

## 12 Bindemittel und Mörtel

### 12.1 Bindemittel Kalk

#### 12.1.1 Allgemein

Wenngleich man als Laie bereits etwas über den Chemismus vom *Brennen* des Kalks bis zu seiner Erhärtung gelernt hat, so muss man doch einräumen, dass die Kenntnisse gering sind, wenn es wirklich zur Sache geht:

Aus Kalkstein, dem Calciumcarbonat  $\text{CaCO}_3$ , entsteht durch Abgabe von  $\text{CO}_2$  während des Brennens das Vorprodukt Calciumoxid  $\text{CaO}$ , welches so nicht verwendbar ist. Nach dem Löschen erhält man das Rohprodukt Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , welches mit Sand und Wasser gemischt den gewünschten Kalkmörtel liefert. Nach Aufnahme von  $\text{CO}_2$  aus der Luft entsteht schließlich wieder Kalkstein, soweit es das darin befindliche Bindemittel Kalk betrifft. Nur - dazu bedarf es eine geraume Zeit, u.U. Jahrhunderte.

Dies betrifft aber nicht nur den chemischen Vorgang, sondern vor allem das weite Spektrum der verschiedenen Produkte bzw. ihrer Herkunft und Anwendung. Ähnlich den Legierungsbestandteilen beim Stahl tragen auch hier die natürlichen wie hinzugefügten *Verunreinigungen*, wie Aluminium, Eisen, Silizium bzw. deren Oxide, zu erheblichen Unterschieden hinsichtlich der Festigkeit und der damit verbundenen Eigenschaften bei.

Künstliche Zugaben, Additive, die der Erfüllung bestimmter Anforderungen wie Seewasserbeständigkeit, Schwefelbeständigkeit, Frostschutz bzw. Wasserabweisung u.v.a. dienen, sollen hier ausgespart bleiben.

Kalk wurde schon 3000 Jahre vor der Zeitrechnung von den Ägyptern zum Bau der Pyramiden verwendet; die Römer setzten ihm Puzzolanerde, ein Mineral aus der Gegend von Putuoli, und auch anderes bei, und erzielten damit Eigenschaften, die den Kalk für den Wasserbau geeignet machten.

Der Rohstoff Kalk wird u.a. nach seinem Anteil an Magnesium (Mg), welches sich; im Vergleich zu anderen Mineralien wie Calcium (Ca) verhält, unterschieden. Der so genannter Weißkalk enthält 95 bis 100 %  $\text{CaO}$  und höchsten 5 %  $\text{MgO}$ , der Graukalk hingegen, hergestellt aus Dolomitgestein, besteht aus 5 bis 45 %  $\text{MgO}$ . Die Eigenschaften beider Kalke sind ähnlich, jedoch wird letzterer von Schwefeldioxid angegriffen. Da organische Brennstoffe immer auch Schwefel enthalten, wird er nicht für die Verwendung am Gewölbe empfohlen. Die Folgen wären Ausblühungen und Mörtel-Verfall.

Des weiteren werden Kalke nach ihrem Anteil an hydraulischen Faktoren unterschieden, d.h. nach ihrer Fähigkeit, unter Wasser zu erhärten - nicht zu verwechseln mit der Anfangserhärtung, die in jedem Fall an der Luft erfolgen muss.

Die verschiedenen Kalkarten, darunter sind die Fertigprodukte zu verstehen, können zur Veränderung der Eigenschaften wie Festigkeit, Elastizität, Wasserbeständigkeit u. ä., aber auch der Verarbeitung, nicht nur untereinander sondern auch mit Zement gemischt werden. Siehe hierzu die verschiedenen Mörtelgruppen nach DIN 1053.

#### 12.1.2 Herstellung

##### 12.1.2.1 Kalkbrennen

Aus dem Kalkstein,  $\text{CaCO}_3$ , spaltet sich während des Brennens - auch als *Glühen* bezeichnet - bei Temperaturen zwischen 900 und 1200 °C das  $\text{CO}_2$  ab. Übrig bleibt das Calciumoxid,  $\text{CaO}$ , welches bei unveränderten Abmessungen bis zu 46 % seines Gewichtes

verloren hat.

Ein zu kurz gebrannter Kalk enthält noch  $\text{CaCO}_3$ , was nicht von so großer Bedeutung ist wie zu hoch erhitzter, *überbrannter* Kalk. Bei der Sintergrenze von etwa  $1400^\circ\text{C}$  entsteht kristallines  $\text{CaO}$ , welches nur langsam mit Wasser reagiert, so dass es erst nach dem Vermauern unter Volumenvergrößerung zum Löschvorgang kommt. Rissbildung im harten Mörtel ist dann die Folge.

Althergebracht erfolgte das in hochofenartigen Aufschichtungen von Kalkstein-Brocken in einem Erdloch (17.26) oder einem Turm (Museum Glenleiten), darunter wurde über mehrere Tage ein intensives Feuer unterhalten. Man kann sich vorstellen, dass diese Verfahren nur bedingte Homogenität bezüglich der chemischen Umwandlung versprochen. Die heutige Herstellung erfolgt industriemäßig, z. B. in Drehrohröfen, die einen hohen Homogenitätsgrad garantieren.

Der so entstandene Stückkalk, der heute zu Branntkalk vermahlen wird, ist nur ein Vorprodukt und als solches nicht direkt verarbeitbar; er muss zuvor gelöscht werden.

