

Historische Bedeutung der Hydraulfaktoren bei Kalkputzen in der Denkmalpflege

Dr. Karl Georg Böttger
Institut für Bau- und Werkstoffchemie
Universität Siegen

Einleitung

Baukalk ist eines der bedeutendsten historischen Baustoffbindemittel. Der älteste Nachweis von gebranntem Kalkstein stammt nach Stark [1] von einer jungsteinzeitlichen Kultur des Donauraumes aus einer Zeit von 7000 bis 5500 v. Chr. In vielen großen Kulturen wurden Kalkmörtel bzw. Mörtel mit Kalkzusatz verwendet, z. B. beim Bau der Pyramiden von Gizeh (ca. 2500 v. Chr.), der historischen Stadt Akrotiri auf Santorin (ca. 1625 v. Chr.) – hier wurde auch schon Santorinerde als puzzolanischen Zusatz zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Baustoffs Baukalk eingesetzt, den Bauwerken der Römer - als ein Beispiel das Pantheon in Rom (erbaut 118-128). Auch in Asien wurde Kalk als Baustoff verwendet, so wurde z. B. in China in der Nähe von Dadiwan vor mindestens 5000 Jahren Kalk zum Bau von Fundamenten und Bodenplatten eingesetzt [2].

Die Römer setzten nach Vitruv [3] bevorzugt reinen Kalk, nach heutiger Bezeichnung CL 90 ein. Eigene Untersuchungen an Mörteln von römischen Bauten am Magdalensberg in Kärnten konnten den bevorzugten Einsatz von möglichst reinem Kalk bestätigen. In schwach gebrannten Partikeln bestand deren ungebrannter Kern aus Marmor [4]. Je nach Anwendungszweck wendeten die Römer den gebrannten Kalk für Mörtel und Putze bei geringer Beanspruchung an oder mischten bei höheren Anforderungen, wie beim Bau von Hafenanlagen, Zisternen oder Wasserleitungen den Baukalcken puzzolanische Zusätze zu. Damit konnten Festigkeiten realisiert werden, die ähnlich denen heutiger zementgebundener Baustoffe waren – die Druckfestigkeiten betragen je nach Anwendung: Wasserbecken 5-18 MPa; Mauern und Wände 6-25 MPa; Estriche 18-22 MPa; Wasserleitungen 7-40 je nach Anforderung und Fundamente 26-46 MPa [5].

Als hydraulische Zusätze wurden eingesetzt: Puzzolanerde aus Puzzuoli oder Santorinerde aus Santorin, Rheinischer Trass, Ziegelmehl aber auch Schlacken aus der Eisenverhüttung wie beispielsweise an den römischen Bauten am Magdalensberg (Kärnten) [4]. Neben diesen hydraulischen Zusätzen wurden bei historischen Bauwerken auch Rohstoffe eingesetzt, die heute für die Herstellung Natürlicher Hydraulische Kalke verwendet werden. Allerdings konnte deren Nutzung im heutigen Sinne erst nach Entwicklung von Brennöfen die höhere Temperaturen

zuließen erfolgen. Wegen der nicht ausreichenden (niedrigen) Brenntemperaturen konnten die heute als Natürliche Hydraulische Kalke bekannten Baustoffbindemittel in der Antike nur eingeschränkt hergestellt werden und erstarrten und erhärteten unter Wasser nicht. Erst der Zusatz von Puzzolanen ermöglichte dies.

Am IFS in Mainz wurden 300 historische Mörtel aus Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen auf ihren MgO- und SiO₂-Gehalt hin untersucht, siehe Bild 1 [6]. Dabei wird deutlich, wenn man als Grenzwert zwischen Luftkalken und Hydraulischen Kalken einen Grenzwert von 5 M.-% für den SiO₂-Gehalt annimmt, dass ein überwiegender Teil der untersuchten Mörtel eine Zusammensetzung aufwies, die heute Hydraulischen Kalken bzw. CL 80 dem früheren Wasserkalk zugesprochen werden. Dies zeigt sehr deutlich, dass die Anwendung Hydraulischer Kalke oder der früheren Wasserkalke in Deutschland sehr verbreitet war.

