangen ist und schädlichen Schimmel verursachen kann.⁸ Aus diesen Gründen widmet sich diese Arbeit der Analyse des potenziellen Ersatzproduktes Wasserglas, welches durch seine Reaktion mit Calcium ein C-S-H ähnliches Material bilden soll und dadurch die Festigkeit und Kohäsion des Mauer Mörtels wieder herstellen und auch verbessern soll.

Im ersten Schritt dieser Arbeit wurden Bohrkerne aus verschiedenen Gründerzeithäusern aus Österreich auf deren Mörtelzusammensetzung untersucht. Es ist ebenfalls eine Herausforderung entsprechende Mörtelstücke zur Untersuchung zu erhalten, da die meisten Gebäude bewohnt sind und erst im Zuge von Sanierungsarbeiten Probestücke entnommen werden können. In Anbetracht der geringen Verfügbarkeit des alten Mörtels und der Schwierigkeit, diesen zu beschaffen, wurde ein hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und der Zusammensetzung vergleichbares Material ausgewählt. Für diese Forschungsarbeit wurde natürlicher Hydratkalk (NHL) 3.5 verwendet, und sein Verhalten mit Wasserglas wurde untersucht. Die neuen Proben wurden basierend auf der ermittelten Rezeptur hergestellt. Die Entwicklung des Karbonatisierungsgrades wurde anhand von Phenolphthalein getestet. Die Karbonatisierung stellt den festigkeitsbildenden Prozess von Kalkmörtel dar. Im Zuge der Versuche der neuen NHL-Proben wurde auch der Wasseraufnahmekoeffizient ermittelt, um die Durchlässigkeit der Probewürfel zu bestimmen. Des Weiteren wurde die Druckfestigkeit der neu hergestellten NHL-Proben ermittelt. Weitere Testexemplare wurde über verschieden lange Zeiträume in Wasserglas getränkt, um den Einfluss der Verweildauer zu analysieren. Anschließend wurden die neuen Druckfestigkeiten getestet und mit der Druckfestigkeit der unbehandelten Proben gegenübergestellt. Im letzten Schritt wurde die Reversibilität der Wasserglas-Reaktion nach erneutem Wasserkontakt untersucht. Durch die erhöhte Feuchtigkeitsbelastung von Mauerwerk im erdnahen Bereich sollte dieser Versuch eine Extremsituation simulieren. Bei der Versuchsdurchführung wurden die mit Wasserglas behandelten Proben nach dem Erhärten komplett in Wasser getaucht, anschließend zum Trocknen gelagert und zum Abschluss die Druckfestigkeit getestet.

Ziel dieser Arbeit ist es somit das Potential der festigkeitssteigernden Wirkung von Wasserglas im Zusammenspiel mit historischem Kalkmörtel zu testen und analysieren.

⁸ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kirnbauer, J., & Deix, K. (2023). *Systematische Charakterisierung der Eigenschaften von Frischbetonen und Mörteln – Jahr 5*. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/191461>, S. 36

2 Grundlagen

2.1 Gründerzeit

Im Zeitraum von 1840 bis 1918 wuchs die Wiener Bevölkerung von ca. 440.000 auf 2.238.545 Menschen an. Dieses massive Wachstum war vor allem auch dem Zustrom von Flüchtlingen geschuldet. Der Zuzug erfolgte vorwiegend aus den Sudetenländern, Böhmen und Mähren und ebenso der Anteil der jüdischen Bevölkerungsgruppe nahm immer weiter zu. Die Quote der fremdbürtigen Bevölkerung betrug somit am Ende der Hochgründerzeit 65,5%.⁹

Es gab einige besondere Faktoren, welche die Bautätigkeit in Wien in Aufschwung versetzte. Ein wichtiger war beispielsweise der Eisenbahnbau, welcher auf die Hauptstadt ausgerichtet war. Dieser befeuerte den Bevölkerungszustrom, da Güter billig transportiert und so die Ernährung der Massen gewährleistet werden konnten. Außerdem trug diese Entwicklung zur Gründung von Großindustrien bei. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Schleifung der Stadtmauer und die spätere Überbauung dieser und dem davorliegenden Glacis mit der heutigen Ringstraße. Bereits davor waren die Vorstädte Teil Wiens, jedoch war der Verkehr zwischen diesen und der Altstadt erheblich erschwert, da die Zufahrt nur über 12 Tore innerhalb der Stadtmauer möglich war. Somit brachte diese Maßnahme einen erheblichen Aufschwung in der privaten Bautätigkeit in den Vorstädten. Als dritte wichtige Leistung ist die Donauregulierung zu nennen. Weiters wurde die Gürtelstraße auf dem Areal des Linienwalls errichtet und die Versorgung durch Strom und Gas fiel unter Bürgermeister Lueger aus der Privatwirtschaft in die Kommunalverwaltung. Nennenswert ist auch der Bau zahlreicher Schulen und Krankenhäuser. In dieser Zeit finanzierte sich der Wohnbau fast ausschließlich über Privatpersonen. Auf diesem Wege wurde die Bautätigkeit durch Steuerbegünstigungen des Staates gefördert. Die Steuern betragen 40% des Bruttozinssatzes. Für einen Neubau konnten 18 Jahre und für einen Bau auf dem Areal des einstigen Glacis sogar 25-30 Jahre Steuerfreiheit erlangt werden. All jene Punkte führten zu einem wahren Bauboom in den Vorstädten Wiens und der Entstehung der Zinskaserne.¹⁰

⁹ vgl. Bobek, Hans; Lichtenberger, Elisabeth (1978) *Wien- Bauliche Gestalt und Entwicklung seit der Mitte des 19. Jahrhunderts* Vol.1, Wien, Böhlau Verlag, S.30-32

¹⁰ vgl. Bobek, Hans; Lichtenberger, Elisabeth (1978), S.42-48

2.1.1 Gebäudetypen

In absoluten Zahlen befindet sich ein Großteil der Gründerzeithäuser in den Bezirken 2 und 3, sowie 15-18. Die grundlegende Typologie der Gebäude war nicht sehr unterschiedlich, ein bedeutender Unterschied bestand jedoch in der Wohnqualität. In der Innenstadt und entlang der neu entstandenen Ringstraße reihten sich die Palaisbauten.¹¹



Abbildung 1: reichlich verzierte Fassade eines Palais der Gründerzeit¹²

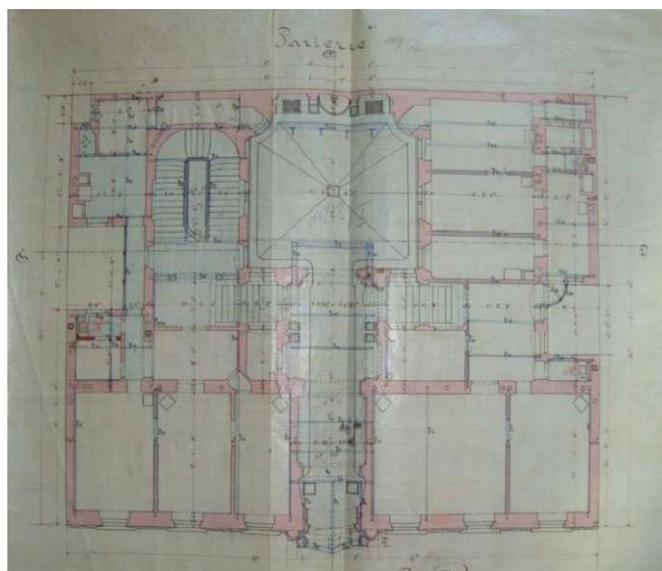


Abbildung 2: Grundriss eines Palais in der Gründerzeit¹³

Nahe dem Stadtzentrum entstanden die Mietshäuser des gut situierten Bürgertums. Außerhalb des Linienwalls vor allem in den Arbeitervorstädten Ottakring und Hernals entstanden die

¹¹ vgl. Vukovich, Clara (2019): *Gebäude der Gründerzeit in Wien – Herausforderungen und Auswirkungen der Wiener Bauordnungsnovelle 37/2018 unter besonderer Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Abbruchreife*, Wien, Masterthesis Tu Wien, S.9

¹² dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.: *Kapitel 01 – Historische Einleitung zur Gründerzeit und ihrer Bauweisen*, S.21 in: hollinsky+partner, <https://www.hollinsky.at/> (abgerufen am: 21.04.2024)

¹³ dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.: *Kapitel 01 – Historische Einleitung zur Gründerzeit und ihrer Bauweisen*, S.21

sogenannten Zinskasernen. Diese waren außen deutlich weniger schmuckhaft ausgestaltet (siehe Abbildung 3) als die innerstädtischen Palais.¹⁴



Abbildung 3: Fassade einer Zinskaserne der Gründerzeit¹⁵

Sie bestanden aus nur kleinen Wohneinheiten mit Zimmer-Küche oder Zimmer-Küche-Kabinett in einem Ausmaß von 33-54 m² (siehe Abbildung 4).¹⁶ Toiletten waren am Gang situiert und wurden von mehreren Wohnungen geteilt. Die Wasserversorgung fand über die ebenfalls am Gang liegende Bassena statt.

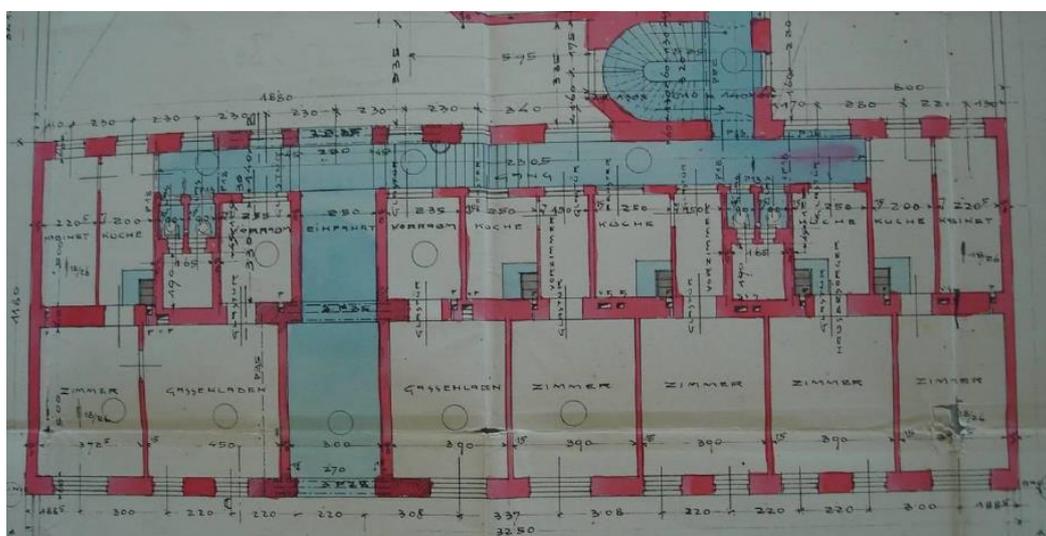


Abbildung 4: Grundriss des Parterres einer Zinskaserne der Gründerzeit¹⁷

Es ist zu bedenken, dass inklusive der Bettgeher in solchen Wohneinheiten bis zu 20 Personen nächtigten. Dementsprechend waren die hygienischen Bedingungen in den Zinskasernen sehr niedrig.

¹⁴ Vgl. Vukovich, Clara (2019), S. 9

¹⁵ dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.: *Kapitel 01 – Historische Einleitung zur Gründerzeit und ihrer Bauweisen*, S.22

¹⁶ vgl. Bobek, Hans; Lichtenberger, Elisabeth (1978), S.55

¹⁷ dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.: *Kapitel 02 – Bestandteile & Ingenieurbefund*, S.8 in: hollinsky+partner, <https://www.hollinsky.at/> (abgerufen am: 21.04.2024)

2.1.2 Aufbau eines Gründerzeithauses

Wie bereits erwähnt folgen Gründerzeithäuser einem gewissen Schema in ihrem Aufbau. Ein typischer Schnitt durch ein Gründerzeithaus ist in Abbildung 5 zu sehen.

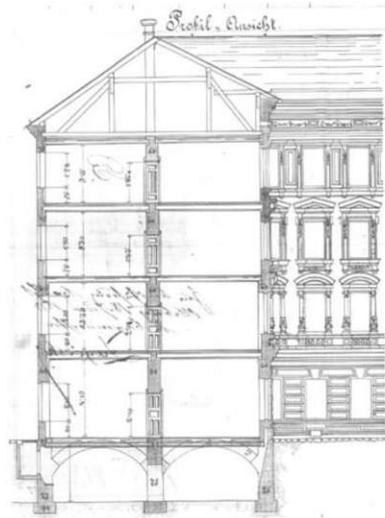


Abbildung 5: Schnitt durch ein Gründerzeithaus¹⁸

Die Fundierung der Gründerzeithäuser wurde meist als Streifenfundamente ausgeführt. Diese Fundamente waren die tragenden Wände, welche in den tragfähigen Untergrund verlängert wurden.¹⁹

Sie wurden aus Normalformatziegel (NF-Ziegel) gefertigt und wie in Abbildung 4 zu sehen ist bilden die Außenwände, sowie die Mittelmauer die tragenden Wände, auf denen die Decken einachsigt gespannt aufliegen. Die Mauerstärke nimmt nach oben hin mit jedem Geschoss ab, der Rücksprung dient als Auflager für die Deckenkonstruktionen. Somit ergaben sich Mauerstärken im Kellergeschoss von bis zu einem Meter. Die Mittelmauer hat eine durchgängige Dicke, da hier auch Einbauten wie Kamine geführt wurden. Die restlichen Wände dienen lediglich zur Aussteifung. Ein bedeutender Unterschied zu heutigen Bauweisen ist, dass die Wände vom Keller bis zum letzten Geschoss durchgängig hergestellt wurden und die Decke nur aufgelagert und mittels Mauerwerksschließen kraftschlüssig verbunden wurde.²⁰

Kellerdecken wurden in Massivbauweise mit Gewölbekonstruktionen ausgeführt. Diese Bauweise ermöglicht eine perfekte Lastabtragung in das Erdreich. Die Geschossdecken wurden zur Gewichtsersparnis als Holztramdecken mit einer Spannweite von 4,5-6 m ausgeführt. Die oberste Geschossdecke musste bis 1868 aus Brandschutzgründen als Doppelbaumdecke ausgeführt werden. Dazu wurden Holzstämmen fugenlos aneinandergelegt und mit Holzdübeln verbunden. Darauf kam eine Beschüttung und zum Abschluss eine Pflasterung aus Ziegeln.²¹

Als Dachkonstruktion wurde typischerweise ein Pfettendachstuhl mit doppeltem Hängewerk ausgeführt.²²

¹⁸ Stadtentwicklung Wien: *Dekorative Fassadenelemente in der Gründerzeit zwischen 1840 und 1918* in: Werkstattbericht Nr. 133, 2013, S.21

¹⁹ vgl. Toniolli Christina: *Die Gründerzeit und ihre architektonischen Merkmale*, in: denk mal neo, 2022, <https://www.denkmalneo.at/blog/die-gruenderzeit-und-ihre-architektonischen-merkmale-1> (abgerufen: 04.04.2024)

²⁰ vgl. Toniolli Christina: *Die Gründerzeit und ihre architektonischen Merkmale*

²¹ vgl. Toniolli Christina: *Die Gründerzeit und ihre architektonischen Merkmale*

²² vgl. Toniolli Christina: *Die Gründerzeit und ihre architektonischen Merkmale*

2.1.3 Heutige Bedeutung des Altbestandes

Bis in die 1970er Jahre wurde dem Altbestand in Wien nicht viel Bedeutung in der Erhaltung zugesprochen. Monumente wurden schon seit dem Jahr 1923 geschützt, allerdings fiel der gewöhnliche Wohnbau nicht darunter. Erst nach dem Protest der Bevölkerung gegen den Abriss einiger Barock- und Biedermeierhäuser im 6. Gemeindebezirk wurden 1972 die ersten Schutzzonen geschaffen. Diese Zonen wurden im Laufe der Zeit noch ausgeweitet. Ebenso wurde einige Unterstützungsfonds zur Erhaltung des Altbestand ins Leben gerufen.²³

Allerdings muss sich eine Großstadt mit den Bedürfnissen der Menschen mitentwickeln. Gebäude, welche vor über 100 Jahren gebaut wurden, entsprechen nicht mehr den heutigen Ansprüchen. Ebenso haben viele Häuser ihre Lebensdauer bereits überschritten. Für die Zukunft stellt sich daher die Frage, ob diese Gebäude nachhaltig revitalisiert werden können oder abgerissen werden müssen. Es muss möglich sein das Bauwerk als Kulturerbe für die kommenden Generationen zu erhalten, aber sich auch an die Anforderungen der Barrierefreiheit und Nachhaltigkeit anpassen zu können.²⁴

Im Sinne der Nachhaltigkeit ist es auch die Bevölkerungsdichte im bereits erschlossenen und an die Verkehrsinfrastruktur angebondenen Stadtgebiet zu erhöhen. Ebenso muss in Betracht gezogen werden, dass ein Neubau deutlich mehr Ressourcen an Baumaterialien benötigt als eine Sanierung.²⁵ Somit sollte sich der Fokus auf die Revitalisierung des Altbestandes und die Nutzung der bereits vorhandenen Ressourcen stützen.