**Vorsicht** - *ungelöschter Kalk* ist stark ätzend, da er sich gerne mit dem Wasser der Hautzellen verbindet und das Calciumhydroxid bilden möchte. In Frankreich ist dieser *chaux vive* wegen seiner Gefährlichkeit - auch wegen möglichen Missbrauchs - nicht im öffentlichen Handel erhältlich.

#### 12.1.2.2 *Kalklöschen*

Zu Mörtel oder Putz kann nur das Zwischenprodukt, Calciumhydroxid,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , verarbeitet werden, das durch die Umsetzung des Calciumoxids,  $\text{CaO}$ , unter Zugabe von Wasser entsteht. Man spricht hier von gelöschtem Kalk oder Kalkbrei.

Dazu wird die 2- bis 2,5-fache Menge an Wasser, erst warmes dann kaltes Wasser, dem ungelöschten Kalk vorsichtig und in mehreren Malen zugegeben. In (17.41) wird angegeben, dass 5 kg ungelöschten Kalks 11 l gelöschten Kalk ergeben. Diesem Beispiel mag man entnehmen, welche Folgen schlecht gebrannter bzw. schlecht gelöschter Kalk zeitigen kann - eine Ausdehnung nach dem Vermörteln!

Diese Reaktion ist stark exotherm: 1 kg reines  $\text{CaO}$  entwickelt 1154 kJ Wärme, ausreichend um Löschwasser zum Kochen zu bringen und darüber hinaus noch einen kleinen Teil zu verdampfen. Die Löschreaktion ist um so stärker, je reiner der Kalk ist. Enthält er mehr als 6% Mg-Verbindungen und Ton, dann verzögert sich allerdings der Löschvorgang. Ab mehr als 15% Ton löscht der Kalk nicht mehr; es handelt sich dann bereits um hydraulischen Kalk, dessen Aushärte-Chemismus unter anderen Bedingungen verläuft.

Dabei ist zu beachten, dass ein Zuwenig an Wasser den Kalk *verbrennt*, während ein Zuviel den Kalk *ersäuft* (17.62).

Dieses Jahrtausende alte Verfahren nennt man *Naßlöschen*. Der Vorgang erfolgte früher über eine längere Zeitdauer in Erdgruben, so dass unerwünschte Salze im Boden versickern und ungelöschte Teile nachlöschen konnten.

In Rom gab es laut Plinius ein Gesetz, nach dem Kalk aus den vorgenannten Gründen erst nach dreijähriger Grubenlagerung verarbeitet werden durfte (17.4, 17.26).

So beklagt auch Vitruv (Vitruvius Pollio, röm. Baumeister, seine Werke entstanden zwischen 33 und 14 v.d.Z.) mangelhafte Lagerzeiten des Kalkbreis so wie die *Schlamperei*, dass die Ziegel vor dem Vermauern nicht genügend gewässert würden.

Wichtig ist, dass der Vorgang vollständig abläuft; die Einsumpfdauer heutiger ungelöschter Kalke soll zwischen 12 und 48 Stunden betragen. Zur Prüfung legt man einen Ziegel auf die Oberfläche, er soll nur langsam einsinken. In (17.48) wird empfohlen, den angemachten Kalk

mit einer Sandschicht gegen Aufnahme von CO<sub>2</sub> zu bedecken und 10 Tage stehen zu lassen.

Das moderne industrielle Löschverfahren läuft gänzlich anders ab, man spricht von *Trockenlöschen*:

Gebrannter Kalk wird in Stücken von 2 bis 10 mm während des Transports z.B. in Förderschnecken o.ä. mit Dampf beaufschlagt. Das so erzeugte Calciumhydroxid zerfällt zu einem trockenen, feinen Pulver, welches durchgesiebt wird und sofort in Säcke abgepackt werden kann.

### **12.1.2.3 Das Löschprodukt**

Der Kalkbrei ist eine Suspension von feinsten Calciumhydroxid-Teilchen in Wasser. Die Teilchengröße beträgt nur etwa 1/1000 mm. Dementsprechend hat der gelöschte Kalk ähnlich einem Schwamm eine sehr große spezifische Oberfläche von 5 bis 20 m<sup>2</sup>/g, welche entsprechend viel Wasser zu binden vermag. So kann ein Molekül Ca(OH)<sub>2</sub> bis zu 8 Moleküle Wasser adsorptiv binden, von denen nur 5 Moleküle später durch Absaugen entfernt werden können; die restlichen Moleküle verbleiben als pseudofestes Wasser adsorptiv gebunden. Infolge der großen Menge adsorbierten Wassers hat der Kalkbrei einen fast gel-artigen Charakter.

Das vorgenannte klingt ein wenig akademisch, aber es hilft uns, den anfänglichen so genannten Abbinde-Prozess des Mörtels, aber auch den Anfahr-Prozess des Ofens besser zu verstehen.

### **12.1.3 Luftkalk**

Der gesamte ofentechnische Teil des Backofens, d.h. das Gewölbe so wie dessen direkte Unter- und Umbauung, wurde in Luftkalk-Mörtel verlegt. Nur für die Errichtung der Stützwände wurde ein leicht hydraulischer Kalk verwendet.

