

Mörtel

Autor(en): **Haller, Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **83 (1965)**

Heft 28

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-68202>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eine Studie über den Einfluss der Kornabstufung und der Zumischung eines zweiten Bindemittels auf die Festigkeitseigenschaften

Von P. Haller, dipl. Ing., Sektionschef der EMPA, Dübendorf

Der Einfluss der Kornabstufung auf die Verarbeitbarkeit, die Dichtigkeit und die Festigkeitseigenschaften des Betons ist seit Jahrzehnten bekannt.

Mörtel für die Erstellung von Mauerwerk, Verputzen, Überzügen, Unterlagsböden usw. weisen immer wieder Mängel auf, deren Ursache sehr oft in der Verwendung eines unzweckmässig gekörnten Zuschlagstoffes gefunden wird. Bei den meisten Schadenfällen oder bei einem technischen Ungenügen des Mörtels entspricht die Kornabstufung des Zuschlages nicht den Forderungen, wie sie an die Zuschlagstoffe des Betons gestellt werden, obwohl grundsätzlich die gleichen Gesichtspunkte hinsichtlich der Kornabstufung für Mörtel wie für Beton massgebend sind.

Nach neueren Erkenntnissen in der Betontechnologie kommt dem Sand, d. h. der Kornabstufung unter 1 mm, für die Herstellung eines dichten, druckfesten Betons grösste Bedeutung zu, weshalb die nachfolgenden Feststellungen auch einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung des Betons leisten.

Verarbeitbarkeit, Druck- und Zugfestigkeit, Verformbarkeit, Dichtigkeit (Porosität, Kapillarität) und Schwindvermögen sind die Eigenschaften, die bei einem Mörtel Gegenstand der Betrachtung sein müssen, wobei je nach dem Verwendungszweck der einen oder anderen Eigenschaft ein grösseres Gewicht beizumessen ist. So spielt beim Mauermörtel, bei den Unterlagsböden usw. die Festigkeit und die Verformbarkeit unter Last die Hauptrolle, während beim Verputz zu hohe Zugfestigkeit zu breiteren, gut sichtbaren Rissen führt.

Die Erstellung von hochbeanspruchtem Mauerwerk, z. B. für Hochhäuser, verlangt einen druckfesten, im erhärteten Zustand wenig verformbaren Mörtel, der ausserdem gut auslegbar sein soll, weil die Leistung des Maurers nicht zuletzt von der Geschmeidigkeit des frischen Mörtels abhängig ist. Da die Dosierung des Bindemittels wegen der Kosten nicht beliebig erhöht werden kann, muss bei gesteigerten technologischen Ansprüchen an die verschiedenen Arten Mörtel auch der Kornzusammensetzung des verwendeten Sandes eine erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Bei grösseren Mörtelplatten, wie Verputzen, Unterlagsböden, Überzügen spielen das Schwinden des Mörtels und seine Folgen (Rissbildung und Ablösen von der Unterlage) eine entscheidende Rolle, weshalb auch aus diesen Gründen die Bindemitteldosierung im Rahmen gehalten und deshalb eine Güteverbesserung über die Kornabstufung gesucht werden muss.

In der vorliegenden Abhandlung soll der Einfluss der Kornabstufung auf den Zementmörtel, den verlängerten Zementmörtel und den hydraulischen Kalkmörtel untersucht werden. Obwohl dem letztgenannten Mörtel kaum mehr praktische Bedeutung zukommt, erlaubt doch seine Untersuchung die Wirkung des Portlandzementes im verlängerten Zementmörtel zu erkennen. Zur vollen Bindekraftentfaltung des hydr. Kalkes ist eine genügend intensive Kohlensäureaufnahme aus der Luft, also eine angemessene Lufterhärtung, dazu notwendig.

Der zur Untersuchung gelangende getrocknete Rundsand aus der Grube Oberhard bei Zürich wurde durch Siebung in die Fraktionen < 0,12; 0,12 ÷ 0,2; 0,2 ÷ 0,5; 0,5 ÷ 1; 1 ÷ 2; 2 ÷ 4 und 4 ÷ 8 mm zerlegt und dann in verschiedenen Gewichtsteilen zusammengesetzt.

I. Der Einfluss der Kornabstufung künstlich gemischter Sande

1. Die untersuchten Sande

Die einzelnen Fraktionen der Mischungen sind aus den graphischen Darstellungen Bild 1 ersichtlich. Die Maximalkorngrösse liegt bei 4 und 8 mm. Als feinstes Sieb kam das 2500-Maschen-Sieb mit 0,12 mm lichter Maschenweite zur Anwendung.