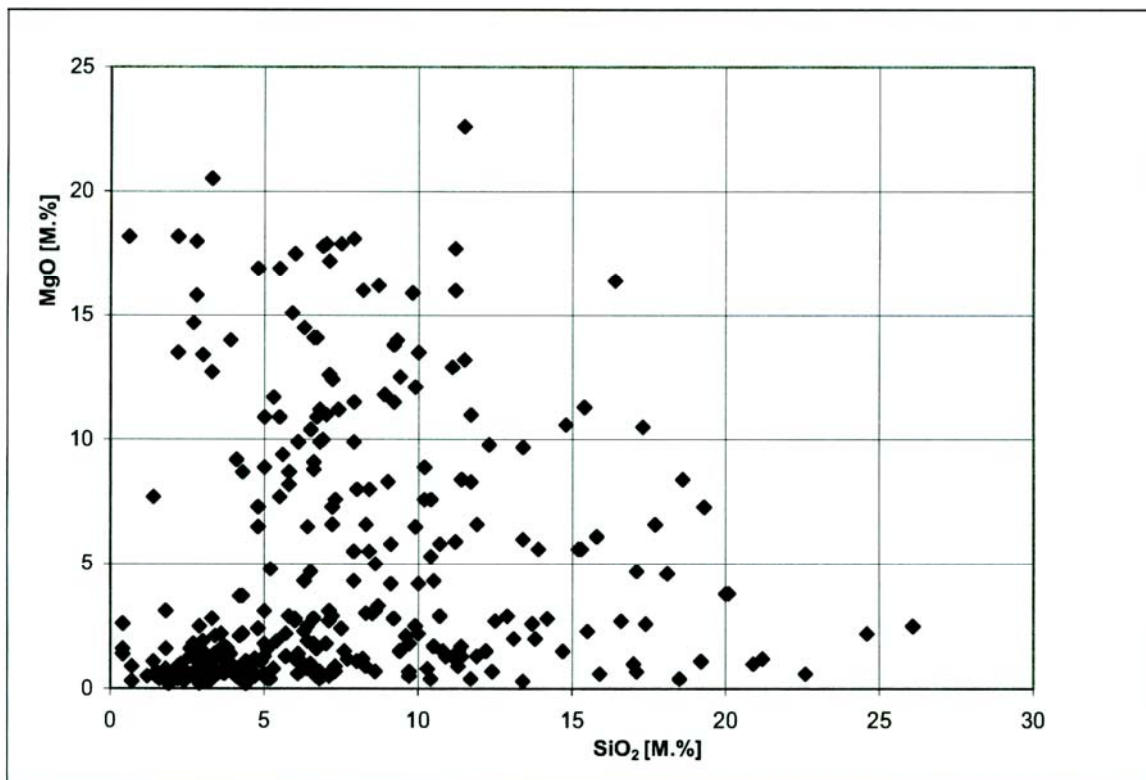


Abb. 6: Säurelösliche SiO₂-Gehalte und MgO-Gehalte in ca. 300 vom IFS in den letzten 6 Jahren untersuchten historischen Mörteln aus Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen. Die Angaben beziehen sich auf den Gesamtbindemittelgehalt.

Bild 1: Säurelösliche SiO₂- und MgO-Gehalte bezogen auf das Bindemittel in ca. 300 vom IFS untersuchten Mörteln aus Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen [7].

Carbonatisch und hydraulisch erhärtende Baukalke

Baukalke sind genormte Baustoffbindemittel (DIN EN 459), die durch Brennen bei 900-1200°C und anschließendes Löschen (S) hergestellt werden. Ungelöschte Produkte sind Branntkalk (Q), die üblicherweise im Handel nicht erhältlich sind.