Die Bezeichnung Luftkalk ist so zu verstehen, dass dieser Kalk nur an der Luft aushärtet, d.h., dass während der gesamten langandauernden Aushärtphase das noch nicht unter Aufnahme von CO<sub>2</sub> zu Calciumcarbonat verwandelte Calciumhydroxid aus dem sonst bereits festen Mörtel herausgewaschen werden kann, wodurch der gesamte Verband an Festigkeit verliert. Die chemische Formel für den Aushärtungsprozess bzw. für das Aushärtungsprodukt lautet dann:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$

Der Luftkalk war über Jahrhunderte das wichtigste Mörtelbindemittel. Heute ist er weitgehend durch schnellhärtende hydraulische Bindemittel ersetzt; er spielt aber infolge seiner besonderen Eigenschaften wie z.B. gute Verarbeitung und gute Elastizität und ein wenig auch Plastizität des festen Mörtels eine besondere Rolle, er vermag geringe Setzungen und Temperaturdehnungen ohne Rissbildung auszugleichen. Ferner zeichnet er sich durch hohe Porosität (Atmungsfähigkeit) und eine Wärmedehnzahl aus, die der von Ziegel und Kalksandstein entspricht.

Die vorgenannten Eigenschaften wirken sich auch bei einer Mischung mit hydraulischen Kalken und sogar mit Zement aus.

Zu Luftkalken werden in der Hauptsache Dolomitkalke verarbeitet, die neben dem Calciumcarbonat einen erheblichen Anteil aus Magnesiumcarbonat besitzen, so dass das zu verarbeitende Fertigprodukt aus Calcium- und Magnesiumhydroxid besteht.

Der Hydraulefaktor des Rohstoffs liegt zwischen Null und 0,1, d.h. es ist weder Aluminium noch Silicium noch Eisen bzw. deren Verbindungen in nennenswerter Menge vorhanden. Man spricht im Fachjargon auch aufgrund seiner Konsistenz von einem *fetten* Kalk.

Diese Konsistenz ist es auch, die den Transport von CO<sub>2</sub> ins Innere des Mörtels hemmt und ein Abbinden nur sehr langsam verlaufen lässt.

Schwindrisse können vermieden werden, indem man dem Kalk etwas Portland-Zement (bis 1/7 der Kalkmenge) oder auch etwas Gips (bis 1/3 der Kalkmenge) zugibt. Davon wird für den Bau des Backofens jedoch ausdrücklich abgeraten. Der Kalkmörtel soll seine natürlichen Eigenschaften behalten, und außerdem sind alle in Luftkalk gelegten Bauteile relativ hoch belastet, so dass dem Schwinden ein Setzen folgen kann. Befürchtet wird zudem das Entstehen von Ausblühungen.

## 12.1.4 Hydraulische Kalke

### 12.1.4.1 Allgemein

Diesen Kalk haben die Römer *erfunden* (17.4):

sie haben nämlich festgestellt, dass die Zugabe einer gewissen Menge der in Putuoli vorkommenden Erde dem *Normalkalk* hydraulische Eigenschaften verleiht, d.h. dass er dadurch für die Erstellung von Hafengebäuden geeignet wird. Ferner haben sie festgestellt, dass andere Erden ähnliche Wirkungen erzielen, wie z. B. die von Santorin, später der Traß aus der Gegend von Koblenz oder auch die Zugabe von Ziegelmehl.

Nach dem ersten Fundort Putuoli wird die gesamte Gruppe dieser Stoffe, die dem Kalk hydraulische Eigenschaften verleihen, *Puzzolane* genannt. Technisch spricht man heute jedoch von Hydraulefaktoren. Letztere Bezeichnung ist insofern berechtigt, als man über die Zusammensetzung zu einer Formel gelangt, die - als Faktor - eine Aussage über die hydraulische Eigenschaft der Mischung zulässt.

Der Hydraulefaktor ist wie folgt definiert:  $i = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$

Dabei entspricht der Wert  $i=0$  dem reinen fetten Luftkalk und  $i=0,5$  dem hochhydraulischen Kalk.

Auch an anderen Versuchen, Luftkalk zu hydraulischem Kalk zu veredeln, hat es in der Geschichte nicht gefehlt. So hat man herausgefunden, dass die Zugabe von Eiweiß jedweder Herkunft dies bewirken kann. In (17.26) wird von der Zugabe von Blut, Eiern, Buttermilch u.ä. während des Mittelalters berichtet.

Ansonsten haben alle *hydraulisch* wirkende Zusatzstoffe eines gemein: den hohen Anteil an Kieselsäure  $\text{SiO}_2$ , der im allgemeinen zwischen 50 und 80% des Zusatzes an Hydraulefaktoren betragen kann. Es handelt sich aber nicht um die kristalline Form wie z.B. bei Quarzsand, der mit dem Kalk nicht zu einem Kalksilikat reagiert, sondern um die amorphe (gestaltlose) Form.

Die chemische Formel für den Aushärtungsprozess bzw. für das Aushärtungsprodukt lautet dann:  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{SiO}_2(\text{amorph}) + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Es ist dann - entsprechend dem Anteil an Hydraulefaktoren - Calciumsilikat entstanden, eine wasserunlösliche und feste Verbindung, wie sie ähnlich auch bei der Hydratation von Zement entsteht.

Der Vollständigkeit halber soll noch auf die Wirkung des schon von den Römern verwendeten Ziegelmehls eingegangen werden, dessen Zugabe auch in der heutigen Literatur gelegentlich empfohlen wird. Aber vermutlich hat es doch die ursprüngliche Bedeutung verloren.