Die Korngrössen des durch dieses Sieb fallenden Steinstaubes und der beiden verwendeten Bindemittel wurde mittels der Schlämmanalyse bestimmt, Bild 2. Beim Sand 0,12 mm beträgt der Anteil der Körner unter 5µ noch 11,9 Gew.-%. Die gröbern Fraktionen des Steinstaubes nehmen mit wachsender Korngrösse zu.

Die Mischung A unterscheidet sich von der Mischung B durch einen doppelt so hohen Steinstaubgehalt, wobei die Fraktionen 0,12/0,2 und 0,2/0,5 entsprechend reduziert wurden. Die Siebcurve der Mischung B verläuft praktisch geradlinig, wenn die Siebe im logarithmischen Masstab aufgetragen werden.

Die Mischung C enthält gleich viel Steinstaub wie die Mischung B. Auch der Kornverlauf zwischen den Sieben 0,12 und 1,0 ist der gleiche.

Die Mischung C ist jedoch eine Ausfallkörnung; sie enthält anstelle der Körner 1 bis 4 mm der Mischung B nur noch solche von 4 bis 8 mm.

Die Mischung D enthält keinen Steinstaub und nur 10 Gew.-% der Fraktionen unter 0,5 mm. Der Anteil der Korngrösse 0,5 bis 1,0 mm ist sehr hoch (51 %); wir haben es mit einer typischen Überschusskörnung zu tun. Bei der Mischung C ist der Anteil an Körnern unter 0,5 mm wesentlich grösser (43 %) als bei der Mischung D (10 %).

Die Mischung E enthält 5 % Steinstaub. Die gröberen Fraktionen sind stärker vertreten als die feineren, weshalb sich die Granulometrie-kurve leicht gebogen darbietet.

Die Mischung F ist eine Ausfallkörnung, da die mittleren Korngrössen von 0,5 bis 2 mm fehlen. Der Steinstaub ist zu 10 % vertreten. Die Kurve pendelt um diejenige von Mischung E.

Die Mischung G folgt der stetig gekrümmten Fullercurve P = 100 √(d/D). Der Gehalt an Steinstaub beträgt 14 %, wesentlich mehr als bei der auch stetig gekrümmten EMPA-Kurve, Mischung K (8 %).

Die Mischung H ist eine Überschusskörnung; das Korn 0,5 bis 1 mm ist zu 33 % vertreten. Der Steinstaub unter 0,12 mm fehlt.

Die Mischungen I, K, L und M enthalten 76 % Körner von 1 bis 8 mm.

Die Mischung I kann unter die Ausfallkörnungen (0,12 bis 1 mm) eingereiht werden, da der Anteil der Körner von 0,2 bis 1,0 mm nur gering (3 %) ist. Der Steinstaub unter 0,12 mm ist zu 10 % vertreten.

Die Mischung K zeigt eine stetig gekrümmte Kornkurve bis zu den allerfeinsten Körnern. Sie folgt der durch den Ausdruck P' = 50 · (d/D + √(d/D)) dargestellten Idealkurve EMPA.

Die Mischung L ermangelt der Körner von 0,12 bis 0,5 mm; der Steinstaubgehalt beträgt 10 %.