Mit der neuen Bauordnungsnovelle wurde der Schutz von Altbauten, welche vor 1945 errichtet wurden, weiter verschärft. Die wirtschaftliche Abbruchreife ist nicht mehr ausreichend für einen Abbruch. Das aktuelle Erscheinungsbild ist nun relevant für die Ausstellung eines Abbruchbescheids. Allerdings fließen hier auch bauliche Veränderungen mit ein. Sind historische Merkmale aufgrund von Umbauten nicht mehr sichtbar, so werden diese trotzdem zur Beurteilung herangezogen und das Gebäude kann weiterhin als schützenswert betrachtet werden. Ebenso richtet sich die Beurteilung nicht mehr allein auf das Gebäude. Somit wird Erhalt historischer Bausubstanz in einem größeren Maßstab betrachtet und beurteilt. Damit soll ein ganzheitliches Stadtbild erhalten bleiben und nicht nur einzelne historisch bedeutsame Häuser.²⁶

Die Bauordnungsnovelle stellt somit eine Erschwernis zur Erlangung eines Abbruchbescheids dar und ist damit ein weiterer Schritt in Richtung Erhalt und Revitalisierung unzähliger Gebäude in Wien. Dadurch wird der Bedarf an mauerwerksverfestigenden Methoden mehr an Bedeutung gewinnen.

2.2 Mauerwerksfestigkeit

Ziegel aus der Bauperiode der Gründerzeit wurden industriell gefertigt und weisen eine Festigkeit von 6,0-12,0 MPa auf. Die Ziegelfestigkeit kann relativ gut beschrieben werden, im Gegensatz dazu unterliegt die Mörtelfestigkeit deutlich höheren Schwankungen. Mörtel aus hydraulischem Kalk wird mit einer Festigkeit von 3,0-5,0 MPa beschrieben. Messungen ergeben, dass die

²³ vgl. Bucherer, Barbara (2022): S.12-13

²⁴ vgl. Bucherer, Barbara (2022): S.17-21

²⁵ vgl. Steger, S., Wilts, H., Bergs, L., Bergmann, L. (2022). *Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden oder Neubau – Ökologische Bewertung hinsichtlich Materialbedarf, Primärenergieverbrauch und damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen*. Wuppertal Institut.

²⁶ vgl. Brandstetter Magdalena, Lux Vivien: *Wiener Bauordnungsnovelle – So wohnt Wien zukünftig*, in: dorda, 2024, <https://www.dorda.at/de/news/wiener-bauordnungsnovelle-so-wohnt-wien-zukuenftig> (abgerufen: 04.04.2024)

tatsächlichen Werte bis zu 80% darunter liegen. In Gründerzeithäusern werden Festigkeiten zwischen 1-3 MPa gemessen.²⁷

Für die konstruktive Bewertung eines Mauerwerks ist meist nicht die Biegebeanspruchung, sondern die Druckfestigkeit und Schubtragfähigkeit maßgebend. Unter besonderer Beanspruchung stehen meist die Mittelmauern im Erdgeschoss, da hier die größten Lasten eingeleitet werden und diese Bereiche zusätzlich durch Kamineinbauten geschwächt sind.²⁸

Die Mauerwerksfestigkeit kann durch folgende Methoden ermittelt werden:

- Pfeilerversuche
- Bohrkernuntersuchung
- Komponentenprüfung²⁹

Es ist von großer Bedeutung, dass genügend Probestellen ausgewertet werden, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten.³⁰

Pfeiler- & Bohrkernversuche

Durch Pfeiler- und Bohrkernversuche kann direkt die Mauerwerksfestigkeit ermittelt werden.³¹ In Abbildung 6 ist zu sehen wie einer unserer untersuchten Bohrkern entnommen wurde. Zur Entnahme einer solchen Probe wird ein hohles Schneidwerkzeug mit einer Diamantstaubbohrkrone verwendet. Dies garantiert einen sauberen Schnitt durch das harte Mauerwerk und man erhält eine zylinderförmige Probe aus Ziegeln und Mörtel. Leider ist es im Vorhinein nicht immer abschätzbar auf welche Materialien man bei einer Probenentnahme stößt. Die Gebäude haben sich über die Zeit oft verändert und die Baumaßnahmen wurden in den meisten Fällen auch nicht dokumentiert. Ebenso handelt es sich um eine Bauperiode, in der nicht nach Normen gearbeitet wurde und die Materialien eingesetzt wurden, welche gerade verfügbar waren. Daher kann es sein, dass man Bruchziegel, natürliche Gesteine oder Mörtel hinterfüllungen vorfindet. Ein weiterer Nachteil kann sein, dass die Bohrkern nach der Entnahme zerfallen, wenn der Mörtel nicht mehr das entsprechende Haftvermögen aufweist. Somit kann auch kein Druckversuch mehr durchgeführt werden. Natürlich können nicht beliebig viele Bohrungen durchgeführt werden, da dies auch stets eine Schwächung des Mauerwerks mit sich bringt. Daher ist eine direkte Prüfung der Mauerwerksfestigkeit nicht immer durchführbar.

²⁷ vgl. dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123: *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung – Bauhilfsmaßnahmen*, in: 251.2 Denkmalpflege & Bauen im Bestand, 2017, https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://denkmalpflege.tuwien.ac.at/wp-content/uploads/2017/05/17_Denkmal_02_W%25C3%25A4nde-im-BestandWandert%25C3%25BChtigung.pdf&ved=2ahUKEwiBzoLw690FAxWg8QIHVwIBtIQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw (abgerufen am: 21.04.2024)

²⁸ vgl. dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123: *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung – Bauhilfsmaßnahmen*

²⁹ vgl. dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123: *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung – Bauhilfsmaßnahmen*

³⁰ vgl. dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123: *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung – Bauhilfsmaßnahmen*

³¹ vgl. dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123: *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung – Bauhilfsmaßnahmen*

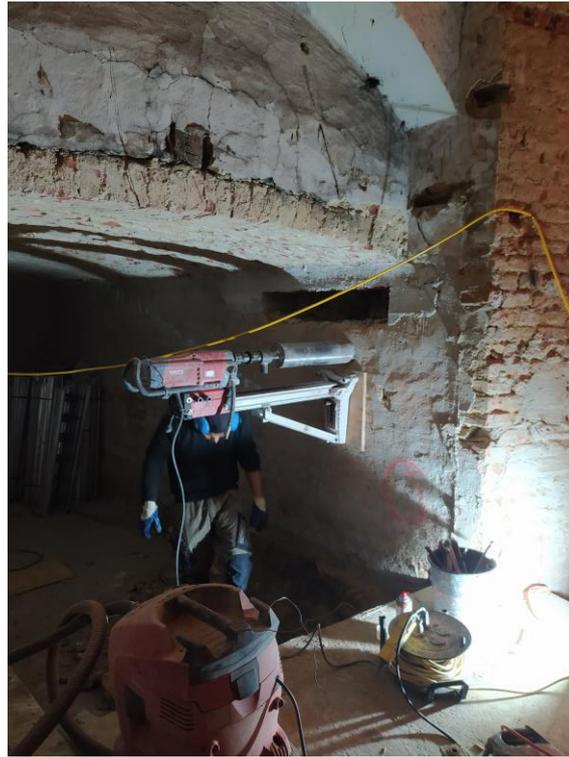


Abbildung 6: Entnahme eines Bohrkerns in der Windmühlgasse 9, 1060 Wien zur weiteren Untersuchung

Soll ein gesamter Pfeiler geprüft werden, sollte dieser einem Mauerwerk im Verband entsprechen und mindestens zwei Steinlängen breit, fünf Steinscharen hoch und eine Steinbreite dick sein.³²



Abbildung 7: Prüfpfeiler aus Vollziegelmauerwerk³³

Die Entnahme und der Transport müssen mit höchster Sorgfalt abgewickelt werden. Im Labor finden, dann die entsprechenden Tests statt. Der Vorteil dieser Prüfmethode ist die Feststellung der tatsächlichen Festigkeitswerte, allerdings müssen Proben aus vergleichbaren Bereichen entnommen werden.³⁴

³² vgl. dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123: *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung – Bauhilfsmaßnahmen*

³³ Gangoly, H., Holzer, P., Maydl, P. & Pech, A. (2018). *Ziegel im Hochbau: Theorie und Praxis*. Basel: Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035616163>, S. 180

³⁴ vgl. Gangoly, H., Holzer, P., Maydl, P. & Pech, A. (2018), S. 180

Als Nachteile müssen die hohen Kosten und die Schwächung des Bestandes genannt werden. Werden kleinere Prüfkörper entnommen, müssen entsprechende Umrechnungsfaktoren angewendet werden.³⁵

Komponentenprüfung

Zur Bestimmung der Steifigkeit f_b werden entweder Steine auf der Baustelle entnommen und im Labor geprüft oder direkt vor Ort die Rückprallmethode angewendet. Seit zirka 30 Jahren ist der Zusammenhang zwischen Rückprallwerten an Ziegeln und deren Druckfestigkeit bekannt, allerdings ist das Bestimmtheitsmaß nicht besonders hoch. Für Festigkeiten geringer als 25 MPa gibt es jedoch eine Korrekturfunktion, wodurch diese Methode durchaus zur Anwendung kommen kann.³⁶

Bei der Ermittlung der Mörtelfestigkeit f_m können folgende Verfahren angewendet werden:

- Stempeldruckprüfung
- Eindringprüfung

Bei der Stempeldruckmethode wird ein Mörtelstückchen mit einer Gipsschicht abgeglichen und anschließend geprüft. Die Methode wird vor allem bei Mörteln mit einer Festigkeit < 5 MPa angewendet und es sind mindestens 10 Einzelprüfwerte heranzuziehen.³⁷

Eine Mörtelprüfung mittels Rückprallhammer aus der Rückprallenergie ist nicht möglich, jedoch können durch das Eindringverhalten der adaptierten Prüfschneide brauchbare Ergebnisse abgelesen werden.³⁸

An jeder Probestelle wird jeweils eine Mörtel- und Ziegelprobe entnommen. Die zugehörigen Festigkeiten werden bestimmt und dann laut Abbildung 8 jeweils kombiniert.³⁹

$$f_k = K * f_b^a * f_m^b \quad [N/mm^2]$$

K ... Beiwert ca. 0,5 bis 0,6 für Normalmörtel

a ... Beiwert $a = 0,65$ für Ziegelmauerwerk

b ... Beiwert $b = 0,25$ für Ziegelmauerwerk

f_b ... Steifigkeit: z.B.: 15 N/mm²

f_m ... Mörtelfestigkeit z.B.: 1 N/mm² bis 3 N/mm²

Bei Verbandsmauerwerk ist der Wert f_k um 20% abzumindern.

Abbildung 8: Berechnung der charakteristischen Mauerwerksfestigkeit nach ÖNORM B 1996-1-1⁴⁰

³⁵ vgl. Gangoly, H., Holzer, P., Maydl, P. & Pech, A. (2018), S. 179-184

³⁶ vgl. Gangoly, H., Holzer, P., Maydl, P. & Pech, A. (2018), S. 182

³⁷ vgl. Gangoly, H., Holzer, P., Maydl, P. & Pech, A. (2018), S. 183

³⁸ vgl. Gangoly, H., Holzer, P., Maydl, P. & Pech, A. (2018), S. 184

³⁹ vgl. dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123: *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung – Bauhilfsmaßnahmen*

⁴⁰ dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123: *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung – Bauhilfsmaßnahmen*

2.3 Mauerwerksinjektion

Die Mauerwerksinjektion ist eine wichtige Methode mit verfestigender als auch abdichtender Wirkung im Zuge der Bauwerkssanierung und -ertüchtigung. Sie wird eingesetzt, um die statischen Erfordernisse zu verbessern oder Hohlräume zu verfüllen und somit zu konsolidieren.⁴¹

Die Füllstoffe werden anhand ihrer Bindemittel unterschieden:

- Reaktive Polymerbindemittel
- Hydraulische Bindemittel

Des Weiteren gibt es die Unterscheidung zwischen kraftschlüssigem Verschluss von Hohlräumen, diese bilden einen Verbund zwischen den Oberflächen und somit können auch Kräfte übertragen werden, oder dem Verfüllen mit quellfähigem Material, welche durch wiederholte Wasseraufnahme aufquellen. Sie dienen lediglich der Wasserdichtheit.⁴²

Die Aufgaben der Mauerwerksverfestigung ist einerseits die Verfüllung von Hohlräumen und andererseits die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Verfestigung des Mörtels. Eine Verfestigung der Mauersteine ist praktisch nicht möglich. Es wird eine Erhöhung der Mörteldruckfestigkeit und somit auch eine Verbesserung der Schubtragfähigkeit von Wandscheiben erreicht. Bei nicht mineralisch gebundenen Injektionsmaterialien ist die maximale charakteristische Mauerwerksfestigkeit durch ca. 80% der Steinfestigkeit beschränkt.⁴³

Für die Planung eines Injektionsprozesses sollte als Erstes eine Bestandsaufnahme mit allen notwendigen Prüfungen erfolgen, Schadensursachen sollten festgestellt und ein Injektionsziel definiert werden. Es gilt die Mauerwerksart, die Stein- und Mörtelfestigkeit, sowie Feuchtigkeitskennwerte zu ermitteln. Optional können noch weitere Prüfverfahren notwendig sein. Im nächsten Schritt sollten die angestrebten Bauwerkseigenschaften definiert und vorangegangene Maßnahmen evaluiert werden.⁴⁴

Zur Festlegung der Injektionsmaßnahmen sind folgende Informationen maßgeblich:

- Funktion und Typ des Mauerwerks
- Material und Zustand von Mauerwerk und Fugenmaterial
 - Festigkeiten
 - Porengröße und -verteilung
 - Feuchtezustand

Abschließend müssen die folgenden Punkte definiert werden:

- Injektionsziel
- Injektionsumfang
- Füllstoff
- Füllvorgang

⁴¹ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, Wien, Dezember 2015, Vorwort

⁴² vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 3

⁴³ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 7

⁴⁴ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 9-10

- Maximaler Injektionsdruck

Zur Verfüllung von Hohlräumen können Epoxidharze oder mineralische Füllstoffe eingesetzt werden. Zur Verfestigung des Mörtels bei Durchfeuchtungsgraden niedriger als 20% werden Epoxid- und Polyurethanharze und bei höherer Feuchtigkeitsbelastung Acryl- oder Polyurethanharze eingesetzt.⁴⁵ Beim Ausfüllen von größeren Hohlräumen sollten vorzugsweise mineralisch basierte Produkte zum Einsatz kommen, da es bei Epoxidharzen in größerer Menge zu einer hohen Wärmeentwicklung kommen kann.

2.3.1 Füllstoffe

Füllstoff mit mineralischem Bindemittel

Diese Materialien erhärten durch die Hydratation eines hydraulischen Bindemittels. Sie werden für den kraftschlüssigen Verschluss von Hohlräumen genutzt und die Endfestigkeit wird durch die Festigkeit der Suspension, sowie durch den Füllgrad bestimmt.