Ziegelmehl besteht aus gebranntem Ton, und dieser hat die folgende ungefähre Zusammensetzung, die einer guten Puzzolane entspricht:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)$ . Beide Bestandteile, Tonerde und Kieselsäure müssen aber in amorpher Form vorliegen, um dem Kalk als hydraulische Komponente zu dienen. Ziegel, so wie sie früher bei etwa 500 bis 600°C schwach gebrannt wurden, besitzen bzw. besaßen diese Eigenschaften noch. Eine höhere Brenntemperatur als 700°C führt aber bereits zu einer chemischen und festen

Reaktion zwischen  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , welches hernach nicht mehr mit dem gelöschten Kalk reagieren kann (17.4).

Ungebrannter Ton dagegen wäre aber alles andere als ein verbessernder Zusatz; er liefert eher einen schmierigen, nicht härtenden und wasserlöslichen Mörtel. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Siliciumdioxid des ungebrannten Tons in einem Kristallgitter des Aluminiumoxids gebunden ist und deshalb nicht mit dem Kalk reagiert.

Die hydraulischen Kalke sind keine vollhydraulischen Bindemittel, sondern Übergänge zwischen lufthärtenden und wasserhärtenden Bindemitteln. Der dem Luftkalk am nächsten stehende Wasserkalk besitzt nur ein geringes hydraulisches Erhärtungsvermögen. Die damit hergestellten Bauteile müssen längere Zeit an der Luft erhärten und sind auch dann nicht unterwasserbeständig, sondern gegenüber Luftkalk nur erhöht feuchtigkeitsbeständig bei abwechselnder Luft- und Wassereinwirkung.

Der hochhydraulische Kalk, bei dem der Kalk weitgehend an Hydraulefaktoren gebunden ist, ist ein nahezu vollhydraulisches Bindemittel mit nur noch geringer Carbonathärtung. Damit hergestellte Mörtel sind, nach entsprechender Aushärtungszeit unter Luftumgebung, unterwasserbeständig.

In (17.4) ist eine Tabelle typischer Zusammensetzungen zu finden. Unter den hydraulischen Anteilen muss man hier den sich aus Kalk und Ton bildenden Teil verstehen. Die Zeile Hydraulefaktor und Druckfestigkeit wurde hinzugefügt.

Benennung	Wasserkalk	hydraul. Kalk	hochhydraul. Kalk
Tonbestandteile %	13	20	28
CaO %	87	80	72
hydraul. Anteile %	33	50	70
freies CaO %	67	50	30
Hydraulefaktor „i“	0,15	0,25	0,4
Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup> 1		2	5

(Mindest-Druckfestigkeit nach DIN 1060)

Für den Anwender sind natürlich

### Hydraulische Kalke

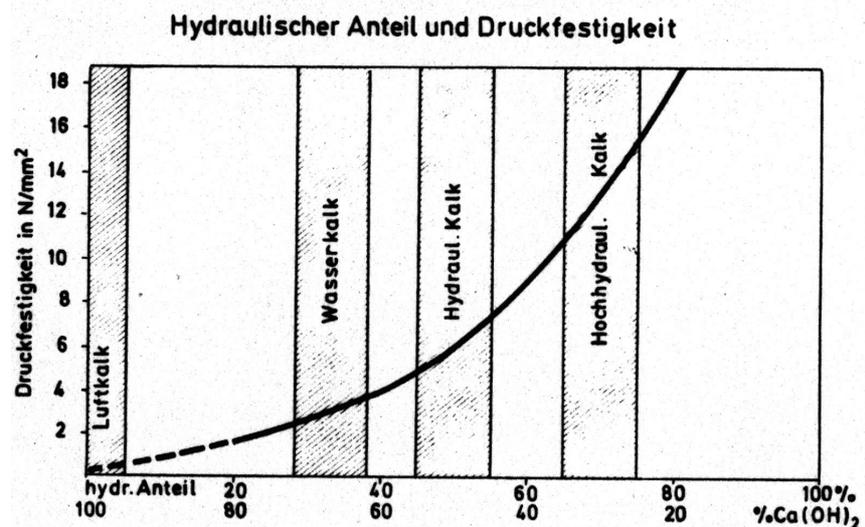


Abb. 12-1 Hydraul. Kalke, Hydraulischer Anteil und Druckfestigkeit (17.4)

Unterscheidungsmerkmale hinsichtlich Druckfestigkeit von Bedeutung. Die nachfolgende Abbildung 12-1 liefert dazu die der Quelle (17.4) entnommenen Kurve.

#### 12.1.4.2 Wasserkalk

Unter diesem Begriff versteht man einen Kalk mit leicht hydraulischen Eigenschaften, der beim Löschen noch eine gewisse Lebhaftigkeit zeigt.

Der Hydraulefaktor beträgt zwischen ca. 0,1 und 0,16, d.h. sein Tongehalt liegt zwischen ca. 8 und 14 %.

Der Mörtel kann nach dem Abbindeprozess, der je nach Zusammensetzung ein bis zwei Wochen benötigt, einer feuchten Umgebung ausgesetzt werden. Der Erhärtungsprozess setzt sich ähnlich wie beim Zement fort.

Ein im Handel befindliches Produkt der Firma Lafarge hat die folgende Zusammensetzung in %:

Handelsname	Chaux blanche
CaO	65
MgO	0,5
CO <sub>2</sub>	12
SiO <sub>2</sub>	12
H <sub>2</sub> O	9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8
Druckfestigkeit nach 28d	7 N/mm <sup>2</sup>
Norm: NFP15-311	Handelsbezeichnung NHL-Z 3,5
Farbe L	92 (Weißgrad)

Hydraulefaktor „i“ = 0,19, bereits erhöht entgegen den o.g. Angaben

Hergestellt wird der Kalk aus natürlichem Kalkstein aus dem Ardèche-Gebiet unter Zugabe geringer Mengen weißen Zements zur Aufrechterhaltung der Mischungsverhältnisse - so der Hersteller. Der vorgenannte Kalk wurde zum Bau der Stützmauer verwendet.