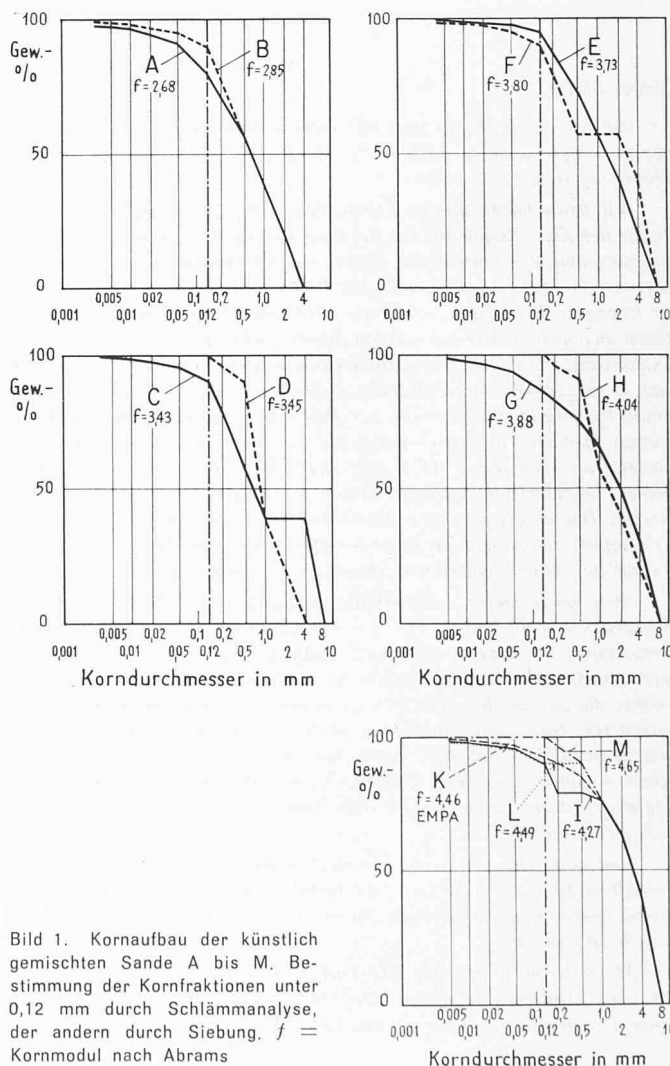


Bild 1. Kornaufbau der künstlich gemischten Sande A bis M. Bestimmung der Kornfraktionen unter 0,12 mm durch Schlämmanalyse, der andern durch Siebung. f = Kornmodul nach Abrams

Die Mischung M besitzt ebenfalls eine der Mischung K ähnliche, stetig gekrümmte granulometrische Kurve, enthält jedoch keinen Staub unter 0,12 mm.

1. Körnungen ohne Staub (<0,12 mm; 2500-Maschen-Sieb): D, H und M.
2. Ausfallkörnungen: C (1 ÷ 4 mm), F (0,5 ÷ 2,0), I (0,2 ÷ 1,0 mm) und L (0,12 ÷ 0,5 mm).
3. Überschusskörnungen: D (0,5 ÷ 1,0 mm: 51 %) und H (0,5 ÷ 1,0 mm: 33 %)
4. Die feineren Kornfraktionen nehmen regelmässig ab: G (Fuller), K (EMPA), M (ohne Staub), A (gestreckte Kurve mit 20 % Staub) und E (Kornabstufung >0,12 mm: schwach gekrümmte Kurve).
5. Nahezu gradlinige Kornabstufung: (logarithmisch aufgetragen) B (> 0,12 mm).

Abrams hat den Schwerpunktsabstand der Fläche unterhalb der logarithmisch aufgetragenen Granulometrie-Kurve als den die Kornabstufung charakterisierenden Modul eingeführt und ihn «Feinheitsmodul» genannt. Diese Zahl wächst, sobald die gröberen Fraktionen zunehmen; richtiger wäre deshalb, den Modul sinngemäss «Grobheitsmodul» zu nennen. In der Folge soll er einfach Kornmodul f genannt werden.

$$f = \frac{\sum \text{Siebrückstände}}{100}$$

Siebrückstand = Ordinate in Gew.-% der Granulometrie-Kurve.

Dieser Kornmodul ist an den jeweils angewendeten Siebsatz gebunden, wobei mit dem 2500-Maschen-Sieb (0,12 mm) beginnend die nächstfolgenden Siebe je ungefähr die doppelte Lochweite aufweisen. Die Kornmoduli f der Mischungen A bis M liegen innerhalb der Grenzen von 2,68 bis 4,65.

Alle Prüfungsergebnisse werden in Funktion des Kornmoduls dargestellt.

2. Raumgewichte der Mischungen A bis M

Die Raumgewichte der Sandmischungen sind in Bild 3 aufgetragen. Höchste Raumgewichte zwischen 1,84 und 1,88 haben die Mischungen F, G, I, K und L in Vier-Liter-Gefässen bei leichtem Klopfen bestimmen lassen. Es sind dies drei Ausfallkörnungen und die beiden Mischungen mit den Idealkurven «Fuller» und «EMPA», deren Staubgehalt zwischen 8 und 14 % liegt.

Über mittlere Raumgewichte zwischen 1,75 und 1,79 haben sich die Mischungen C, E und H ausgewiesen. C ist die Ausfallkörnung, der die Körner von 1 ÷ 4 mm fehlen, E hat eine schwach gekrümmte Siebkurve und H ist eine staubfreie Überschusskörnung.

Zwischen beiden Raumgewichtsgruppen ist die Mischung M ($r = 1,825$) einzureihen (staubfreie Mischung mit stetig gekrümmter Granulometrie-Kurve).

Kleine Raumgewichte zwischen 1,60 und 1,70 haben die Mischungen A, B und D feststellen lassen (alles Körnungen mit 4 mm Maximal Korn). Die Überschusskörnung D ohne Staub < 0,12 mm hat bei weitem das kleinste Raumgewicht, $r = 1,60$.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Hohe Raumgewichte besitzen Sandmischungen mit stetig gegen das Feinkorn abnehmenden Fraktionen und Ausfallkörnungen (unter 2 mm) mit einem Staubgehalt von 10 % und 14 %.