Folgende Injektionsmittel kommen zum Einsatz:

- Zementgebunden
- Mikrozzementgebunden
- Andere hydraulische Bindemittel wie Romanzement, Trass, Muschelkalk
- Kalkgebunden (für Denkmalpflege)⁴⁶

Epoxidharz

Bei lösemittelfreien Epoxidharzen handelt es sich um niedrigviskose Produkte bestehend aus zwei Komponenten. Die A-Komponente besteht aus dem Epoxidharz und die B-Komponente ist ein Amin-Härter. Durch die Reaktion der beiden Suspensionen entstehen Duomere mit hoher Eigen- und Haftfestigkeit. Epoxidharze können in trockener Umgebung und einer Bauteiltemperatur größer 8°C angewendet werden.⁴⁷

Polyurethanharz (PU-Harz)

Diese niedrigviskosen und lösungsmittelfreien Harze können in Form einer Komponente oder zweikomponentig eingesetzt werden. Materialien, welche lediglich aus einer Komponente bestehen reagieren mit dem vorhandenen Wasser im Anwendungsbereich. Dadurch hängen die Eigenschaften nach dem Aushärten stark von der vorherrschenden Feuchtigkeit ab. Dies kann zu uneinheitlichen Festigkeitsverhältnissen führen. Ein Vorspülen mit Wasser kann von Vorteil sein, um ausreichend Feuchtigkeit zu gewährleisten und die Abbindezeit zu verkürzen. Produkte aus zwei Komponenten erhärten durch die Reaktion mit ihrem Härter. Zweikomponentige Harze eignen sich durch ihre hohen Druck- und Zugfestigkeiten, sowie der raschen Festigkeitsentwicklung ideal zur Verfestigung von Mörtelschichten. Die Reaktionszeit kann durch Katalysatoren beschleunigt werden. Es entstehen vernetzte Polymere, welche sowohl hoch verformbar bis zu hochfest sein können. Polyurethan benötigt eine Mindestbauteiltemperatur von 5°C, um die Produkteigenschaften ausreichend entwickeln zu können.⁴⁸

⁴⁵ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 13-15

⁴⁶ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 16

⁴⁷ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 18

⁴⁸ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 18

Acrylharz

Niedrigviskose, lösungsmittelfreie Zweikomponenten-Acrylharze zeichnen sich durch ihre hohe Druck- und Zugfestigkeit, sowie der raschen Festigkeitsentwicklung aus. Ausgehärtet können sie eine harte oder flexible Struktur ausbilden. Durch Zugabe von Beschleunigern und Verzögerern ist das Reaktionsverhalten bei der Verarbeitung einfach zu beeinflussen.⁴⁹

2.3.2 Injektionsverfahren

Prinzipiell gibt es das Niederdruckverfahren bis maximal 10 bar, welches dort angewendet wird wo aufgrund des Mauerwerksgefüges keine höheren Drücke zulässig sind, und das Hochdruckverfahren mit Drücken über 10 bar. Mit den Injektionspumpen wird das Material in das Mauerwerk gepresst. Die Geräte sind mit Druck- und Mengenregulierung ausgestattet. Den Injektionsanschluss bilden die Packer. Diese müssen dicht im Bauwerk verankert sein und ein unkontrolliertes Auslaufen oder einen Rückfluss verhindern.⁵⁰

Arten von Packern:

- Schlauchpacker
- Bohr- und Schlagpacker
- Klebepacker⁵¹

Vorab wird durch den beauftragten Statiker definiert, welche Bauteile zu injizieren sind. Teilweise werden nur die Fundamente oder einzelne Bauteile verfestigt. Manchmal wird im Zuge der Erdbebenertüchtigung, anstatt eine Rahmenkonstruktion auszuführen, das Mauerwerk in diesen Bereichen ertüchtigt. Der Statiker gibt an, wie viel Material injiziert werden muss und mit welchen Abständen der Bohrraster angeordnet wird.⁵²

Bei einem Referenzprojekt lag eine Mauerwerksfestigkeit von 3,72 MPa des unbehandelten Mauerwerks vor. Die Steindruckfestigkeit lag bei 22,5 MPa, die Mörtelfestigkeit bei 1,1 MPa. Die statischen Berechnungen wurden durch das Ziviltechnikerbüro Dr. Pech Ziviltechniker GmbH erstellt. Im Zuge dessen wurde Tabelle 1 erstellt. Sie zeigt je nach Injektionsmenge an Epoxidharz, die zu erreichenden Mauerwerksfestigkeiten. Die erforderlichen Werte sind von Projekt zu Projekt unterschiedlich und hängen von den Ausgangsmaterialien, dem Injektionsmaterial und der Injektionsmenge ab. Es ist wesentlich, die Komponentenfestigkeiten zu kennen und zu beachten, dass die Mauerwerksfestigkeit maximal 80% der Steinfestigkeit erreichen kann. Somit limitiert ein schlechter Ziegel das Ergebnis massiv. In der Praxis haben sich Zielfestigkeiten von 10 MPa als realistisch erwiesen, welche mit einer Injektionsmenge von 60-80 kg/m³ mit einer gleichmäßigen Verteilung erreicht werden kann.⁵³

⁴⁹ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 19

⁵⁰ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 20

⁵¹ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 23

⁵² Porr Bau GmbH, Absberggasse 47, 1100 Wien

⁵³ Dr. Pech Ziviltechniker GmbH, Johann-Strauß-Gasse 32/11, 1040 Wien

F_k-Bruch [MPa]	Epoxidharz [kg/m³]
12,23	160
10,99	100
9,82	60
3,72	0

Tabelle 1: Mauerwerksfestigkeiten je nach Menge an injiziertem Epoxidharz in kg/m³ eines Referenzprojekts⁵⁴

Bevor mit dem eigentlichen Verpressvorgang begonnen wird, wird ein Testfeld angelegt. Hierbei wird in einem Bereich von 1 m² der vorgegebene Raster gebohrt und die definierte Menge an Epoxidharz in das Mauerwerk injiziert. Nach dem Aushärten wird ein Bohrkern aus der Wand gezogen und dieser im Labor geprüft. Sollten die erforderlichen Festigkeitswerte nicht erreicht werden, können einerseits die Rasterabstände verringert oder andererseits die injizierte Menge an Harz erhöht werden. Ebenfalls gibt es die Möglichkeit, die Bohrungen im 45° Winkel in jede Richtung anzuordnen. Dadurch kann eine bessere Verteilung des Materials gewährleistet werden.⁵⁵

Als erster Schritt des Injektionsprozesses erfolgt eine Verdämmung des Mauerwerks mittels Verputzes, um das Austreten der Injektionsmasse zu verhindern. Bei Verwendung von Füllstoffen mineralischer Basis oder PU-Harzen mit nur einer Komponente ist ein Vorbefeuchten über den Bohrkanal notwendig.⁵⁶

Im nächsten Schritt werden die Bohrungen mit dem vorgegebenen Raster hergestellt. Die Rasterabstände werden durch den betreuenden Statiker vorgegeben. Ein übliches Rastermaß ist jedoch 25 cm versetzt zueinander. Beispielhaft ist ein solcher Bohrraster in Abbildung 9 dargestellt. Anschließend werden die Packer versetzt, welche über Rückschlagventile verfügen und somit einen Rückfluss des Injektionsmaterial verhindern. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, bleiben die Packer nach der Injektion im Mauerwerk bestehen.⁵⁷

⁵⁴ Dr. Pech Ziviltechniker GmbH, Johann-Strauß-Gasse 32/11, 1040 Wien

⁵⁵ Porr Bau GmbH, Absberggasse 47, 1100 Wien

⁵⁶ vgl. Österreichische Bautechnik Vereinigung *Richtlinie Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*, S. 20-25

⁵⁷ Porr Bau GmbH, Absberggasse 47, 1100 Wien

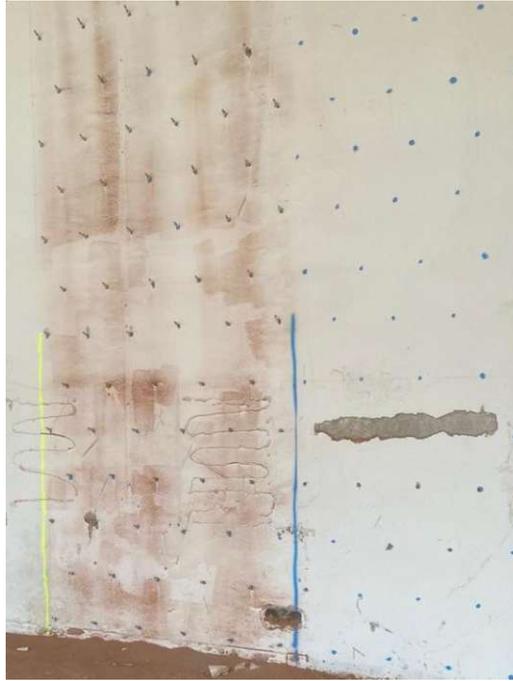


Abbildung 9: beispielhafter Bohrraster bei einer Mauerwerksinjektion mit Epoxidharz⁵⁸



Abbildung 10: Querschnitt durch ein Mauerwerk mit sichtbaren verbleibenden Packern⁵⁹

Der anfängliche Einbringdruck darf nicht zu hoch sein, da es sonst zu einer schnellen Reaktion des Materials kommen kann und ein weiteres Injizieren dadurch verhindert wird. Während des Vorgangs wird dokumentiert, wie viel Material bereits eingebracht wurde, wobei die Beurteilung oftmals von der Erfahrung des Personals abhängt. Ebenso ist die Topfzeit des verwendeten Materials von Bedeutung. Diese gibt das Ende der Verarbeitbarkeit des Injektionsstoffes an. Hierbei ist zu beachten, dass die Topfzeit sowohl von der Luft- als auch Mauerwerkstemperatur

⁵⁸ Porr Bau GmbH, Absberggasse 47, 1100 Wien

⁵⁹ Porr Bau GmbH, Absberggasse 47, 1100 Wien

anhängig ist. Bei höheren Temperaturen verkürzt sie sich deutlich und es kann so zu Beschädigungen an den Maschinen kommen. Sind im Mauerwerk zu große Hohlräume vorhanden, muss es zuerst mit einer Zementsuspension verfüllt werden, da es bei einer zu hohen Konzentration an Epoxidharz zu einer erhöhten Wärmeentwicklung kommt. Dadurch können Risse im Material entstehen, welche wiederum die Festigkeit beeinflussen können.⁶⁰

Nach der Aushärtezeit werden die Packer abgeschlagen und die Bohrlöcher verschlossen.⁶¹

2.3.3 Wasserglas als Alternative zu Epoxidharz

Gründe für die Wahl von Wasserglas als Ersatzmittel in der Mauerwerksinjektion ist einerseits der umwelttechnische Aspekt. Aus der Literatur geht hervor, dass Wasserglas ein deutlich geringeres Erderwärmungspotential hat als Epoxidharz. Die Werte liegen hier zwischen 0,3 und 3,3 kg CO₂-equivalent/kg des Materials.⁶² Das Erderwärmungspotential von Epoxidharz liegt vergleichsweise bei 6,73 kg CO₂-equivalent/kg.⁶³

Andererseits spielt auch der Denkmalschutz in Österreich eine Rolle, denn bei Instandsetzungsmaßnahmen ist stets auf Materialkontinuität zu achten.⁶⁴ Eingriffe mit Epoxidharz sind zum einen nicht reversibel und zum anderen handelt es sich um ein nicht historisches Material. Ebenso wird die Wasserdampfdurchlässigkeit des Mauerwerks beeinträchtigt, die Struktur kann zu stark ausgesteift werden und der Recyclingprozess am Ende des Lebenszyklus wird erschwert.⁶⁵

Wasserglas ist eine Lösung bestehend aus Siliziumdioxid (SiO₂) und Natriumoxid (Na₂O) und kann ein Gewichtsverhältnis von SiO₂/Na₂O von 1,6-3,8 aufweisen. Je nach Mischungsverhältnis besitzt das Produkt eine andere Viskosität und Fließfähigkeit. Ein erhöhter Anteil an SiO₂ erhöht in Folge die Viskosität, welche jedoch für die Injizierbarkeit des Materials niedrig gehalten werden sollte. In der ersten Testreihe wurde der Injektionsprozess vorerst außer Acht gelassen und der Fokus lag auf der Reaktivität von altem Mörtel und Wasserglas. SiO₂ eine wichtige Rolle zur Bildung von C-S-H.⁶⁶ C-S-H entspricht in seinem Materialverhalten grundlegend dem des originalen Kalkmörtels und liefert somit im verfestigten Zustand eine Materialkontinuität, welche Epoxidharz nicht gewährleisten kann.

C-S-H ist das Hauptprodukt, welches bei der Hydratation von Portlandzement entsteht und ist hauptverantwortlich für die Festigkeit von Zement. Luftkalk bildet seine Festigkeit rein durch den Prozess der Karbonatisierung. Jedoch wird die Mörtelmatrix im Laufe der Zeit durch Risse, Feuchtigkeit und Salzeinflüsse zerstört und verliert ihre Festigkeit. In Abbildung 11 wird die Reaktionsgleichung gezeigt, welche darstellt, wie durch die Reaktion zwischen Wasserglas und dem im Kalkmörtel enthaltenen Calcium C-S-H zur Verfestigung des Materials entstehen kann. Von grundlegender Bedeutung ist es daher, dass Calcium in ausreichender Menge im Mörtel vorhanden ist. Der im Kalkmörtel enthaltene Kalzit kann eine Calciumquelle sein, jedoch ist die

⁶⁰ Porr Bau GmbH, Absberggasse 47, 1100 Wien

⁶¹ Porr Bau GmbH, Absberggasse 47, 1100 Wien

⁶² vgl. Witzleben S. (2022) *Minimizing the Global Warming Potential with Geopolymer-Based Insulation Material with Miscanthus Fiber*. *Polymers*; 14(15):3191. <https://doi.org/10.3390/polym14153191>

⁶³ vgl. Chard JM, Basson L, Creech G, Jesson DA, Smith PA. *Shades of Green: Life Cycle Assessment of a Urethane Methacrylate/Unsaturated Polyester Resin System for Composite Materials*. *Sustainability*. 2019; 11(4):1001. <https://doi.org/10.3390/su11041001>

⁶⁴ vgl. Bundesdenkmalamt. (2015). *Standards der Baudenkmalpflege; 2., korr. Auflage.*, S. 107

⁶⁵ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 36

⁶⁶ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 39-40

Reaktivität sehr langsam. Daher wird ein zweistufiger Prozess mit einer vorangehenden Injektion einer Portlandit-Suspension in Erwägung gezogen, um eine schnellere Reaktion herbeizuführen.⁶⁷

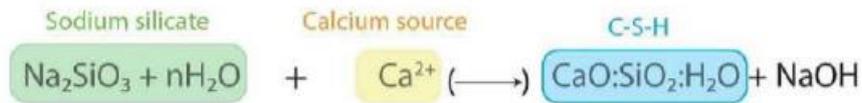


Abbildung 11: vereinfachte Reaktionsgleichung zur Bildung von C-S-H durch Natriumsilikat und Calcium-Ionen⁶⁸

Das Ziel ist es durch die Injektion von Wasserglas in das Mauerwerk eine Reaktion mit Calcium hervorzurufen und dadurch das in Abbildung 11 dargestellte C-S-H zu bilden. Dieser Effekt soll die Festigkeit von beschädigtem Mörtel im Mauerwerk wieder herstellen und sie darüber hinaus noch verbessern. Um die festigkeitsverbessernden Eigenschaften von Wasserglas zu testen, wurden NHL-Probewürfel hergestellt und diese in weiterer Folge mit Wasserglas bearbeitet.

2.4 Kalkmörtel im Altbestand

2.4.1 Analyse des historischen Mörtels

Zur Analyse von historischem Mörtel wurden drei Bohrkern unterschiedlicher Bauwerke von der Porr Bau GmbH zur Verfügung gestellt und im Zuge dieser Arbeit untersucht.

- Kärntner Ring 8, 1010 Wien; Baujahr: 1851 - 1860
- Windmühlgasse 9, 1060 Wien; Baujahr: 1891 - 1900
- Neutorgasse 56, 8010 Graz; Baujahr: 19. Jahrhundert

Die Daten der Baujahre wurden der Publikation „Data description of “building age map, Vienna, around 1920““ entnommen.⁶⁹

Die Problematik, welche sich bei der Analyse von Bestandsmaterial immer ergibt, ist die Quantität des zu untersuchenden Materials. Als erstes ist nie bekannt, wie viel Material durch einen Bohrkern gewonnen werden kann, da die Aufbauten oftmals unbekannt sind, und als zweites können Bohrkern nur an Stellen angeordnet werden, an denen sie die Struktur des Gebäudes nicht weiter schwächen.

Aus diesen Gründen stellte sich beispielsweise der Bohrkern des Gebäudes am Kärntner Ring 8 als nicht zufriedenstellend heraus, da sich hinter der vermeintlichen Ziegelwand im Kellergeschoss eine Art Betonhinterfüllung befand (siehe Abbildung 12).

⁶⁷ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 39-40

⁶⁸ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 40

⁶⁹ Reimer, F., Kral, U., Sönmez, E. C., Hauer, F., Hohensinner, S., Wolfinger, H., Stuppacher, K., Danzinger, A., Hengl, I., Prospero, L., Prunner, S., & Rechberger, H. (2022). *Data description of “Building age map, Vienna, around 1920.”* Data in Brief, 41(107864), 107864. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107864>



Abbildung 12: Bohrkern aus dem Gebäude Kärntner Ring 8 bestehend aus einer betonartigen Matrix

Aufgrund der höheren Quantität an Mörtel der Probe aus Graz (siehe Abbildung 13) wurde diese einer genaueren Analyse unterzogen, um die genaue Zusammensetzung eines Mauermörtels aus der Gründerzeit nachvollziehen zu können.



Abbildung 13: entnommener Bohrkern aus dem Gebäude Neutorgasse 56, 8010 Graz

Im ersten Schritt wurde das Mörtelmaterial händisch mit Hammer und Meißel von den Ziegeln getrennt (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14: händische Trennung des alten Mörtels von den Ziegeln des Bohrkerns mittels Hammer und Meisel

Das dadurch gewonnene Mörtelmaterial (siehe Abbildung 15) wurde dann in einem weiteren Schritt händisch mit einem Hammer noch weiter zerkleinert, jedoch wurde darauf geachtet, dass die Kraftausübung nicht zu hoch ist, damit die Sandstrukturen nicht weiter zerkleinert werden.



Abbildung 15: abgeklopfter alter Mörtel des Bohrkerns

Im Anschluss wurde das zerkleinerte Material gesiebt (siehe Abbildung 16).