#### 12.1.4.3 Hydraulischer Kalk

Unter diesem Begriff versteht man Kalk, der nicht mehr gelöscht werden kann, und der nach dem ersten Abbinden, d.h. nach ca. 2 Tagen, in der Lage ist, auch unter feuchten Umgebungsbedingungen weiter zu erhärten.

Der Hydraulefaktor für den Kalk mittlerer *Hydraulizität* beträgt zwischen 0,16 und 0,23, d.h. der Anteil an Tonen liegt zwischen 14 und 19 %.

Ein im Handel befindliches Produkte der Firma Lafarge hat die folgende Zusammensetzung in %:

Handelsname	Tradifarge
CaO	68
MgO	0,5
CO <sub>2</sub>	6
SiO <sub>2</sub>	14
H <sub>2</sub> O	9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1
Druckfestigkeit nach 28d	15 N/mm <sup>2</sup>
Norm: NFP15-311	Handelsbezeichnung: NHL-Z5
Farbe L	93 (Weißgrad)

Hydraulefaktor „i“ = 0,23

Hergestellt wird der Kalk aus natürlichem Kalkstein aus dem Ardèche-Gebiet unter Zugabe geringer Mengen weißen Zements zur Aufrechterhaltung der Mischungsverhältnisse - so der Hersteller.

#### 12.1.4.4 Hochhydraulischer Kalk

Hochhydraulisch bedeutet, dass auch der Anteil an Ton bereits sehr hoch ist und sich der Kalk fast wie Zement verhält: er besitzt eine sehr hohe Druckfestigkeit und ist wasserunlöslich. Das Rohprodukt ist nicht mehr löslich, soweit die Zusammensetzung natürlich ist.

Der Hydraulefaktor beträgt zwischen 0,23 und 0,28, bzw. der Anteil an Tonen zwischen 19,1 und 21,8%.

Der Abbinde-Prozess dauert weniger als 2 Tage. Hergestellt wird dieser Kalk aus Mergel mit hohem Ton-Gehalt.

Eine Besonderheit unter den hochhydraulischen Kalken bildet der *Roman-Kalk* mit einem hohen Ton-Anteil von 30 bis 40%. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen beträgt etwa 20 N/mm<sup>2</sup>.

#### 12.1.4.5 Der Abbindeprozess des Kalkmörtels

Die Erhärtung des Kalkmörtels durch Einwirkung von CO<sub>2</sub> wurde bereits in Kapitel 12.1.3 beschrieben. Diese Erklärung ist allerdings nicht ganz vollständig. Luft enthält nur 0,03% CO<sub>2</sub>, auch die Bewegung von CO<sub>2</sub> durch die Mörtelporen ist äußerst gering. So ergibt sich die Annahme fast von selbst, dass es nicht diese Reaktion allein sein kann, die es ermöglicht, mit weichplastischem Kalkmörtel tragende Wände mit einem täglichen Baufortschritt von mehreren Metern zu errichten.

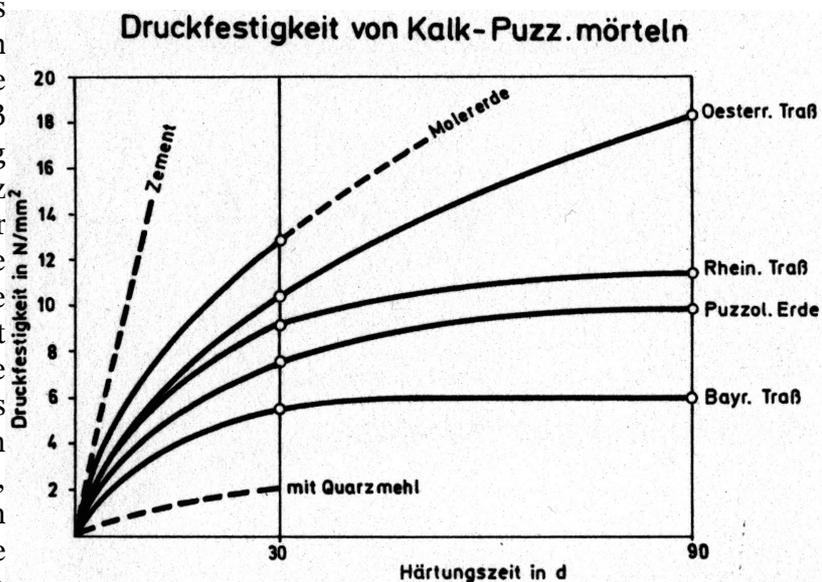


Abb. 12-2 Druckfestigkeit von Kalk-Puzzolan-Mörteln (17.4)

Das relativ schnelle so genannte Abbinden des Mörtels innerhalb von 2 bis 4 Stunden ist nur dadurch möglich, dass der Mörtel sich durch den abnehmenden Gehalt an freiem Wasser rasch verfestigt. Verantwortlich dafür ist zum einen die poröse Struktur des Ziegelmaterials - und zum anderen und wohl zum wesentlicheren - die oben beschriebene adsorptive Wirkung des Kalkpulvers selbst: Das verbleibende, pseudofeste Wasser wirkt dann als Bindemittel, auch wenn das überschüssige Wasser durch Absaugung durch das poröse Ziegelmateriale oder auch durch Verdunstung dem Mörtel entzogen wurde.