Die chemische Zusammensetzung der Baukalke ist maßgebend für die Klassifizierung der Weißkalke (Luftkalke) in der DIN EN 459-1 – Weißkalk CL 90, CL 80, CL 70. Darüber hinaus ist die gewählte Brenntemperatur für die Bildung von Calciumverbindungen mit den Hydraulefaktoren und damit für ihre mechanischen Eigenschaften verantwortlich, die in der Norm zur Klassifizierung der hydraulischen Kalke führen – Hydraulische Kalke HL 2, HL 3,5 und HL 5. Hydraulische Kalke können einerseits durch Mischen von z. B. CL 90 und „geeigneten Stoffen“ (Portlandzement, Filterstäube usw.) erzeugt werden. Sie werden als Hydraulische Kalke HL bezeichnet. Andererseits können Hydraulische Kalke nur durch Brennen entsprechender Rohstoffe hergestellt werden. Sie werden als Natürliche Hydraulische Kalke NHL bezeichnet und bei höheren Temperaturen als CL 80 oder CL 70 gebrannt aber bei niedrigeren Temperaturen als die Zemente. Einen Überblick des Einflusses der chemischen Zusammensetzung der Baukalke auf deren Klassifizierung gibt Bild 2. Zudem wird die Abhängigkeit von den Rohstoffen deutlich.

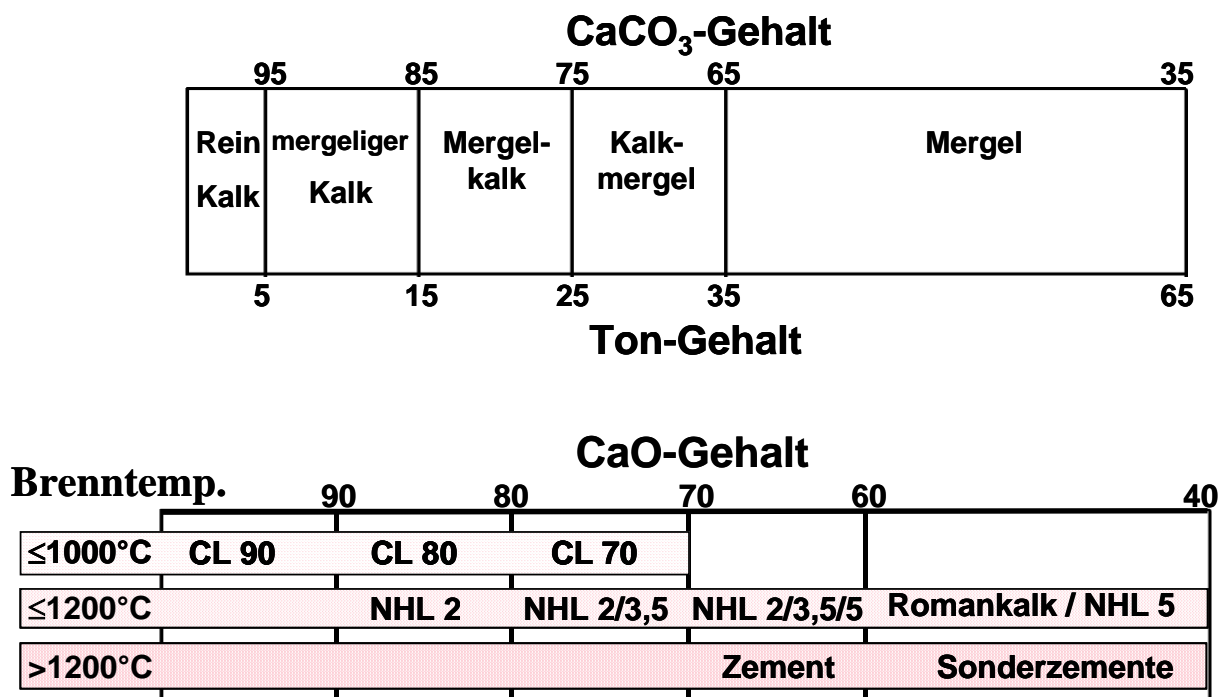


Bild 2: Einteilung der Kalke und Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Klassifizierung der Baukalke aufgrund eigener Untersuchungen

Die zunehmende Festigkeit vom CL 90 über den CL 70 bis hin zum NHL 5 wird durch die Hydraulefaktoren SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 bedingt. Sie gehen Verbindungen mit dem CaO ein und bilden Phasen, die mit Wasser versetzt hydraulisch erhärten, d. h. unter Wasserbindung. Sie entstehen bei den heutigen Natürlichen Hydraulischen Kalken bei Temperaturen bis zu 1200 °C. Diese Phasen sind:

- bei den Natürlichen Hydraulischen Kalken

$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ und $2\text{CaO}[\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3]$ neben $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Neben diesen Phasen enthalten die Natürlichen Hydraulischen Kalke Branntkalk (CaO) bzw. nach dem Löschen Portlandit (gelöschter Kalk, $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

- bei den Zementen

$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ und $2\text{CaO}[\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3]$

Die beschriebenen Calciumverbindungen der Natürlichen Hydraulischen Kalke sind identisch mit den im Zement vorkommenden Zementklinkerphasen. Im Zement bildet sich wegen der höheren Brenntemperatur (1450°) eine weitere Phase – Tricalciumsilicat (Alit), die mengenmäßig meist dominiert. Wenn die Brenntemperatur bei der Herstellung Hydraulischer Kalke zu niedrig ist werden die Anforderungen an die Festigkeit für Hydraulische Kalke nicht erfüllt. Statt z. B. einem HL 2 kann dieser Baukalk dann nur als CL 70 bezeichnet werden. Bei zu niedrigen Brenntemperaturen reagieren nicht alle Hydraulefaktoren mit dem CaO und bilden keine schnell mit Wasser reagierenden Phasen, sie liegen einerseits als SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 im Baukalk vor und sind kaum reaktiv oder andererseits als Gehlenit, das keine hydraulischen Eigenschaften besitzt.

Neben dieser Ähnlichkeit in der Phasenzusammensetzung ist mit zunehmendem Tonanteil in den Rohstoffen auch die Zunahme an Alkalioxiden zu verzeichnen. Dem Zement hat dies den Ruf eingebracht Salze ins Bauwerk einzubringen. Die Alkalien sind, abhängig von den Rohstoffen und deren chemischer Zusammensetzung, in den Weißkalken bzw. Hydraulischen Kalken bis hin zum Zement zu finden. Auch die Sulfate nehmen mit zunehmendem Anteil an Hydraulefaktoren zu. In Bild 2 wird veranschaulicht, wie ausgehend von sehr reinem CL 90, der keine Alkalien und Sulfate enthält bis hin zum HL 5 eine stetige Zunahme der Alkalien und Sulfat zu verzeichnen ist [7]. Zemente können dann höhere aber auch niedrigere Alkaligehalte aufweisen, insbesondere wenn alkaliarme Varianten eingesetzt werden. Erkennbar ist dies bei den Zementen an der Bezeichnung NA (CEM I 32,5 NA). Die Zemente weisen meist höhere Sulfatgehalte als Natürliche Hydraulische Kalke auf.

Die Baukalke werden nach ihrer Zusammensetzung unterteilt:

Weißkalke (Luftkalke, carbonatisch erhärtend)

- CL 90, CaO und MgO-Gehalt >90 M.-%, $\text{MgO} \leq 5$ M.-%
- CL 80, CaO und MgO-Gehalt >80 M.-%, $\text{MgO} \leq 5$ M.-%
- CL 70, CaO und MgO-Gehalt >70 M.-%, $\text{MgO} \leq 5$ M.-%

Dolomitkalke (Luftkalk, carbonatisch erhärtend)

- DL 85, CaO + MgO >85 M.-%, MgO ≥ 30 M.-%
- DL 80, CaO + MgO >80 M.-%, MgO ≥ 5 M.-%

Hydraulische Kalke

- HL 2, Druckfestigkeit nach 7 Tagen - nicht gefordert
nach 28 Tagen - 2-7 N/mm²
- HL 3,5, Druckfestigkeit nach 7 Tagen - ≥ nicht gefordert
nach 28 Tagen - 3,5-10 N/mm²
- HL 5, Druckfestigkeit nach 7 Tagen - ≥ 2 N/mm²
nach 28 Tagen - 5-15 N/mm²

der Zusatz N – z. B. NHL 3,5 bedeutet:
natürlicher hydraulischer Kalk (ohne Zusatz von Zement)
– organische Zusatzmittel (z. B. Luftporenbildner) erlaubt

der Zusatz Z – z.B. NHL-Z 3,5 bedeutet
Kalke mit Zusatz puzzolanischer oder hydraulischer Stoffe
– organische Zusatzmittel (z. B. Luftporenbildner) erlaubt