Abbildung 16: zerkleinertes & anschließend gesiebtes altes Mörtelmaterial

Die kleinste verwendete Maschenweite betrug 0,063 mm. Jener Anteil, welcher unter der Korngröße von 0,063 mm liegt, wird in der Literatur typischerweise als Bindemittel gesehen. Allerdings lag der Masseanteil dieser Korngröße gerade einmal bei 1-4%. Dieser Wert wurde als nicht realistisch angesehen, da die Bindemittelanteile in der Praxis mindestens 7% betragen. Das niedrige Ergebnis wird aus der mechanischen per Hand durchgeführten Trennung der Gesteinskörnung geschlussfolgert. Um die einzelnen Kornfraktionen nicht zu beschädigen, wurde mit besonderer Sorgfalt gearbeitet, dabei ist anzunehmen das nicht alle verbundenen Körnungen unter 0,063 mm getrennt werden konnten. Für weitere Analysen wurde daher jenes Material mit einer Korngröße kleiner als 0,25 mm herangezogen.⁷⁰

Um zu testen, ob die alten Mörtelproben noch ein Reaktionspotential aufweisen, wurden rheologische Untersuchungen unter Oszillation durchgeführt. Drei Pasten mit unterschiedlichen Körnungen (<0,063 mm, <0,09 mm & <0,25 mm) wurden getestet. Die rheologischen Untersuchungen ergaben, dass die Reaktivität bei allen Proben vorhanden, jedoch die der 0,063 mm Paste deutlich ausgeprägter war.⁷¹

Um nun das genaue Verhältnis zwischen Gesteinskörnung und Bindemittel herauszufinden, wurden 10-12 Mörtelstücke einem Säureangriff unterzogen. Die Säure löst den Bindemittelanteil auf und die verbleibenden Anteile können dem Zuschlagsstoff zugeordnet werden. Die Probestücke wurden manuell mit Bedacht zerkleinert und anschließend gewogen. Danach wurde das Material zwei Tage im Ofen bei 105 °C getrocknet, bis es ein konstantes Gewicht erreichte. Im Anschluss wurde der getrocknete Mörtel mit einer Lösung aus Chlorwasserstoff (HCl) mit einer Dosierung von 2mol/L vermischt und 30 Minuten kontinuierlich gerührt. In Folge wurde die Mischung gefiltert und die verbleibenden Feststoffe nochmals im Ofen bei 105 °C getrocknet und zum Schluss gewogen. Durch den Massenunterschied des Endgewichtes und des Initialgewichtes war es möglich den Bindemittelanteil zu evaluieren. Das Verhältnis zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung betrug 1:4.⁷²

⁷⁰ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 37-38

⁷¹ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 37-38

⁷² vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 37

In einem weiteren Schritt wurde die Probe mittels Röntgen-Pulverdiffraktometrie (XRPD) untersucht. XRPD ist eine der wichtigsten Analysetechniken für die Charakterisierung kristalliner Materialien. Um die Zusammensetzung des Mörtels besser zu verstehen, wurde eine quantitative Phasenanalyse (QPA) unter Verwendung der internen Standardmethode (ZnO) durchgeführt. Die Beugung von Röntgenstrahlen an einem kristallinen Material ergibt ein XRD-Muster, das aus einer Reihe von Peaks mit verschiedenen Intensitäten bei bestimmten Beugungswinkeln besteht. Das wichtigste Gesetz hinter der Beugungstheorie ist das Braggsche Gesetz. Das Ergebnis der XRPD-Analyse der Mörtelprobe aus Graz ist in Tabelle 2 dargestellt.⁷³

Erfasste Phasen	Quantität [wt. %]
Quarz (SiO ₂)	~58
Kalzit (CaCO ₃)	~16
Muskovit (KAl ₂ (SiAl)O ₁₀)	~10
Amorphes Material	~7
Feldspat	~5
Restliche Anteile	~4

Tabelle 2: Ergebnis der Mörtelanalyse mittels XRPD der Mörtelprobe aus Graz⁷⁴

Alle Anteile bis auf den Kalzit können der Gesteinskörnung zugeordnet werden. Es gibt keine Nachweise der Klinkerphasen Alit oder Belit, welche Bestandteile von Zement sind, daher kann davon ausgegangen werden, dass es sich nicht um Mörtel aus hydraulischem Zement, sondern um einen Luftmörtel handelt. Das Hauptprodukt zur Festigkeitsentwicklung war dementsprechend Portlandit, welches im Zuge des Karbonatisierungsprozesses in Kalzit umgewandelt wurde. Portlandit konnte nicht mehr nachgewiesen werden, daher kann der Mörtel als vollständig karbonatisiert gesehen werden. Dadurch konnte die Erkenntnis des Säureangriffs nochmals untermauert werden.⁷⁵

Der Kalzit beinhaltet den richtigen Reaktionspartner für das von uns zu untersuchende Wasserglas. Leider ist die Reaktivität von Kalzit sehr langsam, daher wird für die künftige Anwendung eine vorangehende Injektion mit einer Portlandit-Suspension unverzichtbar sein. Die Natriumsilikate reagieren mit den Calcium-Ionen und bilden somit C-S-H. C-S-H ist das Hauptprodukt der Hydratation von Zement und ist für die Festigkeit des Materials verantwortlich.⁷⁶

2.4.2 Neuer NHL-Mörtel

Aufgrund der unzureichenden Verfügbarkeit von altem Mörtel wurde ein heutzutage leicht erhältliches Ersatzprodukt gewählt. Die Wahl fiel auf natürlichen, hydraulischen Kalk (NHL 3,5) der Marke Baumit, da die erreichbaren Festigkeiten in einem ähnlichen Bereich des alten Mörtels liegen. Die chemische Zusammensetzung des NHL wurde ebenfalls mittels XRPD analysiert und

⁷³ vgl. Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B., & Press, C. R. C. (Eds.). (2016). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials* (Vol. 540). Boca Raton, FL, USA:: Crc Press.

⁷⁴ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 38

⁷⁵ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 38-39

⁷⁶ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 39

kommt dem Bindemittel des alten Materials sehr nahe. Die Ergebnisse der XRPD-Analyse sind in Tabelle 3 dargestellt. Der hohe Anteil an Portlandit ermöglichte es die Proben direkt in Kontakt mit Wasserglas zu testen und die vorherige Injektion mittels einer Portlandit-Suspension in diesem Arbeitsschritt zu vernachlässigen. Der NHL-Härtungsprozess wird durch das Vorhandensein von C2S und C3S verkürzt, die eine schnellere Aushärtung des Materials vor dem Karbonisierungsprozess ermöglichen, welche dem Projektfortschritt zugutekommt.⁷⁷

Erfasste Phasen	Quantität [wt. %]
Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$	~32
Kalzit (CaCO_3)	~24
Belite (C2S)	~22
Amorphes Material	~7
Quarz (SiO_2)	~4
C3A	~2
Alite (C3S)	~2
Restliche Anteile	~7

Tabelle 3: Ergebnis der Analyse mittels XRPD von NHL 3,5 der Marke Baumit⁷⁸

2.4.3 Ausbreitmaß & Wasserbindemittelwert

Üblicherweise wird Kalkmörtel mit einem Mischungsverhältnis von 1:3 zwischen Kalk und Gesteinskörnung und unter Zugabe von zirka 0,5 kg Wasser pro Kilogramm Kalkhydrat angemischt. Nachdem der Säureangriff ein Mischungsverhältnis von 1:4 vorgab, musste die Wasserzugabe entsprechend adaptiert werden. Hierzu eignet sich die Verwendung des Ausbreitmaßes, um die beste Konsistenz zu evaluieren. Das Ausbreitmaß wurde laut ÖNORM EN 1015-3 getestet. Es wurden vier verschiedene Mischungen mit unterschiedlichen Wasserbindemittelwerten (W/B-Wert) dem Versuch unterzogen.

Folgende Werte für das Ausbreitmaß für die verschiedenen Wasserbindemittelwerte konnten ermittelt werden:

W/B-Wert	Ausbreitmaß [cm]
0,70	Kein Wert
0,80	13,70
0,90	16,10
0,95	16,30

Tabelle 4: Ausbreitmaß der NHL-Mörtelmischung mit einem Kalk-Sand-Verhältnis von 1:4 abhängig vom W/B-Wert

⁷⁷ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 41-43

⁷⁸ vgl. Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kimbauer, J., & Deix, K. (2023), S. 42

Das Gemisch mit einem W/B-Wert von 0,70 war bröckelig und ist so zur Verarbeitung als Mörtel ungeeignet (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Ausbreitversuch der NHL-Mörtelmischung mit einem W/B-Wert von 0,70

Die beste Konsistenz lieferte der W/B-Wert von 0,90 (siehe Abbildung 18). Das Ausbreitmaß lag laut ÖNORM EN 1015-6 im plastischen Bereich und wies die beste Verarbeitbarkeit auf.⁷⁹



Abbildung 18: Ausbreitversuch der NHL-Mörtelmischung mit einem W/B-Wert von 0,90

⁷⁹ Austrian Standards International ÖNORM EN 1015-3:2007-03-01 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel, Wien: Austrian Standards International, 2007, S. 6

2.4.4 Herstellung NHL-Probewürfel

Als Schlussfolgerung wurde die Rezeptur unserer Probewürfel mit dem Mischungsverhältnis von Kalk zu Sand mit 1:4 und einem W/B-Wert von 0,90 definiert. Aus diesen Werten ergab sich die in Tabelle 5 dargestellte Rezeptur zur Mörtelherstellung.

Bestandteile	Masse [g]
Sand Körnung 0/1	1600
NHL	400
Wasser	360

Tabelle 5: ermittelte Rezeptur des NHL-Mörtels für die Reproduktion des alten Mörtels

Nach dem Abmischprozess wurde die Masse in Würfelformen mit einer Seitenlänge von 5 cm in zwei Lagen eingefüllt und schichtweise händisch mittels Stößel verdichtet (siehe Abbildung 19). Zum Abschluss wurden die Probenoberseiten händisch mit einer Spachtel glattgestrichen.

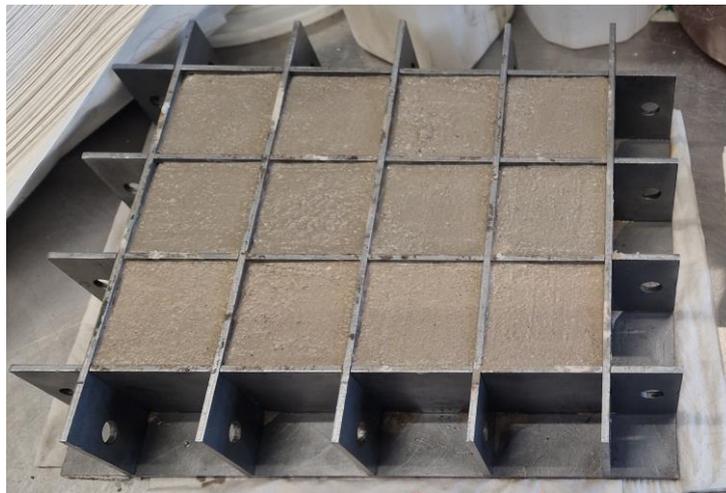


Abbildung 19: Produktion der NHL-Würfelproben mit den Abmessungen 5 x 5 x 5 cm

Anschließend wurden die Proben einen Tag innerhalb der Form belassen. Die Oberfläche wurde nicht abgedeckt, um die Karbonatisierung nicht zu beeinflussen. Am Folgetag wurden die Testexemplare herausgenommen und in der Klimakammer bei 20°C und 60,5% relativer Luftfeuchte (rF) gelagert. Die Lagerung erfolgte auf einem Gitterträger, welcher auf Auflagern gestützt war, um einen allseitigen Kontakt der Probewürfel mit der Atmosphäre und dadurch eine gleichmäßige Karbonatisierung zu gewährleisten (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Lagerung der NHL-Probewürfel auf einem Gitterträger zur Gewährleistung einer allseitig gleichmäßigen Karbonatisierung in der Klimakammer bei 20°C und 60,5% rF

Die Lagerungszeit bis zu den weiteren Versuchen betrug 7, 14, 28 und 56 Tage. Für jede Art von Versuch wurden drei Testkörper hergestellt.

3 Methodik

3.1 Karbonatisierung

Um die Tiefe der Karbonatisierung zu veranschaulichen, wurden jeweils ein Probewürfel nach 7, 14, 28 und 56 Tagen mittig durchtrennt und die Trennfläche anschließend mit Phenolphthalein besprüht. Phenolphthalein ist in einem pH-Wert-Bereich von 0-9 farblos, darüber ändert es seine Farbe zu pink. Portlandit besitzt einen pH-Wert von ca. 12. Verfärbt sich die Oberfläche, so ist dies ein Zeichen, dass der Bereich noch nicht karbonatisiert ist. In Abbildung 21 ist die Wirkungsweise von Phenolphthalein auf karbonatisiertem Zement veranschaulicht.

The carbonation reaction

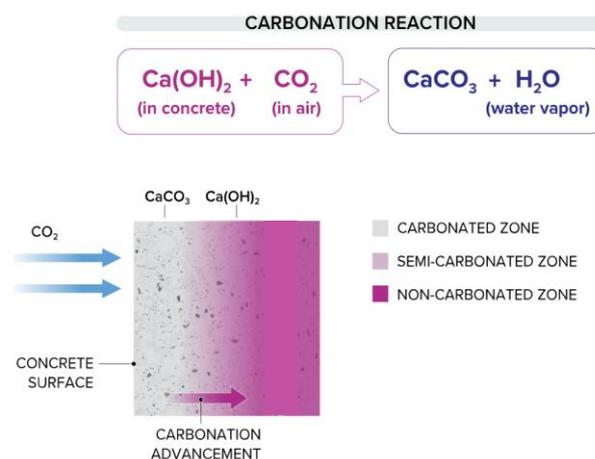


Abbildung 21: Karbonatisierungsprozess von Zement und die Veranschaulichung durch Phenolphthalein⁸⁰

3.2 Wasseraufnahmekoeffizient

In einem weiteren Versuch wurde der Wasseraufnahmekoeffizient der ausgehärteten Proben ermittelt. Die Grundlage des Versuchsablauf bildet die ÖNORM EN 1925 „Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung“.

Als erstes wurden die Versuchskörper gewogen und anschließend bei 70°C 24 Stunden bis zur Massenkonstanz getrocknet. Dies bedeutet, dass der Massenverlust in zwei aufeinanderfolgenden Wägungen geringer als 0,1% sein muss. Nach dem Trocknungsvorgang wurden die Proben bis zum Erreichen der Raumtemperatur in einem geschlossenen Behälter gelagert, um die erneute Aufnahme von Feuchtigkeit zu verhindern. Im Anschluss wurden die Würfel erneut gewogen und die Länge der Seitenflächen bestimmt.

Die Versuchsanordnung war wie folgt:

Die Proben wurden auf Auflagern in einem Behälter platziert. Anschließend wurde Wasser eingefüllt, sodass die Unterseite der Würfel 3 mm in Wasser getaucht war. Dann wurde das Behältnis verschlossen, um ein Verdunsten der Flüssigkeit zu verhindern.

⁸⁰ überarbeitet von: Waldrop, M. (16. November 2022). *The road to low-carbon concrete*. Knowable Magazine. doi:10.1146/knowable-111622-1

Die Wiegezeiten wurden mit 5 Minuten, 15 Minuten, 1 Stunde, 3 und 5 Stunden definiert. Nach Ablauf dieser Zeiten wurden die Testexemplare aus dem Behälter genommen, die eingetauchte Seite mit einem Tuch abgewischt und die Probe anschließend gewogen. Danach wurden die Würfel wieder in das Behältnis gesetzt und dieses wieder verschlossen. Das Prozedere wurde zu jedem Zeitpunkt wiederholt.

Abschließend wurde der Wasseraufnahmekoeffizient laut Formel 4 aus ÖNORM EN 1925 berechnet. Wenn der Korrelationskoeffizient zwischen den Messpunkten des ersten Teils kleiner als 0,95 ist, muss wie folgt vorgegangen werden:

$$a = \frac{m_f - m_d}{A}$$

Formel 1: höchste flächenbezogene Masse Wasser [g/m²] laut ÖNORM EN 1925

$$b = \frac{1}{\sqrt{t_i}}$$

Formel 2: längenbezogener Wassereindringkoeffizient [1/s^{0,5}] laut ÖNORM EN 1925

$$y_i = \frac{m_i - m_d}{A}$$

Formel 3: flächenbezogene, bis zum Zeitpunkt t_i, aufgenommene Masse Wasser [g/m²] laut ÖNORM EN 1925

$$C_i = a \cdot b$$

Formel 4: Formel für Wasseraufnahmekoeffizient laut ÖNORM EN 1925

C_i...Wasseraufnahmekoeffizient durch Kapillarität in $\frac{g}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$

m_i... nacheinander bestimmte Massen des Probekörpers nach dem Eintauchen während der Prüfung in Gramm

A... Fläche der in Wasser getauchten Seite des Probekörpers in m²

t_i... Zeiten, vom Beginn der Prüfung bis zu den Zeitpunkten, bei denen die Massen m_i gemessen werden in Sekunden

m_f... Masse des Probekörpers bei Versuchsende in Gramm

m_d... Masse des getrockneten Probekörpers in Gramm

3.3 Druckversuche

Die Druckversuche erfolgten mittels „Zwick Roell testControll II“. Vor den Versuchen wurden die Probewürfel gewogen und die Seitenlängen bestimmt. Im Anschluss wurden die Testexemplare wie in Abbildung 22 gezeigt in der Druckprüfmaschine platziert und bis zum Versagen geprüft.