Die Wirkung ist ähnlich wie bei feuchtem Steinmehl oder bei feuchtem Sand; auch damit kann man bedingt mauern. Doch sobald das Bindemittel Wasser verdunstet, geht die Bindung verloren. Anders bei Kalkbrei, dieser hält durch Adsorption das Wasser lange genug fest, um eine gute Bindung bis zur zusätzlichen Erhärtung durch  $\text{CO}_2$ -Aufnahme zu gewährleisten. Falls jedoch hohe Temperaturen auftreten, lassen die Adsorptionskräfte nach, eine entsprechende Desorption des Wasser bewirkt eine Einbuße an Festigkeit, siehe ebenfalls die Erhärtungsformel im Kapitel 12. Bei Putzflächen mit großer Oberfläche in tieferen Mauerfugen jedoch in

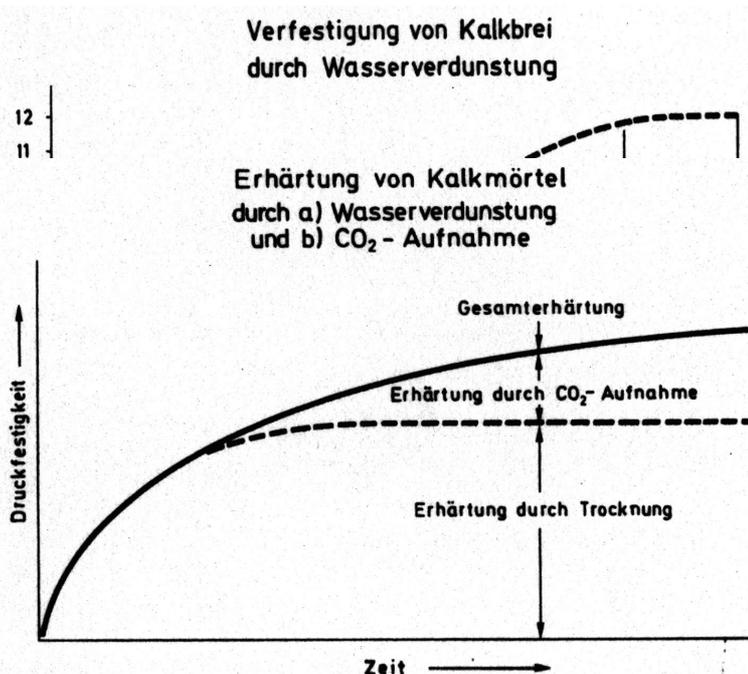


Abb. 12-4 Erhärtung von Kalkmörtel durch a) Wasserentzug, b)  $\text{CO}_2$ -Aufnahme, (17.4)

Kalkmörtel aus dem Innern der Mauern jahrhundertalter Bauwerke erhalten oft noch beträchtliche Mengen Calciumhydroxid. So wohl auch bei dem in der Backofen-Ruine vorgefundenen Kalkmörtel: Während der am Ziegel des Gewölbes anhaftende Mörtel sehr hart war - die Ziegel sind sehr porös und transportieren die  $\text{CO}_2$ -haltigen Rauchgase durch den Ziegel gut bis zum umgebenden Mörtel - so konnte der Mörtel in der Fugenmitte mit dem Fingernagel geritzt werden.

Eine Beschleunigung der Aushärtung kann im allgemeinen durch Aufstellen von Koksöfen erfolgen, sofern die Gase den Mörtel nicht zu sehr erwärmen und vorzeitig trocknen. Im Falle des Backofens jedoch besteht für diesen Erhärtungsprozess sicher kein Bedarf.

## 12.2 Feuerfestmörtel

### 12.2.1 Allgemein

Der Mörtel ist der anfälligste Teil des Mauerverbandes, ihm gebührt ebenso viel oder gar mehr Aufmerksamkeit als dem Stein.

Feuerfeste Mörtel sollen logischerweise in ihrer chemischen und physikalischen Beschaffenheit dem Rohmaterial des zu vermauernden Steines entsprechen.

Leider gelangt laut (17.58) als *feuerfester Zement* oder *Feuerzement* bezeichnetes Material in den Handel, das seinem Namen aber nicht gerecht wird, da es sich oft um sandige Abfallprodukte von Kaolinschlammereien handelt, will vermutlich sagen, es widersteht hohen Temperaturen, aber es mangelt an Festigkeit und an Bindekraft. Feuerfeste Mörtel erhärten

im allgemeinen nicht hydraulisch, sie verdanken ihre Festigkeits- und Bindeeigenschaften ihrem Gehalt an plastischem Ton.

Der Mörtel kann aber so eingestellt werden, dass er mit dem Stein bei geringer Standfestigkeit gut bindet, oder aber bei hoher Standfestigkeit nicht gut bindet; eine Kombination ist möglich, was nur im Ausnahmefall aufgrund des hohen Aufwandes sinnvoll ist.

Bei der üblichen Mauerungstechnik und bei hohen Temperaturen wird weitgehend auf eine Bindung verzichtet; der Mörtel soll bei hoher Temperatur sintern, damit er nicht aus den Fugen rieselt, ferner soll er die Unebenheiten zwischen den Steinen ausgleichen sowie kleine Verschiebungen im Mauerwerk bei ungleichmäßiger Wärmedehnung ermöglichen.