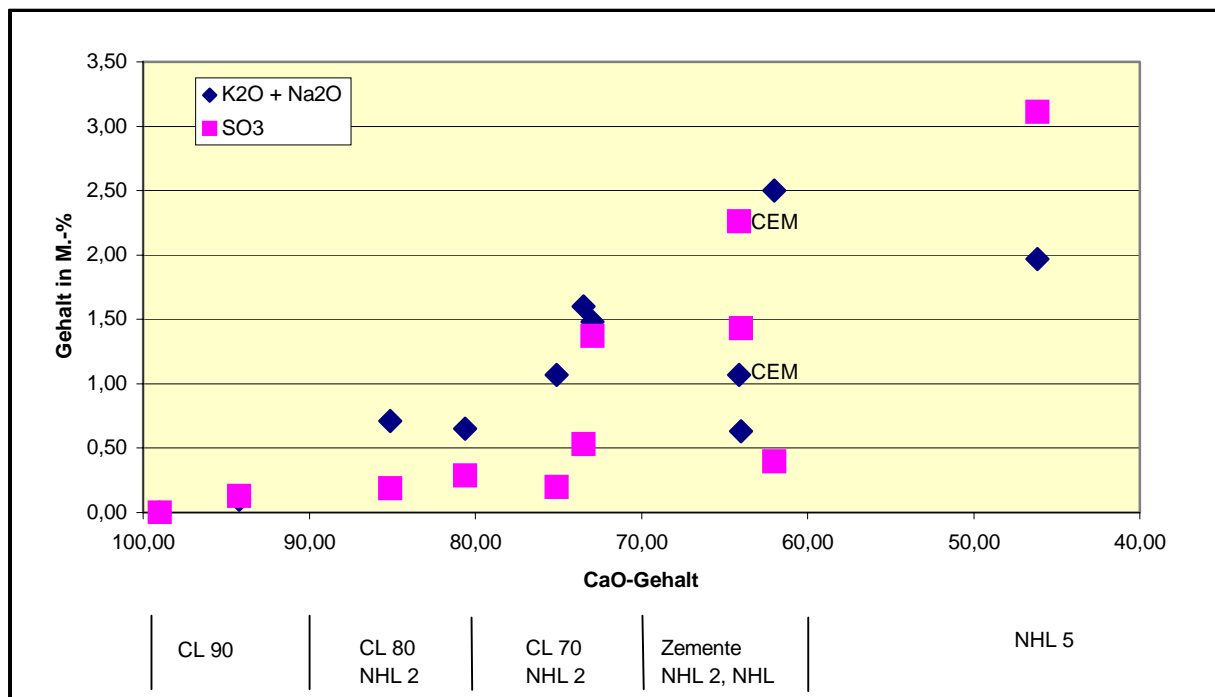
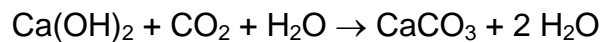


Bild 3: Alkali- und Sulfatgehalte von Luft- und Natürlichen Hydraulischen Kalken [7]

Die Hydraulischen Kalke weisen einen gewissen Anteil an Sulfaten auf, der einerseits durch das Brennen eingebracht wird, andererseits können die Hydraulischen Kalke zur Erstarrungsregelung wie die Zemente einen Zusatz von Gips aufweisen. Der Sulfatgehalt (als SO₃) ist auf 3 M.-% begrenzt kann, aber, wenn die Hydraulischen

und Natürlichen Hydraulischen Kalke raumbeständig sind auf 7 M.-% angehoben werden. Verglichen mit Zement hätten sie dann den doppelten Sulfatgehalt.