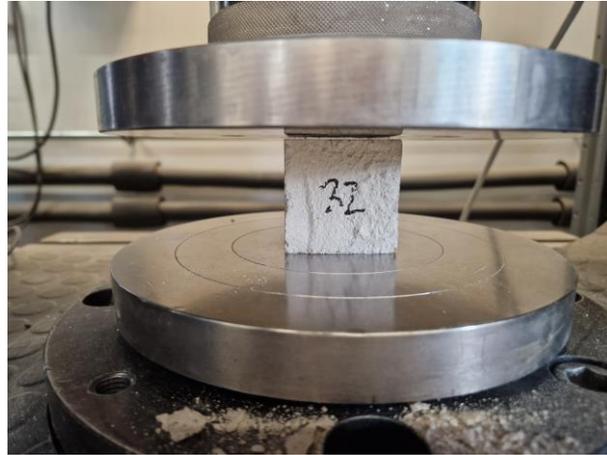


Abbildung 22: Versuchseinrichtung der „Zwick Roell testControll II“ für Druckversuche der NHL-Probewürfel

3.4 In Wasserglas getränkte Proben

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Proben verschiedenen Alters (7, 14, 28 und 56 Tage) in Wasserglas getränkt. Das verwendete Wasserglas hat folgende Eigenschaften:

- Konzentration: 35,3% NaSiO_3 in Wasser (27,15% SiO_2 ; 7,15% Na_2O)
- Dichte; 1,37 g/cm^3
- Viskosität: 50-260 mPas

Vor der Versuchsdurchführung wurden die Proben in trockenem Zustand gewogen, um in weiterer Folge ermitteln zu können wie viel Wasserglas die Teststücke aufnehmen konnten. Zirka 250 Gramm Wasserglas wurde jeweils in einen Becher gefüllt und die Würfel allseitig darin getränkt (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23: mit Parafilm verschlossene Behälter mit den allseitig in Wasserglas getränkten NHL-Proben

Anschließend wurden die Becher mit einem Parafilm verschlossen, um die Verdunstung des Wasserglases zu vermeiden. Die Proben wurden 24, 48 & 72 Stunden in Wasserglas gelagert, um zu sehen, ob die Lagerungsdauer ebenfalls einen Einfluss auf die Festigkeit hat. Es wurde kein

zusätzlicher Druck aufgebracht, um die Flüssigkeit in die Testkörper zu pressen. Sie haben lediglich das aufgenommen, was durch die eigene Kapillarität möglich war. Nach Ablauf der Verweildauer in Wasserglas wurden die Proben allseitig mit einem Papiertuch getrocknet, um überschüssiges Material zu entfernen. Anschließend wurden die Würfel gewogen und zum Trocknen sieben Tage in der Klimakammer auf dem Gitterträger platziert. Durch die extra Verweildauer in Wasserglas und der Konditionierungsdauer in der Klimakammer hatten die Testexemplare bei Durchführung des Druckversuches ein höheres Gesamtalter. Die Übersicht des Gesamtalters der Proben zum Zeitpunkt des Druckversuchs ist in Tabelle 6 dargestellt.

Alter bei Tränkung in Wasserglas [d]	Verweildauer in Wasserglas [h]	Konditionierungsdauer 20°C; 60,5% rF [d]	Gesamtalter [d]
7	24	7	15
14	24	7	22
28	24	7	36
56	24	7	64
7	48	7	16
14	48	7	23
28	48	7	37
56	48	7	65
7	72	7	17
14	72	7	24
28	72	7	38
56	72	7	66

Tabelle 6: Gesamtalter der NHL-Proben zum Zeitpunkt der Druckversuche nach der Tränkung in Wasserglas

Danach wurde erneut das Gewicht der Proben bestimmt und diese im Anschluss in der Druckprüfmaschine bis zum Versagen geprüft. Für den Versuchsvorgang wurde die Kraftschwelle für die Bruchuntersuchung von 0,1 auf 0,2% angehoben, da der Versuch sonst bereits vor Versagen der Probe abgebrochen worden wäre. Es wurde davon ausgegangen, dass dafür die äußerste Schicht an gehärtetem Wasserglas verantwortlich ist. Hier können erste Risse in der Wasserglas-Struktur entstehen, welche den Prüfvorgang beenden, jedoch ist noch kein Versagen eingetreten. Nach Erhöhen des Schwellenwerts konnten die Proben bis zum endgültigen Bruch belastet werden.

3.4.1 Absorption von Wasserglas

Um auch zu testen, wie viel Wasserglas die Würfel im Vergleich zu Wasser fähig sind aufzunehmen, wurde bei Proben des Alters 7 und 28 Tage das Gewicht nach drei und fünf Stunden

dokumentiert. Dazu wurden die Würfel aus dem Behälter genommen, die Oberflächen abgetupft und die Teststücke gewogen. Anschließend wurden die Proben wieder im Behälter platziert, dieses mit einem Parafilm verschlossen und bis nach Ablauf von 72 Stunden im versiegelten Behälter mit Wasserglas belassen.

Allerdings kann das Aufnahmevermögen zwischen Wasser und Wasserglas nicht anhand des Gewichtes verglichen werden, da Wasserglas eine andere Dichte als Wasser besitzt.

$$\rho_{\text{Wasserglas}} = 1,37 \text{ g/cm}^3$$

Formel 5: Dichte des verwendeten Wasserglases laut Hersteller

$$\rho_{\text{Wasser}} = 1,00 \text{ g/cm}^3$$

Formel 6: Dichte Wasser

Daher wurde die Massenzunahme in Folge der Tränkung wie folgt in absorbierte Volumenanteile im Vergleich zum Ursprungsvolumen umgerechnet:

$$\Delta V_{\text{Wasserglas}} = \frac{\Delta m}{\rho_{\text{Wasserglas}}} [\text{cm}^3]$$

Formel 7: Absorbiertes Volumen an Wasserglas

$$\Delta V_{\text{Wasserglas}} = \frac{\Delta V_{\text{Wasserglas}}}{V_0} \cdot 100 [\%]$$

Formel 8: Absorbiertes Volumen an Wasserglas im Vergleich zum Ursprungsvolumen des Mörtelwürfels

Δm ... Massenzunahme des Probenwürfels infolge der Tränkung in Wasserglas in Gramm

V_0 ... Ursprungsvolumen des Probewürfels in cm^3

3.4.2 Reversibilität der Wasserglas-Reaktion

Um die Beständigkeit der durch Wasserglas entstandenen Festigkeit bei erneutem Wasserkontakt zu analysieren, sollte der schlimmste Fall simuliert werden. Dieses Szenario ist eine allseitige Tränkung der Testwürfel in Wasser für 24 Stunden.

Zuerst wurden die Testexemplare 72 Stunden in Wasserglas getränkt wie in „3.4 In Wasserglas getränkte Proben“ erläutert wurde. Beim Herausnehmen der Proben aus dem Behälter mit Wasserglas wurden die Oberflächen der Würfel mit einem Tuch getrocknet und die Exemplare gewogen. Anschließend wurden die Proben drei Tage lang in der Klimakammer gelagert, da nach diesem Zeitraum das Wasserglas komplett getrocknet war. Die Würfel wurden stets auf dem Gitterträger platziert, um den allseitigen Kontakt mit der Atmosphäre zu gewährleisten. Nach drei Tagen wurden die Proben erneut gewogen und anschließend allseitig in einen Behälter mit Wasser getränkt. Das Behältnis wurde mit einem Parafilm verschlossen, um die Verdunstung des Wassers zu vermeiden. Die Proben wurden für 24 Stunden im Wasser belassen. Nach Ablauf der Zeit wurden die Würfel herausgenommen, die Oberflächen getrocknet und anschließend das Gewicht erneut bestimmt. Im Anschluss wurden die Proben nochmals in der Klimakammer konditioniert. Die Wahl der drei Aushärtungstage, ein Tag Tränkung in Wasser und der drei Konditionierungstage der Proben ergab sich aus den davor gewählten sieben Konditionierungstagen der in Wasserglas getränkten Testexemplare. Das Gesamtalter der Proben nach Tränkung in Wasserglas und anschließender Tränkung in Wasser ist in Tabelle 7 dargestellt.

Das Alter zum Testzeitpunkt sollte bei den in Wasserglas getränkten und den im Nachhinein in Wasser getränkten Proben gleich gehalten werden, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen.

Alter bei Tränkung in Wasserglas [d]	Verweildauer in Wasserglas [h]	Aushärtungszeit [d]	Zeit im Wasser [d]	Konditionierungsdauer 20°C; 60,5% rF [d]	Gesamalter [d]
7	72	3	1	3	17
14	72	3	1	3	24

Tabelle 7: Gesamalter der NHL-Proben nach 72 Stunden Tränkung in Wasserglas und 24 Stunden Tränkung in Wasser zum Zeitpunkt der Druckfestigkeitsmessung

Zum Abschluss wurden die Würfel wie in „3.4 In Wasserglas getränkte Proben“ in der Druckprüfmaschine getestet.

4 Resultate und Diskussion

4.1 Porosität/ Durchlässigkeit

4.1.1 Karbonatisierung

Wie in Abbildung 24 zu sehen ist, sind die Proben auch nach 56 Tagen nicht vollständig karbonatisiert.

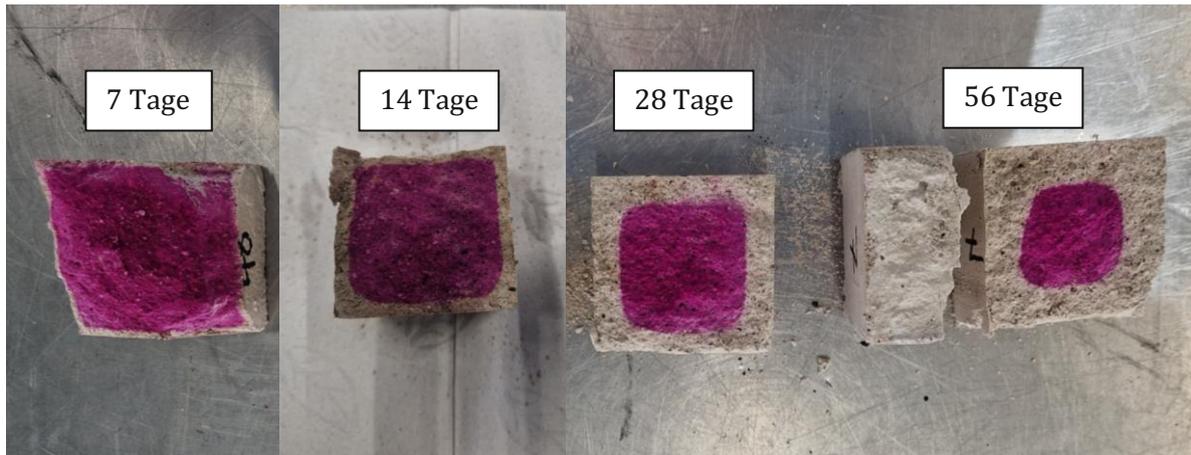


Abbildung 24: Karbonatisierungstest der NHL-Probewürfel mit Phenolphthalein mit Probenalter von 7, 14, 28 & 56 Tagen (graue Bereiche = karbonatisiert; pinke Bereiche = nicht karbonatisiert)

Nach 95 Tagen wurde eine zusätzliche Druckversuchsreihe angeordnet und im Zuge dessen wurde auch die Karbonatisierung getestet. Die Untersuchung ergab, dass die Proben zu diesem Zeitpunkt völlig karbonatisiert waren (siehe Abbildung 25). Die Aufbringung des Phenolphthaleins ist durch die vollständige Karbonatisierung nicht sichtbar.



Abbildung 25: völlig karbonatisierter NHL-Probewürfel mit einem Alter von 95 Tagen nach dem Druckversuch

4.1.2 Wasseraufnahmekoeffizient

Die Analyse laut ÖNORM EN 1925 lieferte das Ergebnis wie in Diagramm 1 dargestellt. Es kann von einem stark durchlässigen Material ausgegangen werden, da nach einer Stunde die Wasseraufnahme beinahe ihr Maximum erreicht hatte. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die Aufnahme mit Zunahme des Probenalters sinkt.

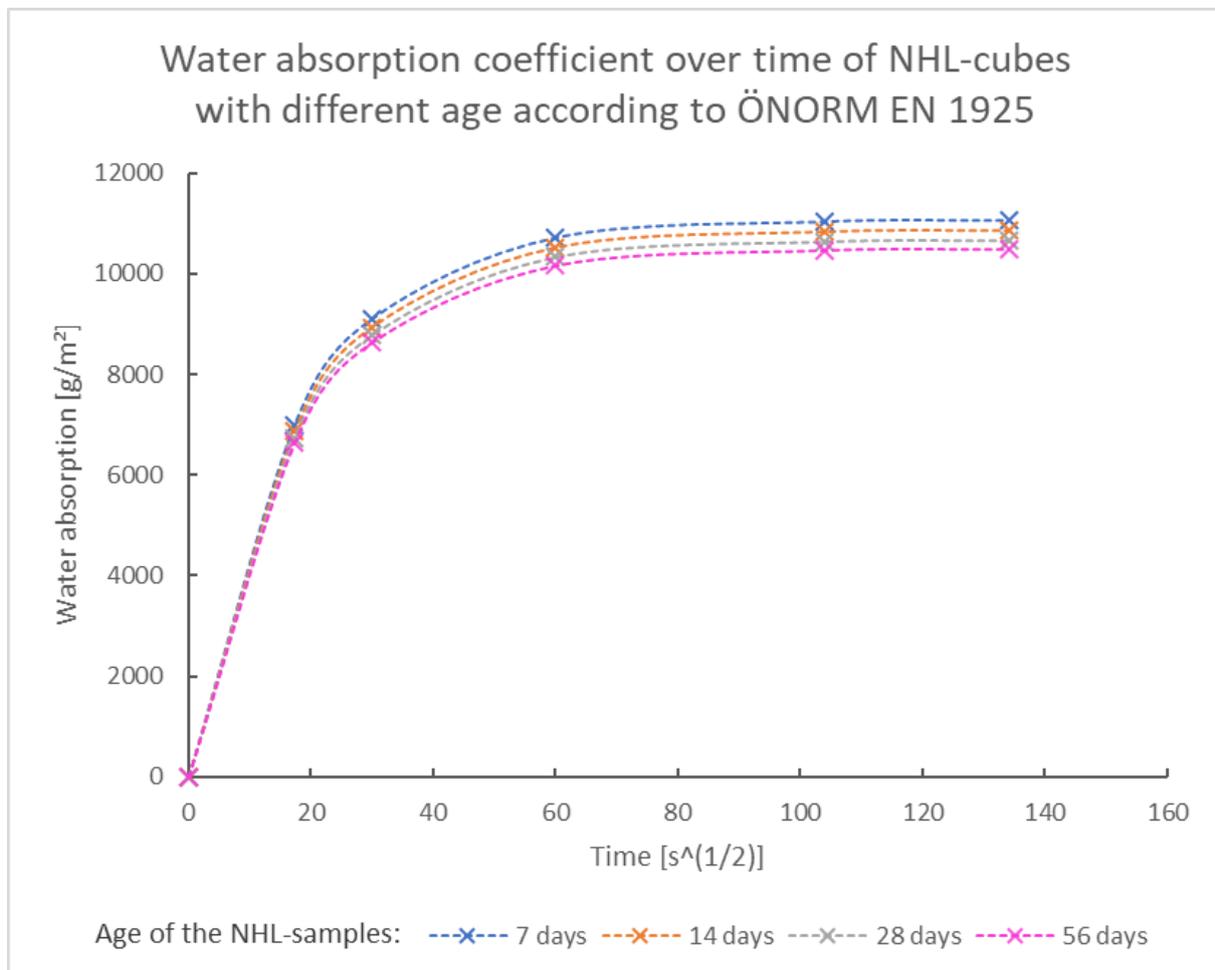


Diagramm 1: Wasseraufnahmekoeffizient NHL-Proben nach 7, 14, 28 & 56 Tagen in g/m² dargestellt nach ÖNORM EN 1925

4.1.3 Aufnahme von Wasserglas

Bei der Untersuchung der Aufnahme von Wasserglas wurde deutlich, dass erheblich weniger Wasserglas im Vergleich zu Wasser aufgenommen werden kann. Die Ergebnisse sind in Diagramm 2 und Diagramm 3 dargestellt.