Dies ist allerdings im vorliegenden Fall nicht möglich, da die für den Brotbackofen üblichen Temperaturen von ca. 350 bis 400°C für diesen Prozess nicht ausreichen. Hier kann ein Kalkmörtel Verwendung finden, dessen Festigkeit aber oberhalb 400°C abfällt, bedingt durch die Entwässerung des noch nicht carbonisierten Calciumhydroxids:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Energie} \Rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ .

Weiter müssen Mörtel gut verstreichbar sein und dürfen praktisch nicht schwinden; sie müssen also einen möglichst niedrigen Wassergehalt und größtmögliche Plastizität besitzen. Dies erfordert eine hohe Feinkörnigkeit von 0 bis 1 mm, die im übrigen die Sinterfähigkeit verbessert. Die Forderung nach Volumenkonstanz kann durch Verwendung von Magerungsmittel teilweise oder ganz erfüllt werden.

Die Gesamtschwindung, nach nach Trocknung und Brennen, soll kleiner/gleich 1 % betragen.

Der Vollständigkeit halber hier eine Definition aus der Literatur: Sinterung ist als Sammelbegriff für irreversible Änderungen charakteristischer Eigenschaften bei hoher Temperatur zu verstehen; dies betrifft insbesondere die Bildung neuer Korngrenz-Zwischenschichten.

Zum Abschluss eine Anmerkung. Ich habe den alten Ofenmörtel untersucht und gefunden, dass er unter Verwendung von feinem Sand mit einer Körnung <1mm erstellt worden ist. So gab mir auch der Meister seines Fachs, Monsieur Martin, siehe Kap. 3, den gleichen Rat, feinen Sand zu verwenden. Was ist so wichtig daran? Eigentlich ganz einfach. Liegen sehr viele kleine Körner hinter- und nebeneinander, so verschieben sie sich bei gleicher Gesamtdehnung im Gegensatz zu wenigen größeren Körnern nur geringfügig gegeneinander. Der Mörtel wird somit *gutmütiger*, weicher, elastischer, er bleibt sogar ein bisschen plastisch - vielleicht.

### 12.2.2 Schamotte-Mörtel

Diese Mörtel bestehen aus Schamotte, man versteht darunter eine Mischung aus gemahlenem hochgespannten Ton mit einem relativ hohen Tonerdegehalt (Zusammensetzung siehe unten) und ca. 30 bis 40% (frischem) Ton als Bindemittel. Sie besitzen eine ähnliche Zusammensetzung wie die zu vermauernden Steine, sind aber stets feiner gekörnt.

Die wichtigsten Eigenschaften der feuerfesten Schamotte-Mörtel sind ihre Bindefähigkeit bei Raumtemperatur und Festigkeit nach dem Trocknen; dies beruht auf dem Vorhandensein plastischer Tone. Ihre Festigkeits- und Bindeeigenschaften bei hohen Temperaturen erhalten sie aber durch die vorgenannten Sintervorgänge.

Die einfachen Qualitätsgruppen erfüllen die Aufgabe, ein dichtes und festes Mauerwerk zu schaffen, häufig nur unvollkommen. Die Mörtel müssen, um gut streichfähig zu sein, mit viel Wasser angerührt werden, schwinden daher beim Trocknen und bei der Inbetriebsetzung beträchtlich. Der Verbund mit den Steinen ist daher oft locker. Bei Öfen mit starken Temperaturschwankungen wird der Mörtel aufgrund der starken Dehnung und Kontraktion zerdrückt, er rieselt als Pulver aus den Fugen. So entstehen Undichtigkeiten im Mauerwerk.

Die übliche Fugenbreite schwankt zwischen 2 und 5mm.

Deshalb entwickelte man zahlreiche, den Betriebsbedingungen angepasste Mörtel. Eine frühe Sinterung lässt sich deshalb durch Vermehrung der Flußmittel erreichen (CaO, MgO, siehe Anmerkung unten). Derartige Mörtel können bei hohen Temperaturen aber zu weich werden, weshalb sie nur für niedrig beanspruchte Öfen brauchbar sind, d.h. bis 1000°C.

Abschließend eine persönliche Anmerkung: G. Reinhard, siehe Kap. 3, empfahl als Mörtel für den Backofen die folgende Mischung zu verwenden: 50 Vol-% Schamotte-(Haffner)Mörtel, 30 Vol-% gelöschter Kalk (Calciumhydroxid), 20 Vol-% Sand mit einer Körnung <1mm. Hierdurch sollen die Vorteile des feuerfesten Mörtels mit denen des Kalk-Mörtels kombiniert werden. Dieser Empfehlung konnte leider nicht entsprochen werden, da der gewünschte Schamotte-Mörtel (siehe unten) nicht erhältlich war. Der eingesetzte reine Luftkalk-Mörtel hat sich aber bis dato gut bewährt.