Luftkalke zeigen nach Abgabe des Zugabewassers eine Anfangserhärtung, sie erreichen erst nach der carbonatischen Erhärtung ihre Festigkeit. Durch Wasseraufnahme bei Beregnung und anschließendes Trocknung kann es zu wesentlichen Veränderungen der Festigkeit kommen. Meist führen diese Vorgänge zu Festigkeitssteigerungen. Bei der carbonatischen Erhärtung findet die folgende Reaktion statt:



Neben der carbonatischen Erhärtung, die auch bei den Natürlichen Hydraulischen Kalken einen Festigkeitsanteil beiträgt findet die hydraulische Erhärtung durch Wasserbindung der hydraulischen Phasen statt. Die silicatischen Phasen sind sowohl bei den hydraulischen Kalken als auch beim Zement für die Festigkeitsentwicklung maßgeblich verantwortlich. Es bilden sich sogenannte Hydratphasen:

Calciumsilicate – Calciumsilicathydrate

Calciumaluminat – Calciumaluminathydrate

Calciumaluminatferrate – Calciumaluminatferrathydrate

Anwendung von Baukalken

Baukalke eignen sich sehr gut für den Einsatz als Putz auch bei der Restaurierung historischer Bauwerke. Ihr Vorteil ist ihre geringe aber ausreichende Festigkeit, ihr geringer Salzgehalt, wenn man von Hydraulischen Kalken mit hohen Alkaligehalten absieht, ihre Stoffähnlichkeit sowie ihre den historischen Mörteln ähnlichen mechanischen und hygri-schen Eigenschaften. Vor Einsatz in der Denkmalpflege müssen die Alkaligehalte und der Sulfatgehalte der einzusetzenden Baukalke bekannt sein. Anderenfalls besteht Gefahr für das historische Bauwerk.

Die Luftkalke weisen eine beschränkte Zeit auf in denen sie am Bauwerk appliziert werden können. Sie sollten im Zeitraum zwischen Mitte Mai bis Ende August verarbeitet sein, um sicher vor Frostschäden zu sein. Luftkalke haben den Vorteil eines nahezu gleich Null hohen Alkali- und Sulfatgehaltes, weisen aber den Nachteil eines hohen Schwindens und damit einhergehend großen Rissneigung auf. Sollen diese Nachteile kompensiert werden und sind die Sulfatgehalte im historischen Material nicht zu hoch können die Hydraulischen Kalke eingesetzt werden.

Die Erfahrung der letzten Jahre zeigt gute Erfolge beim Einsatz von Luftkalken aber auch von Natürlichen Hydraulischen Kalken. Schäden sind dann aufgetreten, wenn fundamentale Dinge bei der Verarbeitung missachtet wurden. Bei Baukalken ist dies

meist der verfrühte oder verspätete Einsatz von Luftkalken. Zu starkes Reiben der Oberfläche bzw. zu früher Auftrag von Farben auf Luftkalkputze.

Bei Natürlichen Hydraulischen Kalken muss beachtet werden, dass die Festigkeitsentwicklung moderner Natürlicher Hydraulischer Kalke enorm sein kann und die gewünschte Festigkeit überschreiten kann, siehe Bild 4. Zudem besteht die Gefahr, dass das Calciumaluminat bzw. das Calciumaluminathydrat mit den Sulfaten aus dem historischen Bauwerk Ettringit bilden kann und zu Schäden führen kann. Im Bereich der Putze, wo eine schnelle Carbonatisierung gegeben ist, spielen Schäden durch Ettringitbildung nur eine untergeordnete Rolle. Überall dort wo Mörtel aus Natürlichen Hydraulischen Kalken nicht carbonatisieren oder nur langsam carbonatisieren können und Sulfate im Bauwerk vorhanden sind ist die Gefahr durch Ettringitbildung gegeben.