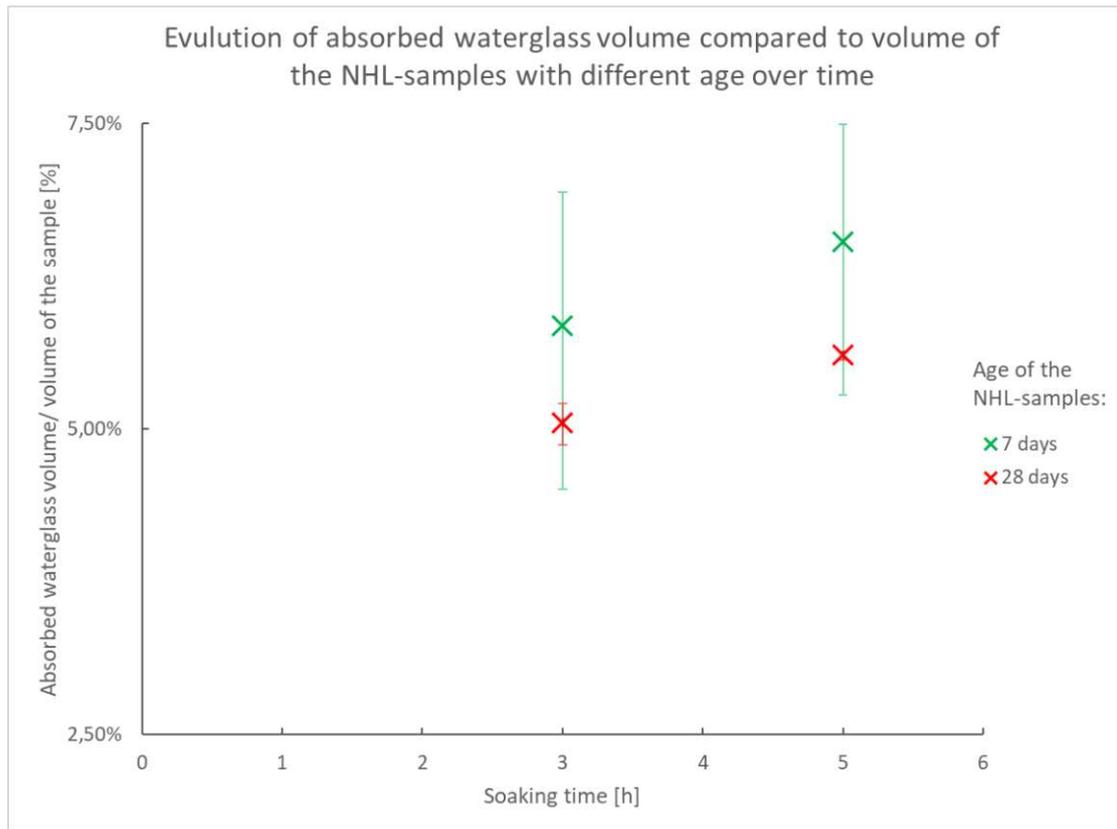


Diagramm 2: zeitabhängiges absorbiertes Volumen an Wasserglas während der allseitigen Tränkung in Wasserglas in Relation zum Würfelvolumen der NHL-Proben mit einem Alter von 7 & 28 Tagen in %

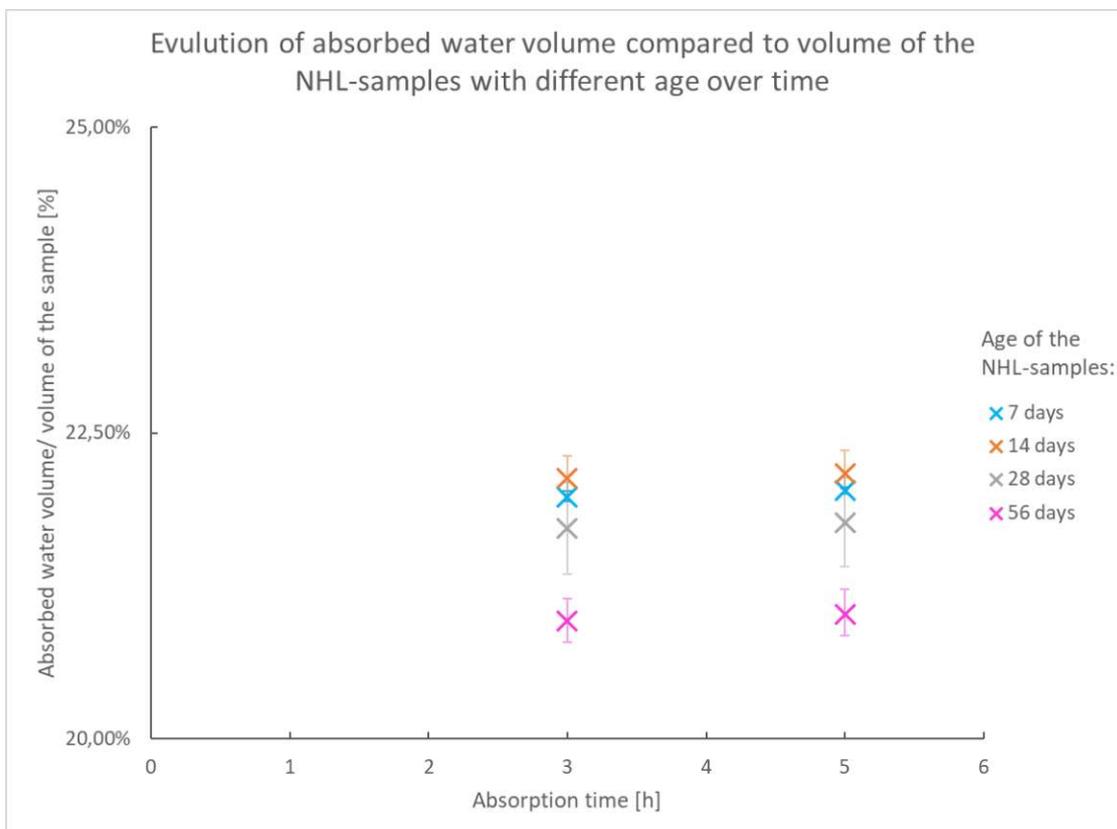


Diagramm 3: zeitabhängiges absorbiertes Volumen an Wasser während einer einseitigen Tränkung des Würfels zu 3 mm in Wasser in Relation zum Würfelvolumen der NHL-Proben mit einem Alter von 7, 14, 28 & 56 Tagen in %

4.1.4 Diskussion

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass die Karbonatisierung eines Mörtelwürfels mit einer Seitenlänge von 5 Zentimetern nach spätestens 95 Tagen abgeschlossen ist. Bei der Karbonatisierung handelt es sich nicht um einen gleichmäßigen Prozess. Durch die teils dicken Mauerwerksstärken und der dadurch schlechteren Erreichbarkeit durch Kohlendioxid (CO_2), kann es immer noch kleine Bereiche geben, welche nicht vollständig karbonatisiert sind.

Durch die Kapillaritätsversuche wurde sichtbar, dass die Porosität des Materials über die Zeit leicht abnimmt. Dies kann auch aus der Karbonatisierung schlussgefolgert werden, da diese die Porenräume im Verlauf der Zeit weiter schließt und die Absorption von Liquiden schwieriger macht. Die Umwandlung von Kalziumhydroxid zu Kalzit ergibt eine Änderung der Masse (siehe Diagramm 7 im Anhang), sowie des Volumens. Portlandit besitzt ein Volumen von $33 \text{ cm}^3/\text{mol}$ und ein spezifisches Gewicht von $2,24 \text{ g/cm}^3$. Im Gegensatz dazu beträgt das Volumen von Kalzit $36,9 \text{ cm}^3/\text{mol}$ und das spezifische Gewicht $2,71 \text{ g/cm}^3$. Diese Volumensänderung hat eine Auswirkung auf die Porosität der karbonatisierten Schicht.⁸¹ Es wurde ebenfalls beobachtet, dass die Dichte mit dem Probenalter zunimmt. Dieser Zusammenhang ist in Diagramm 8 im Anhang ersichtlich. Dies untermauert zusätzlich unsere Annahme, dass sich die Porenräume durch die Karbonatisierung und den damit verbundenen Verschluss der Poren durch Kalzit vermindern.

Die Versuche zeigten ebenso ein deutlich geringeres Penetrationsvermögen durch Wasserglas als durch Wasser und das, obwohl die Würfel vollständig in Wasserglas getränkt wurden. Im Gegensatz dazu wurden die Proben, welche mit Wasser getestet wurden, nur bis zu 3 mm in die Flüssigkeit getaucht. Die Absorption des Wassers erfolgte daher durch das kapillare Saugvermögen der Mörtelwürfel. Der Hauptgrund für das schlechtere Aufnahmevermögen von Wasserglas dürfte auf die deutlich höhere Viskosität von Wasserglas zurückzuführen sein. Das verwendete Wasserglas hat eine Viskosität von 50-260mPas. Die von Wasser liegt bei 1mPas bei 20°C . Die Aufnahme von Wasserglas ist in jedem Fall auch ohne Aufbringung von Druck möglich. Zu bedenken ist ebenfalls, dass es sich bei den hergestellten Proben um neues Material handelt. Es liegen keine Risse oder erweiterte Porenräume vor, wie sie in altem Mörtel im verbauten Zustand anzunehmen sind. Diese Umstände würden die Porosität des Materials noch weiter erhöhen. Ebenso wird bei Injektionsprozessen das Injektionsmaterial mit Druck direkt in die Mörtelfugen gepresst. Dadurch kann eine bessere Verteilung des Injektionsmaterials erreicht werden als durch Tränkung.

⁸¹ vgl. Lawrence, R. M. H. (2006). *A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars*.S.37

4.2 Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der Druckversuche sind in Diagramm 4 dargestellt. Es konnten nach 95 Tagen Festigkeitswerte von ca. 1,8 MPa erreicht werden. Wie im Abschnitt „Mauerwerksfestigkeit“ beschrieben, erreichen historische Kalkmörtel Festigkeiten zwischen 1-3 MPa.

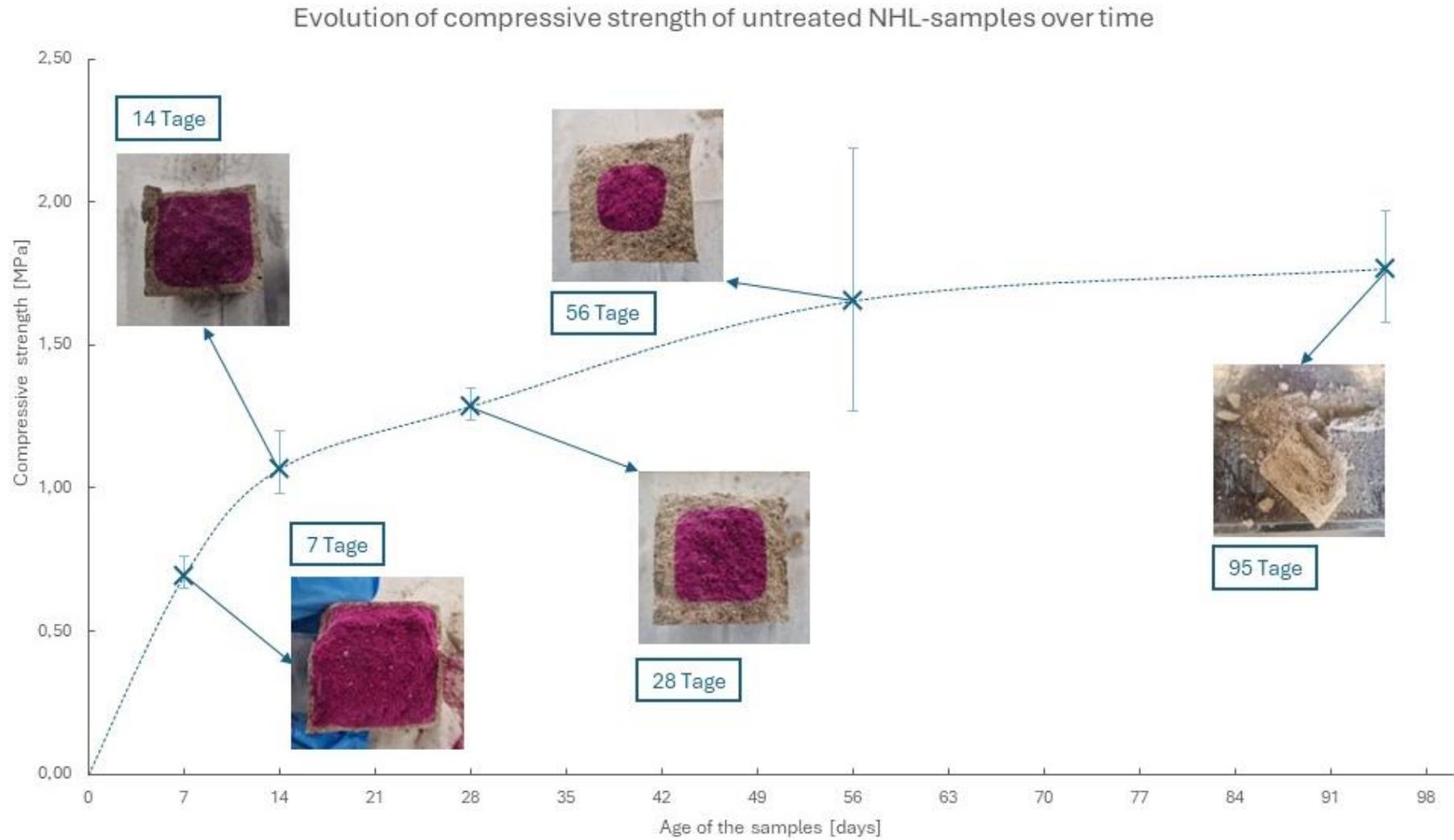


Diagramm 4: Entwicklung der Druckfestigkeit der unbehandelten NHL-Proben über die Zeit ausgewertet für 7, 14, 28, 56 & 95 Tage in MPa mit interpolierter Darstellung zwischen den Messpunkten und des jeweiligen Karbonatisierungsgrades mittels Phenolphthalein (pinke Bereiche = nicht karbonatisiert, graue Bereiche = karbonatisiert)

4.2.1 Wirkung von Wasserglas

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche sind in Diagramm 5 dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, dass die Tränkung in Wasserglas zu einer Verbesserung der Druckfestigkeit geführt hat. Dabei bringt eine längere Tränkungsdauer auch höhere Festigkeitswerte mit sich. Die Versuche unterliegen teilweise größeren Schwankungen.

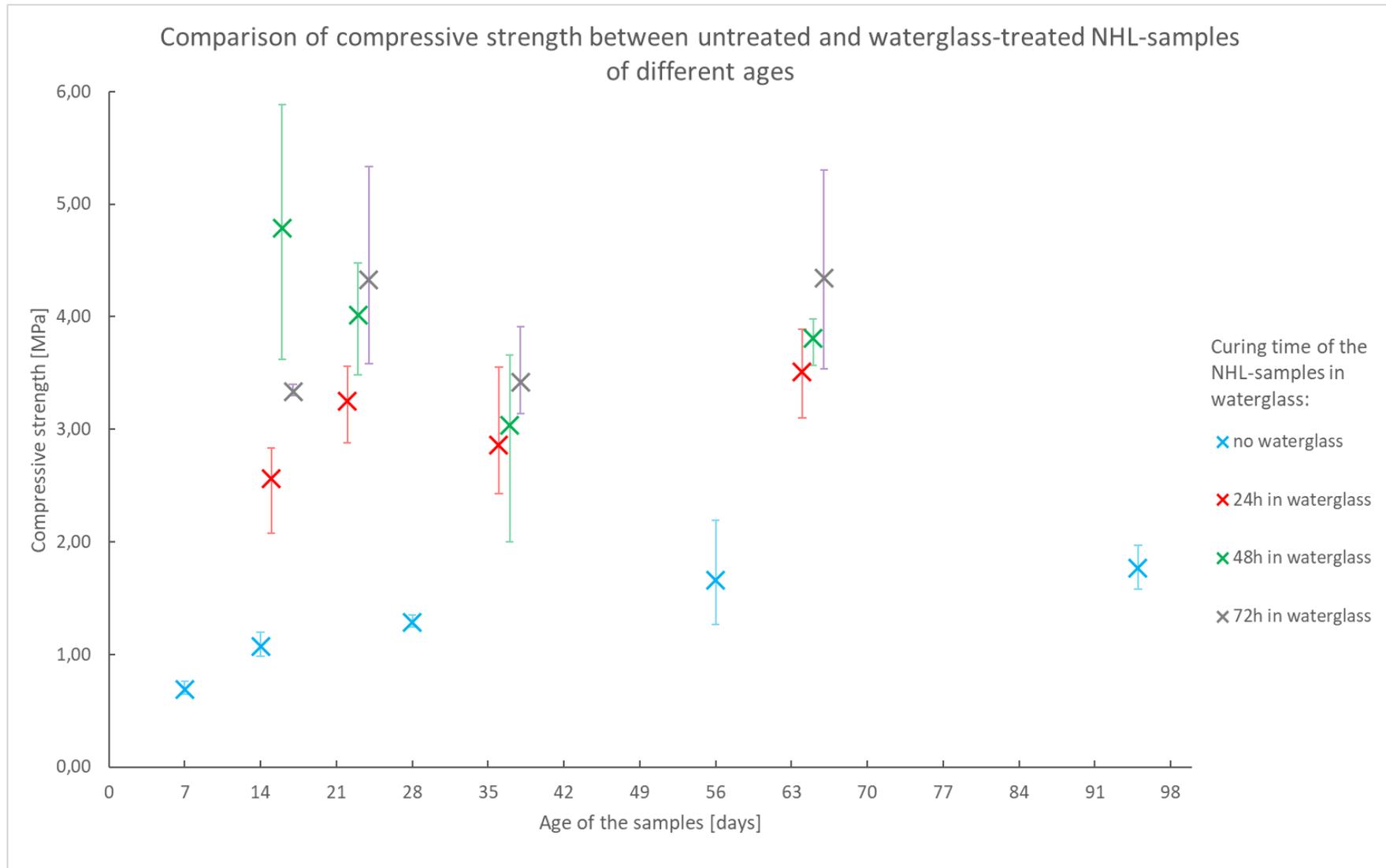


Diagramm 5: Vergleich der Verbesserung der Druckfestigkeit der NHL-Proben nach 24, 48 & 72 Stunden Tränkung in Wasserglas gegenüber den unbehandelten NHL-Proben mit verschiedenem Probenalter in MPa

4.2.2 Reversibilität von Wasserglas

In letzter Instanz wurde die Reversibilität der Wasserglas-Reaktion untersucht. Die Ergebnisse sind in Diagramm 6 dargestellt. Die Festigkeit wurde gar nicht beziehungsweise in einem geringen Ausmaß beeinflusst. Die Proben verlieren zwar nicht signifikant an Druckfestigkeit, jedoch liegen vor allem die Ergebnisse der 7-tägigen Proben weit über den erwarteten Werten. Hier ist es empfehlenswert, weitere Versuche durchzuführen.