### 12.2.3 Silika-Mörtel

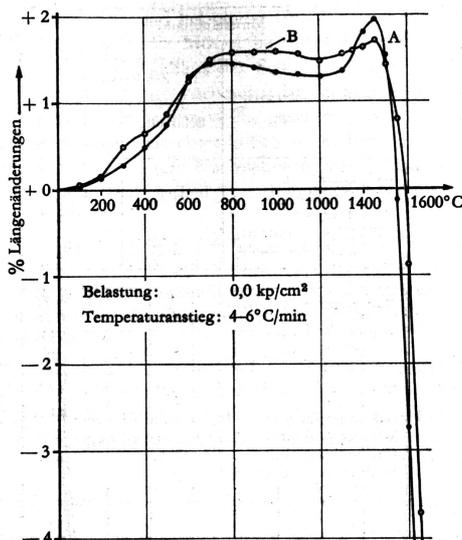
Der Unterschied zum Schamotte-Mörtel besteht in der Zusammensetzung des Anteils an gebranntem und gemahlenem Ton mit seinem typischen hohen Gehalt an Kieselsäure, SiO<sub>2</sub> von bis zu 95 %. Analog zum Schamotte-Mörtel wird dieser Mörtel für die Verfugung von artgleichen Silika-Ziegeln verwendet.

#### Ein Vergleich zwischen Schamotte- und Silika-Mörtel:

Im Folgenden soll eine kurze Übersicht über die wohl wichtigste Eigenschaft zweier Mörtelgruppen (17.57) gegeben werden, das Temperatur- oder Wärme-Dehnungsverhalten.

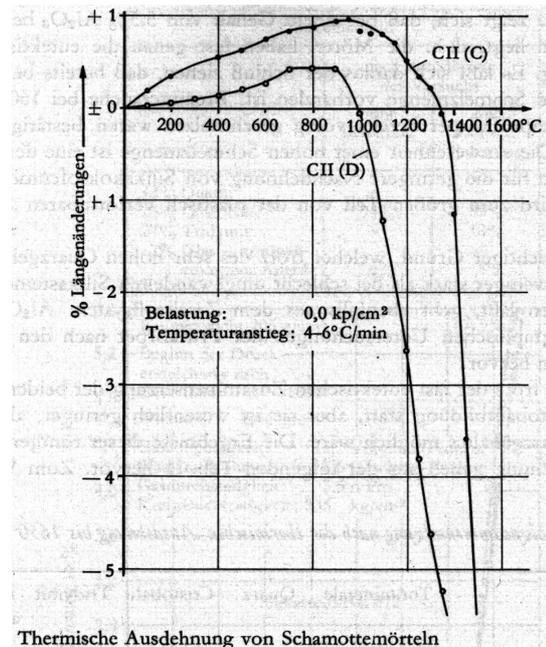
#### Zusammensetzung in %

Mörtelprobe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rest TiO, CaO u.a.
Silika-Koksofenmörtel (A/B)	92/93	5	siehe Kurve A und B Abb.12-5
Schamotte-Mörtel (C)	67	23	siehe Kurve C in Abb. 12-6
Schamotte-Mörtel (D)	58	34	siehe Kurve D in Abb. 12-6
Schamotte-Mörtel (E)	54	37	
Schamotte-Mörtel (F)	51	39	



Thermische Ausdehnung von Silikakoksofenmörteln

Abb. 12-5 Thermische Ausdehnung von Silika-Koksofen-Mörtel A u. B (17.57)



Thermische Ausdehnung von Schamottemörteln

Abb.12-6 Thermische Ausdehnung von Schamottemörtel C u. D (17.57)  
Die beiden vorstehenden Abbildungen

zeigen deutlich den Unterschied: während das Silika-Material ein sprunghaftes Dehnungsverhalten im Temperatur-Bereich 200 bis 700°C zeigt, verläuft die Kurve des Schamotte-Materials relativ flach und somit günstiger - insbesondere die Kurven des Mörtels mit dem höheren Tonerde-Gehalt.

Wer sich für weitere Details interessiert findet im Anhang auf der CD unter „bild12-6a“ eine Analyse verschiedener Mörtelgruppen, leider jedoch ohne die dazugehörenden Eigenschaften.

#### **12.2.4 Tonerde-Schmelzzement (TSZ)**

TSZ wird oft für den Feuerungsbau wie z.B. zur Verbindung von Schornstein-Formstücken eingesetzt oder auch für die Herstellung von feuerfestem Beton verwendet. Wenngleich feuerfest, kann er aufgrund seiner hohen Härte und geringen Elastizität bei hoher Schwindneigung für ein Gewölbe wie dem des Backofens nicht empfohlen werden. Sein Vorteil liegt in der geringen Festigkeitseinbuße bei höheren Temperaturen und dem geringen Ausdehnungskoeffizienten - insbesondere gegenüber Portland-Zement.

Hergestellt wird er aus dem hoch-tonerdehaltigem Rohstoff Bauxit, ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), und Kalk oder  $\text{SiO}_2$ , durch Sintern bei 1500°C, Schmelzen bei 1600°C und Feinmahlen des erstarrten Rohproduktes. Die Farbe ist grau-schwarz. TSZ ist im Gegensatz zu dem *silikatischen* Portland-Zement ein *aluminatisches* Bindemittel.

#### **12.2.5 Feuerbeständiger Beton**

Geeignete Zuschläge zum TSZ wie Ziegelsplit, Schamotte oder Korund ergeben einen bis 1000 oder sogar 1500°C feuerbeständigen Beton, dessen Festigkeit bei 600°C noch 50% beträgt und dann wieder ansteigt, um bei 1400°C die Marke 100% zu erreichen.

Die Zugabe von Silikaten wie Sand oder Kiesel bewirken jedoch bei 500°C einen plötzlichen Anstieg der Wärmedehnung, weshalb diese Stoffe nur bedingt verwendet werden können.