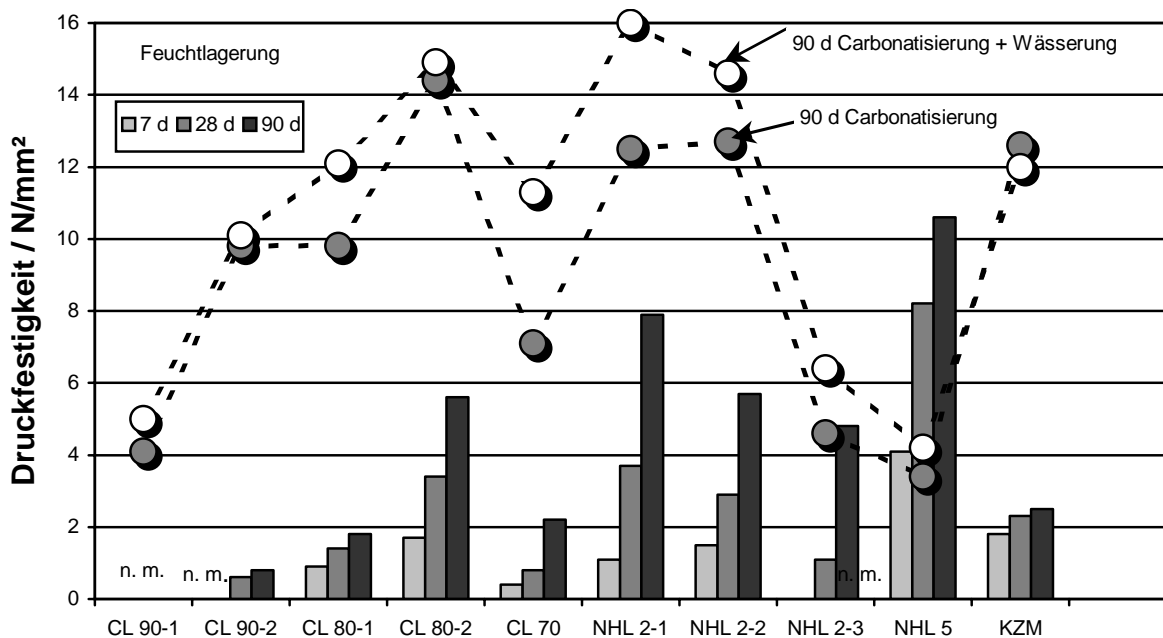


Bild 4: Entwicklung der Druckfestigkeiten von Kalkmörteln in Abhängigkeit von Lagerungsdauer und -art Feuchtlagerung (Klima 20/95), Carbonatisierung (20/65 und 1 Vol.-% CO₂), Carbonatisierung und Wässerung (20/65 und 1 Vol.-% CO₂ plus 2malige Wässerung für 30 s), (n. m. = nicht messbar wegen zu geringer Festigkeit) [7]

Literaturverzeichnis

- [1] Stark, J.; Wicht, B.: Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff. Herausgegeben vom F.-A. Finger Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2000
- [2] Asaga, K.; Daimon, M.; Li, Z. X.; Furusawa, Y.: Reproduction of Ancient Cementitious Material Used in China 5000 Years ago. Proceedings of the 4th International Conference: Repair, Rehabilitation and Maintenance of Concrete Structures, and Innovations in Design and Construction, Seoul, Korea, 2000, Editor, V. M. Malhotra, S. 123-138
- [3] Vitruvius, P. M.: Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von Curt Fensterbusch, 5. Auflage, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1991
- [4] Böttger, K. G., Thiedig, F., Knöfel, D.: Keltisch-römische Mörtel vom Magdalensberg in Kärnten. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 8(2002), S. 19-41
- [5] Lamprecht, H.-O.: Opus Caementitium: Bautechnik der Römer. Beton-Verlag, Düsseldorf, 3 Auflage, 1987
- [6] Kraus, K.: Kalkarten gestern und heute. In Kalkmörtel und Kalkfarbe – Gestern, heute ... und morgen?, IFS-Bericht Nr. 19-2004, ISSN 0945-4748
- [7] Winnefeld, F.; Böttger, K. G.; Knöfel, D.: Eigenschaften von Baukalken mit unterschiedlich hohen hydraulischen Anteilen - eine kritische Betrachtung hinsichtlich des Einsatzes für die Denkmalpflege. Proc. of the 4th Internat. Colloq. Materials Science and Restoration, TA Esslingen (1996) AEDIFICATIO Publishers, Freiburg, Vol. 2, S. 801-816