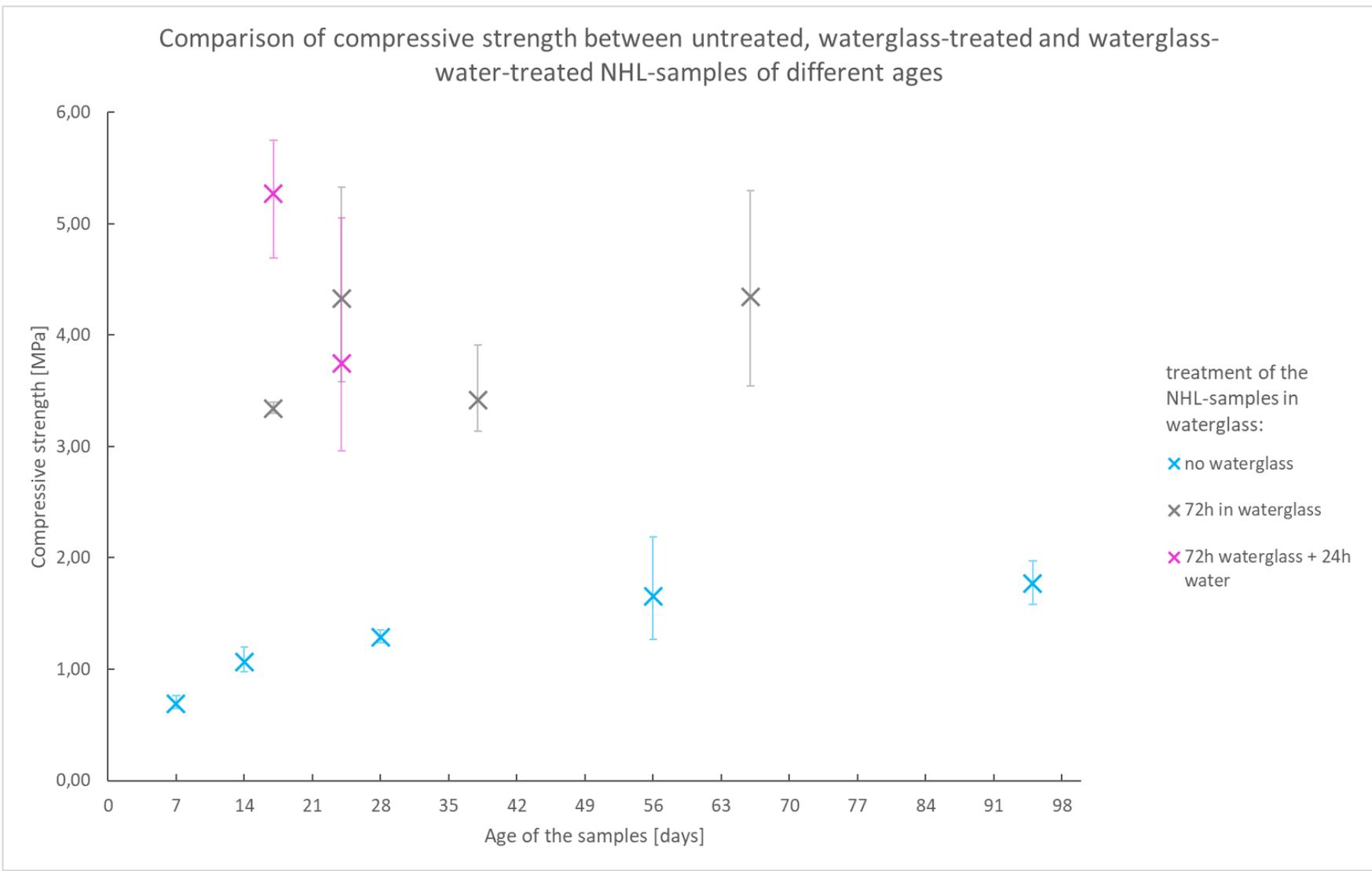


Diagramm 6: Vergleich der Druckfestigkeit der unbehandelten NHL-Proben, der NHL-Proben nach 72 Stunden Trankung in Wasserglas und den NHL-Proben nach 72 Stunden Trankung in Wasserglas und anschließender Trankung fur 24 Stunden in Wasser mit verschiedenem Probenalter in MPa

4.2.3 Diskussion

Die erzielten Druckfestigkeitswerte der unbehandelten NHL-Proben liegen im Bereich von historischem Mörtel. Die Entwicklung der Druckfestigkeit kann auch in Korrelation mit der Karbonatisierung gestellt werden, welche der festigkeitsbildende Prozess von Kalkmörtel ist. An Tag 95 waren die Proben bereits völlig karbonatisiert. Die interpolierte Festigkeitskurve nähert sich zwischen dem 56. und 95. Tag einem Plateau an.

Die Tränkung in Wasserglas führte bei allen Proben zu einer Steigerung der Druckfestigkeit. Es kann daher von einer Reaktion des Wasserglases mit dem im NHL-Mörtel enthaltenen Calcium und einer daraus resultierenden Bildung von C-S-H ausgegangen werden. Das tatsächliche Vorhandensein von C-S-H wurde im Zuge dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht. Die Druckfestigkeit der in Wasserglas getränkten Proben unterliegt allerdings einigen Schwankungen. Diese werden darauf zurückgeführt, dass es sich bei den getesteten Proben um ein inhomogenes Material handelt. In Abbildung 26 ist ein Probewürfel nach dem Druckfestigkeitsversuch abgebildet, welcher ein Alter von 7 Tagen und eine Verweildauer von 72 Stunden in Wasserglas hatte. Durch die Tränkung in Wasserglas und die dadurch stattfindende Penetration entstand eine farblich dunklere Außenschicht. Diese wurde in Abbildung 26 hervorgehoben. Es ist anzunehmen, dass es sich hier um den durch Wasserglas penetrierten Bereich handelt. Bei einer zusätzlichen Analyse konnte festgestellt werden, dass durch eine Verlängerung der Verweildauer in Wasserglas das Ausmaß dieser Außenschicht vergrößert werden konnte. Damit zeigt sich, dass die Aufnahme von Wasserglas nicht stoppt und die Porenräume nicht komplett verschlossen werden.

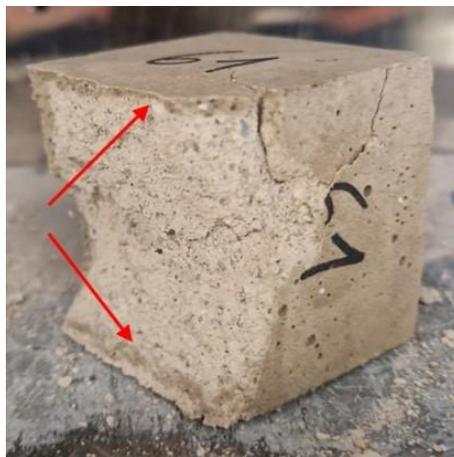


Abbildung 26: 17 Tage alter NHL-Probewürfel nach 72 Stunden Tränkung in Wasserglas nach dem Druckfestigkeitsversuch, die augenscheinliche dunkel verfärbte Penetrationstiefe des Wasserglases wurde hervorgehoben

Bei den Proben dieser Versuchsreihe wird von einem inhomogenen Material mit einer verstärkten Außenschale und einem schwächeren Kern ausgegangen. Jedoch wird noch eine mikroskopische Untersuchung empfohlen, um die genaue Penetrationstiefe zu evaluieren. In diesem Fall wurde nur die augenscheinliche Eindringtiefe beurteilt.

Des Weiteren wurde beobachtet, dass bei den rund um den 35. Tag getesteten Proben ein Festigkeitsabfall zu verzeichnen ist. Die Hypothese, welche in diesem Fall aufgestellt wurde, ist folgende: Die Aufnahme von Wasserglas war von Anfang an geringer als die von Wasser. Dies wurde bereits im in „4.1.3 Aufnahme von Wasserglas“ dargestellt. Die weiter fortschreitende Karbonatisierung ist für das Penetrationsvermögen zusätzlich nicht von Vorteil, da dieser Prozess

die Porosität senkt.⁸² Die Proben, welche um Tag 35 herum getestet wurden, wurden in einem Alter von 28 Tagen in Wasserglas getränkt. Zu diesem Zeitpunkt war die Karbonatisierung wie in Abbildung 27 dargestellt fortgeschritten. Die Verweildauer von maximal 72 Stunden in Wasserglas wird als nicht ausreichend angesehen, damit das Wasserglas in den nicht karbonatisierten Bereich der Probe vordringen kann. Der im karbonatisierten Bereich vorherrschende Kalzit stellt eine geringere Calciumquelle dar als das Portlandit in der nicht karbonatisierten Zone. Es wird daher davon ausgegangen, dass die geringe Penetrationstiefe zu niedrigeren Festigkeitswerten führt. Die Festigkeitssteigerung durch die Tränkung in Wasserglas beträgt durchschnittlich 1,70 MPa.



Abbildung 27: Karbonatisierungstest mit Phenolphthalein eines NHL-Probewürfels mit einem Probenalter von 28 Tagen (pinker Bereich = nicht karbonatisierter Bereich, grauer Bereich = karbonatisierter Bereich)

Zum späteren Zeitpunkt der Testung um den 65. Tag werden wieder höheren Werte gemessen. Die Festigkeit des Ausgangsmaterials am Tag der Tränkung in Wasserglas (Tag 56) betrug durchschnittlich 1,70 MPa, durch die Tränkung konnte eine durchschnittliche Verbesserung der Druckfestigkeit von 2 MPa erreicht werden. Die Steigerung der Festigkeit hat somit bei den jeweiligen Testreihen um Tag 37 und Tag 65 das gleiche Ausmaß.

Die hohen Festigkeitswerte am Anfang der Testreihe werden daher mit der geringen Karbonatisierungstiefe der jungen Würfel, wie in Abbildung 28 dargestellt, in Verbindung gebracht. Das Wasserglas ist in diesem Fall in der Lage in den nicht karbonatisierten Bereich vorzudringen, um mit dem dort vorhandenen Portlandit zu reagieren. Daraus kann die vorangehende Hypothese unterstrichen werden, dass Portlandit eine bessere Calciumquelle als Kalzit bildet und dadurch höhere Festigkeiten in Kombination mit Wasserglas erreicht werden können.



Abbildung 28: Karbonatisierungstest mit Phenolphthalein eines NHL-Probewürfels mit einem Probenalter von 7 Tagen (pinker Bereich = nicht karbonatisierter Bereich, grauer Bereich = karbonatisierter Bereich)

⁸² vgl. Lawrence, R. M. H. (2006). *A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars*.S.37

Abschließend kann festgehalten werden, dass es in allen Fällen zu einer Verbesserung der Druckfestigkeit kam. Es wurden jedoch einige Punkte angemerkt, welche einer genaueren Betrachtung in künftigen Untersuchungen unterliegen sollten, um die Wirkungsweise von Wasserglas besser abgrenzen und beurteilen zu können. Der erneute Kontakt mit Wasser senkte zwar teilweise die Festigkeitswerte, diese lagen jedoch immer noch über den Druckfestigkeiten der unbehandelten Proben.

5 Ausblick

Der Grundstein für weitere Versuche wurde gelegt. Es wurde eine Rezeptur zur Nachbildung von altem Mörtel gefunden, welcher auch im Festigkeitsbereich von eben diesem liegt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Reaktion mit Wasserglas zu einer Festigkeitsverbesserung führt und die Reversibilität von dieser Reaktion bei erneutem Kontakt mit Wasser keine signifikante Minderung der Festigkeit mit sich bringt.

Für die Zukunft gilt es, weitere Punkte noch zu begutachten: Bei dem von uns untersuchten Mörtelmaterial handelt es sich um neu hergestellte Proben mit keinerlei Beschädigungen oder Rissen. Alter Mörtel ist nicht schadenfrei und hat somit auch eine höhere Porosität und die Verteilung des Wasserglases ist deutlich besser möglich. Eine künstliche Alterung des Materials ist daher zu erwägen. Ebenso wurde das Wasserglas nur durch einfache Tränkung in die Probenwürfel eingebracht. Die Würfel konnten somit nur so viel aufnehmen, wie durch die eigene Saugfähigkeit möglich war. Bei Injektionsprozessen wird das Injektionsmaterial mit Druck in das Mauerwerk gepresst. Dadurch kommt es zu einer besseren Verteilung der Injektionsflüssigkeit. In Kombination mit bereits geschädigtem Mörtel sollte eine noch bessere Ausbreitung möglich sein. Im Zuge dieser Arbeit wurden Proben mit unterschiedlichem Karbonatisierungsgrad getestet. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass der verbaute Mörtel durchgehend karbonatisiert ist und daher weniger Calcium zur Reaktion mit Wasserglas vorliegt. Jedoch soll für die Zukunft ein zwei-komponentiges Injektionsmittel kreiert werden, bei welchem vorab eine Portlandit-Suspension injiziert wird. Diese soll als Booster für die Reaktion mit Wasserglas wirken.

All diese Punkte sollten in weiteren Forschungsarbeiten weiter betrachtet und erforscht werden. Jedoch zeigt diese Arbeit, dass die Druckfestigkeitswerte der NHL-Proben durch die Tränkung in Wasserglas verbessert werden konnten. Diese Festigkeitssteigerung scheint mit der Reaktion zwischen Wasserglas und dem im NHL-Mörtel enthaltenen Calcium in Verbindung zu stehen. Diese Erkenntnisse wurden unter Betrachtung der schlechtesten Ausgangssituation gewonnen. Eine höhere Porosität des Mörtelmaterials, die vorangehende Injektion einer Portlandit-Suspension zur Erhöhung der Quantität des Reaktionspartners für Wasserglas, sowie die Einbringung des Injektionsmaterials unter Druck zur besseren Verteilung, bringen vielversprechende Aussichten zur weiteren Verbesserung der Druckfestigkeit von altem Mauerwerksmörtel. Somit schafft diese Arbeit eine Grundlage zur weiteren Forschung an einem nachhaltigen und ökologischen Produkt zur Konsolidierung des Altbestands in Wien.

6 Anhang

6.1 Anhang 1: Massenentwicklung nach Herstellung der Proben

Im Zuge der Herstellung der Proben wurde die Entwicklung der Masse über die Zeit dokumentiert. In den ersten drei Tagen nach der Produktion der Proben wandelt sich der Mörtel von weich zu starr. In den ersten Tagen trocknen die Proben lediglich. Der eigentliche Prozess des „Erhärtens“ beginnt danach. Die Karbonatisierung verwandelt das vorhandene Kalkhydrat mit Hilfe von Kohlendioxid in Kalzit.⁸³ In Diagramm 7 kann nach dem Massenverlust am Anfang ein leichter Anstieg der Masse in den darauffolgenden Tagen verzeichnet werden. Diese Zunahme wird mit der Bildung von Kalzit und damit mit der einsetzenden Karbonatisierung in Verbindung gebracht. Kalkhydrat oder auch Portlandit genannt besitzt ein spezifisches Gewicht von $2,24\text{g/cm}^3$, das von Kalzit beträgt $2,71\text{g/cm}^3$.⁸⁴

⁸³ vgl. Burchartz, H. (1908). Luftkalk und Luftkalkmörtel. J. Springer. S.81

⁸⁴ vgl. Lawrence, R. M. H. (2006). *A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars*.S.37

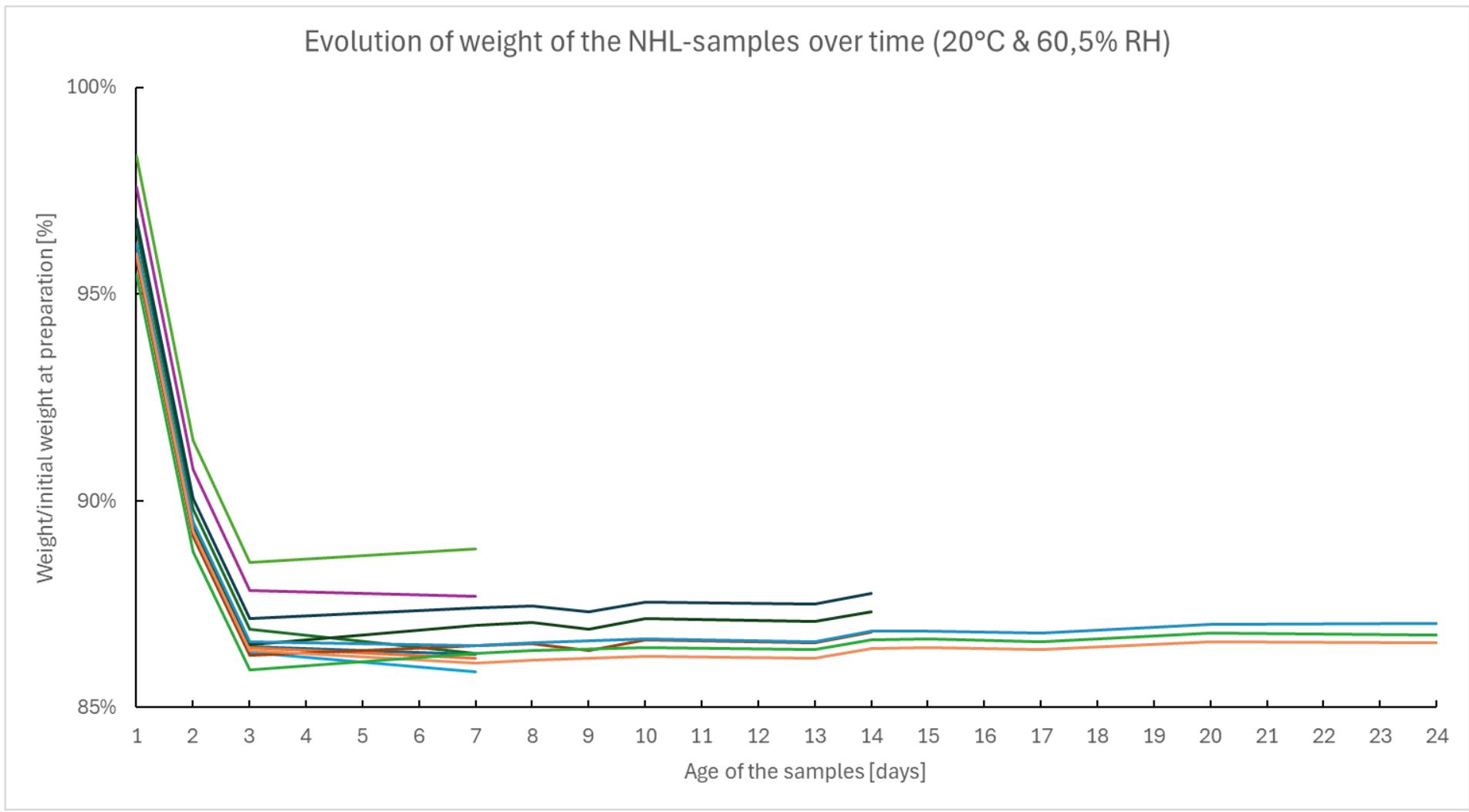


Diagramm 7: Entwicklung der Masse der NHL-Proben im Verhältnis zum Initialgewicht zum Herstellungszeitpunkt an Tag 0 bei 20°C und 60,5% rF in %

6.2 Anhang 2: Relation zwischen Dichte der Proben und Druckfestigkeit

Diagramm 8 zeigt, dass mit zunehmender Dichte der Probewürfel auch die Druckfestigkeit steigt. Die Unterschiede in der Dichte können einerseits im Zusammenhang mit der händischen Verdichtung während des Herstellungsprozesses stehen, aber es wird auch deutlich, dass das Probenalter einen Einfluss hat. Mit dem höheren Alter der Würfel geht auch eine fortschreitende Karbonatisierung einher. Die Entstehung von Kalzit nimmt Porenvolumen in Anspruch, wodurch die Porosität sinkt, aber auch die Masse wird durch die Umwandlung erhöht wie in Punkt 6.1 beschrieben wurde.

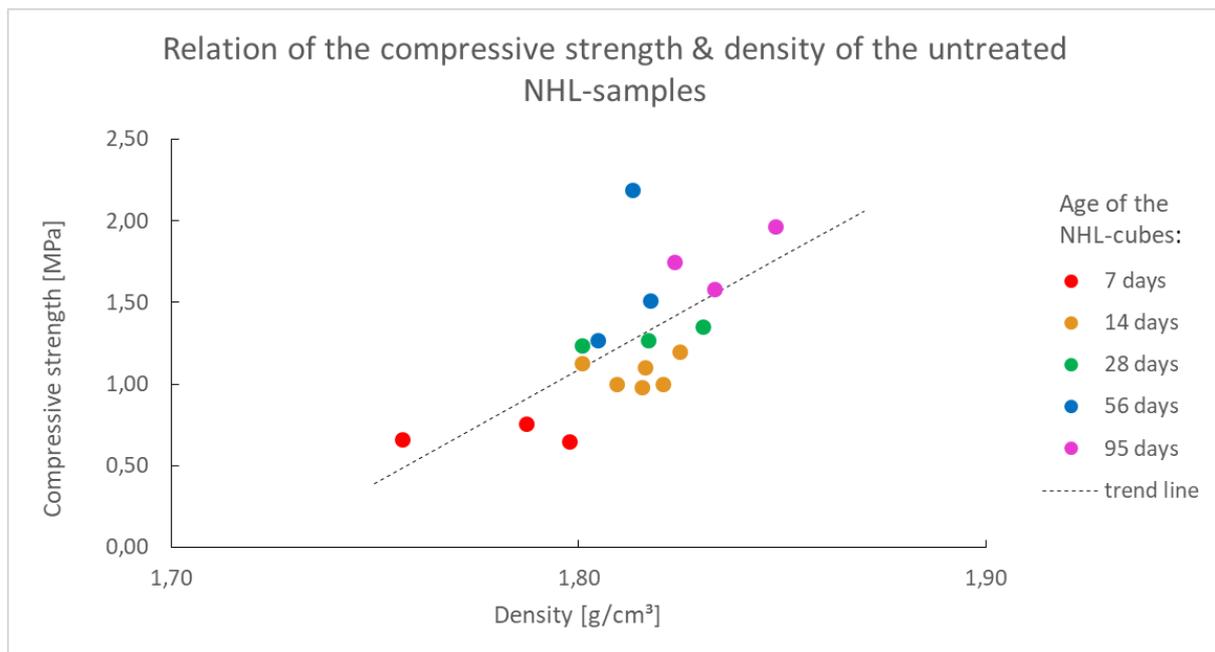


Diagramm 8: Relation zwischen Dichte und Druckfestigkeit der NHL-Probewürfel mit verschiedenem Probenalter

7 Literaturverzeichnis

- Austrian Standards International. (2007). *ÖNORM EN 1015-3:2007-03-01 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel*. Wien: Austrian Standards International.
- Austrian Standards International. (2018). *ÖNORM B 1998-3:2018-10-15 Eurocode 8 – Auslegung von Bauwerken gegen Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden*. Wien: Austrian Standards International.
- Bobek, H., & Lichtenberger, E. (1978). *Wien- Bauliche Gestalt und Entwicklung seit der Mitte des 19. Jahrhunderts*. Wien: Böhlau Verlag.
- Brandstetter, M., & Lux, V. (2024). *Wiener Bauordnungsnovelle – So wohnt Wien zukünftig*. Abgerufen am 4. April 2024 von dorda: <https://www.dorda.at/de/news/wienerbauordnungsnovelle-so-wohnt-wien-zukuenftig>
- Bucher, B. (2022). *Der Wert des gebauten Erbes der Wiener Innenstadt*. Wien: Dissertation TU Wien.
- Bundesdenkmalamt. (2015). *Standards der Baudenkmalpflege; 2., korr. Auflage*.
- Burchartz, H. (1908). *Luftkalke und Luftkalkmörtel*. J. Springer.
- Chard, J., Basson, L., Creech, G., Jesson, D., & Smith, P. (2019). *Shades of Green: Life Cycle Assessment of a Urethane Methacrylate/Unsaturated Polyester Resin System for Composite Materials*. Sustainability(11(4):1001). Von <https://doi.org/10.3390/su11041001> abgerufen
- Deix, K., & Korjenic, S. (2012). *Bestimmung der Tragfähigkeit von altem Ziegelmauerwerk und Untersuchung von neuen Injektionsmaterialien gegen aufsteigende Feuchtigkeit*. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift(157. Jg., Heft 7–12).
- Deix, K., Rusnov, B., Dzudzevic, E., & Huber, C. (H10 2023). *Analyse von Mauerwerksuntersuchungen von Gründerzeithäusern in Wien*. Bautechnik 100.
- dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h. *Kapitel 01 - Historische Einleitung zur Gründerzeit und ihrer Bauweisen*. Abgerufen am 21. April 2024 von hollinsky+partner: <https://www.hollinsky.at/>
- dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h. *Kapitel 02 - Bestandteile & Ingenieurbefund*. Abgerufen am 21. April 2024 von hollinsky+partner: <https://www.hollinsky.at/>
- dr. karlheinz hollinsky & partner ziviltechnikergesellschaft m.b.h.; TU Wien Denkmalpflege Institut 251.123. (2017). *Kapitel 02 Wände im Bestand – Wandertüchtigung - Bauhilfsmaßnahmen*. Abgerufen am 21. April 2024 von 251.2 Denkmalpflege & Bauen im Bestand: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://denkmalpflege.tuwien.ac.at/wp-content/uploads/2017/05/17_Denkmal_02_W%25C3%25A4nde-im-

BestandWandert%25C3%25BCchtigung.pdf&ved=2ahUKEwiBzoLw69OFAxWg8QIHVV
wIBtIQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw

- Lawrence, R. M. (2006). *A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars*.
- Österreichische Bautechnik Vereinigung. (Dezember 2015). *Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk*. ÖBV Richtlinie.
- Pech, A., Gangoly, H., Holzer, P., & Maydl, P. (2018). *Ziegel im Hochbau: Theorie und Praxis* (2. Ausg.). (A. Pech, Hrsg.) Basel: Birkhäuser.
- Reimer, F., Kral, U., Sönmez, E., Hauer, F., Hohensinner, S., Wolfinger, H., . . . Rechberger, H. (2022). *Data description of "Building age map, Vienna, around 1920"*. Data in Brief. Von <http://hdl.handle.net/20.500.12708/136657> abgerufen
- Robisson, A., Costa, B., Liberto, T., Dhar, S., Daneshvar, D., Kirnbauer, J., & Deix, K. (2023). *Systematische Charakterisierung der Eigenschaften von Frischbetonen und Mörteln - Jahr 5*. Von <http://hdl.handle.net/20.500.12708/191461> abgerufen
- Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B., & Press, C. R. C. (Eds.). (2016). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials (Vol. 540)*. Boca Raton, FL, USA: Crc Press.
- Stadtentwicklung Wien. (2013). *Dekorative Fassadenelemente in der Gründerzeit zwischen 1840 und 1918*. Werkstättenberichte(Nr. 133).
- Steger, S., Wilts, H., Bergs, L., & Bergmann, L. (2022). *Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden oder Neubau – Ökologische Bewertung hinsichtlich Materialbedarf, Primärenergieverbrauch und damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen*. Wuppertal Institut.
- Tockner, L. (April 2015). *Nettoangebotsmieten in Wiener Altbauten*. Abgerufen am 9. November 2023 von Arbeiterkammer Wien: https://wien.arbeiterkammer.at/service/studien/wohnen/Nettoangebotsmieten_in_Wiener_Altbauten.pdf
- Tonioli, C. (2022). *Die Gründerzeit und ihre architektonischen Merkmale*. Abgerufen am 4. April 2024 von denk mal neo: <https://www.denkmalneo.at/blog/die-gruenderzeit-und-ihre-architektonischen-merkmale-1>
- Vukovich, C. (2019). *Gebäude der Gründerzeit in Wien - Herausforderungen und Auswirkungen der Bauordnungsnovelle 37/2018 unter besonderer Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Abbruchreife*. Wien: Masterthesis TU Wien.
- Waldrop, M. (16. November 2022). *The road to low-carbon concrete*. doi:10.1146/knowable-111622-1
- Witzleben, S. (2022). *Minimizing the Global Warming Potential with Geopolymer-Based Insulation Material with Miscanthus Fiber*. *Polymers*(14(15):3191). Von <https://doi.org/10.3390/polym14153191> abgerufen

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: reichlich verzierte Fassade eines Palais der Gründerzeit	8
Abbildung 2: Grundriss eines Palais in der Gründerzeit	8
Abbildung 3: Fassade einer Zinskaserne der Gründerzeit.....	9
Abbildung 4: Grundriss des Parterres einer Zinskaserne der Gründerzeit	9
Abbildung 5: Schnitt durch ein Gründerzeithaus.....	10
Abbildung 6: Entnahme eines Bohrkerns in der Windmühlgasse 9, 1060 Wien zur weiteren Untersuchung.....	13
Abbildung 7: Prüfpfeiler aus Vollziegelmauerwerk.....	13
Abbildung 8: Berechnung der charakteristischen Mauerwerksfestigkeit nach ÖNORM B 1996-1-1.....	14
Abbildung 9: beispielhafter Bohrraster bei einer Mauerwerksinjektion mit Epoxidharz	19
Abbildung 10: Querschnitt durch ein Mauerwerk mit sichtbaren verbleibenden Packern	19
Abbildung 11: vereinfachte Reaktionsgleichung zur Bildung von C-S-H durch Natriumsilikat und Calcium-Ionen	21
Abbildung 12: Bohrkern aus dem Gebäude Kärntner Ring 8 bestehend aus einer betonartigen Matrix.....	22
Abbildung 13: entnommener Bohrkern aus dem Gebäude Neutorgasse 56, 8010 Graz	22
Abbildung 14: händische Trennung des alten Mörtels von den Ziegeln des Bohrkerns mittels Hammer und Meisel	23
Abbildung 15: abgeklopfter alter Mörtel des Bohrkerns	23
Abbildung 16: zerkleinertes & anschließend gesiebtes altes Mörtelmaterial	24
Abbildung 17: Ausbreitversuch der NHL-Mörtelmischung mit einem W/B-Wert von 0,70	27
Abbildung 18: Ausbreitversuch der NHL-Mörtelmischung mit einem W/B-Wert von 0,90	27
Abbildung 19: Produktion der NHL-Würfelproben mit den Abmessungen 5 x 5 x 5 cm	28
Abbildung 20: Lagerung der NHL-Probewürfel auf einem Gitterträger zur Gewährleistung einer allseitig gleichmäßigen Karbonatisierung in der Klimakammer bei 20°C und 60,5% rF	29
Abbildung 21: Karbonatisierungsprozess von Zement und die Veranschaulichung durch Phenolphthalein.....	30
Abbildung 22: Versuchseinrichtung der „Zwick Roell testControl II“ für Druckversuche der NHL-Probewürfel.....	32
Abbildung 23: mit Parafilm verschlossene Behälter mit den allseitig in Wasserglas getränkten NHL-Proben.....	32

Abbildung 24: Karbonatisierungstest der NHL-Probewürfel mit Phenolphthalein mit Probenalter von 7, 14, 28 & 56 Tagen (graue Bereiche = karbonatisiert; pinke Bereiche = nicht karbonatisiert)	36
Abbildung 25: völlig karbonatisierter NHL-Probewürfel mit einem Alter von 95 Tagen nach dem Druckversuch	36
Abbildung 26: 17 Tage alter NHL-Probewürfel nach 72 Stunden Tränkung in Wasserglas nach dem Druckfestigkeitsversuch, die augenscheinliche dunkel verfärbte Penetrationstiefe des Wasserglases wurde hervorgehoben	46
Abbildung 27: Karbonatisierungstest mit Phenolphthalein eines NHL-Probewürfels mit einem Probenalter von 28 Tagen (pinker Bereich = nicht karbonatisierter Bereich, grauer Bereich = karbonatisierter Bereich)	47
Abbildung 28: Karbonatisierungstest mit Phenolphthalein eines NHL-Probewürfels mit einem Probenalter von 7 Tagen (pinker Bereich = nicht karbonatisierter Bereich, grauer Bereich = karbonatisierter Bereich)	47

9 Formelverzeichnis

Formel 1: höchste flächenbezogene Masse Wasser [g/m ²] laut ÖNORM EN 1925..	31
Formel 2: längenbezogener Wassereindringkoeffizient [1/s ^{0,5}] laut ÖNORM EN 1925	31
Formel 3: flächenbezogene, bis zum Zeitpunkt t _i , aufgenommene Masse Wasser [g/m ²] laut ÖNORM EN 1925	31
Formel 4: Formel für Wasseraufnahmekoeffizient laut ÖNORM EN 1925.....	31
Formel 5: Dichte des verwendeten Wasserglases laut Hersteller.....	34
Formel 6: Dichte Wasser	34
Formel 7: Absorbiertes Volumen an Wasserglas.....	34
Formel 8: Absorbiertes Volumen an Wasserglas im Vergleich zum Ursprungsvolumen des Mörtelwürfels	34

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mauerwerksfestigkeiten je nach Menge an injiziertem Epoxidharz in kg/m ³ eines Referenzprojekts	18
Tabelle 2: Ergebnis der Mörtelanalyse mittels XRPD der Mörtelprobe aus Graz	25
Tabelle 3: Ergebnis der Analyse mittels XRPD von NHL 3,5 der Marke Baunit.....	26
Tabelle 4: Ausbreitmaß der NHL-Mörtelmischung mit einem Kalk-Sand-Verhältnis von 1:4 abhängig vom W/B-Wert.....	26
Tabelle 5: ermittelte Rezeptur des NHL-Mörtels für die Reproduktion des alten Mörtels	28
Tabelle 6: Gesamalter der NHL-Proben zum Zeitpunkt der Druckversuche nach der Tränkung in Wasserglas	33
Tabelle 7: Gesamalter der NHL-Proben nach 72 Stunden Tränkung in Wasserglas und 24 Stunden Tränkung in Wasser zum Zeitpunkt der Druckfestigkeitsmessung .	35

11 Abkürzungsverzeichnis

vgl.	vergleiche
Ca	Calcium
NHL	Natürliche Hydratkalk
C-S-H	Calciumsilikathydrat
ca.	zirka
NF-Ziegel	Normalformatziegel
PU-Harz	Polyurethanharz
SiO ₂	Siliziumdioxid/ Quarz
Na ₂ O	Natriumoxid
HCl	Chlorwasserstoff
XRPD	Röntgen-Pulverdiffraktometrie
QPA	Quantitative Phasenanalyse
W/B-Wert	Wasserbindemittelwert
CaCO ₃	Kalzit
KAl ₂ (SiAl)O ₁₀	Muskovit
Ca(OH) ₂	Portlandit
C2S	Belite
C3S	Alite
CO ₂	Kohlendioxid
rF	Relative Luftfeuchte