Niedrige Raumgewichte müssen bei Sandmischungen mit hohem Anteil an Mittelkorn von 0,5 bis 1 mm und bei solchen mit einem Maximal Korn von 4 mm erwartet werden, deren Grobanteil 1 ÷ 4 mm um 40 % beträgt.

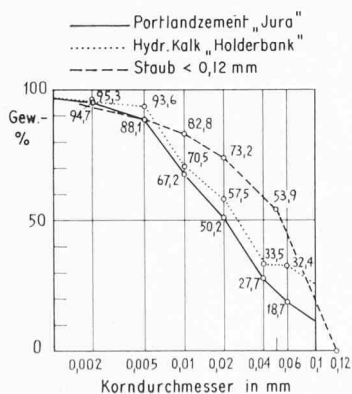


Bild 2. Schlämmanalyse der Staubfraktionen unter 0,12 mm und der beiden verwendeten Bindemittel: Portlandzement und hydraulischer Kalk

Staubfreiheit ist nicht allein für ein geringes Raumgewicht bestimmend (H und M haben mittlere Raumgewichte).

Höchste Raumgewichte sind aber nur mit um 10 % liegendem Staubgehalt zu erreichen.

Mit zunehmendem Kornmodul ist ein Anstieg der Raumgewichte der Mischungen zu erkennen, und je grösser das Maximal Korn, desto höher ist auch das Raumgewicht des Sandes zu erwarten.

Die Hohlräume der Sandmischungen lassen sich mit einem spezifischen Gewicht von 2,65 zwischen 29,0 % (I: $r_s = 1,881$) und 39,3 % (D: $r_s = 1,607$) errechnen. Der Hohlraum des Überschusskornes D ist 36 % grösser als derjenige des Ausfallkornes I.

3. Wasserzusatz und Verarbeitbarkeit

Die 12 Sandkörnungen wurden mit drei verschiedenen Bindemitteldosierungen zu Mörtel in plastischer Konsistenz verarbeitet. Die Dosierungen der drei Mörtelarten waren folgende:

Zementmörtel I: 300 kg Portlandzement/m³ fertigen Mörtel

verlängerter Zementmörtel II: 100 kg Portlandzement/m³ fertigen Mörtel und 200 kg hydr. Kalk/m³ fertigen Mörtel

hydr. Kalkmörtel III: 350 kg hydr. Kalk/m³ fertigen Mörtel

Der Mörtel ist mit so viel Wasser anzumachen, dass er als Mauer- oder Verputzmörtel leicht auslegbar ist und als Verputzmörtel an die Wand geworfen gut klebt, nicht abfließt und nicht zu Absetzrissen neigt. Da mit zunehmendem Kornmodul, d. h. mit steigendem Anteil der grösseren Sandanteile die gesamte Oberfläche des Sandmaterials abnimmt, wurde der Wasserzusatz in % der festen Bestandteile bei grösserem Kornmodul kleiner gewählt, und zwar nach folgender Beziehung:

Bild 4:

Zementmörtel I: $w \% = 23,74 \div 2,84 f$

verlängerter Zementmörtel II: $w \% = 25,24 \div 3,0 f$

hydr. Kalkmörtel III: $w \% = 27,48 \div 3,2 f$

Die Konsistenz bzw. die Verarbeitbarkeit des Mörtels wurde mit dem Schlagtisch zu erfassen versucht:

Gewicht des Schlagtisches mit Glasplatte: 3,45 kg

Fallhöhe: 1 cm

Anzahl der Schläge: 10, 20 und 30

Form der Schalung: abgestumpfter Kegel aus Bronzeblech

unterer lichter Durchmesser: 10 cm

oberer lichter Durchmesser: 7 cm

Höhe: 6 cm

Am Kuchen werden zwei senkrecht zueinander stehende Durchmesser gemessen und gemittelt. Die Ergebnisse des Schlagtischversuches mit 20 Schlägen (Kuchendurchmesser) sind in Bild 5 aufgetragen.

a) Das Ausbreitmass wurde nach 10, 20 und 30 Schlägen bestimmt. Die mittlere Zunahme des Ausbreitmasses aller Körnungen von 10 auf 20 und von 20 auf 30 Schläge beträgt bei den drei Mörtelarten:

I: 2,5 bzw. 2,0 cm

II: 2,4 bzw. 2,0 cm

III: 2,5 bzw. 2,1 cm

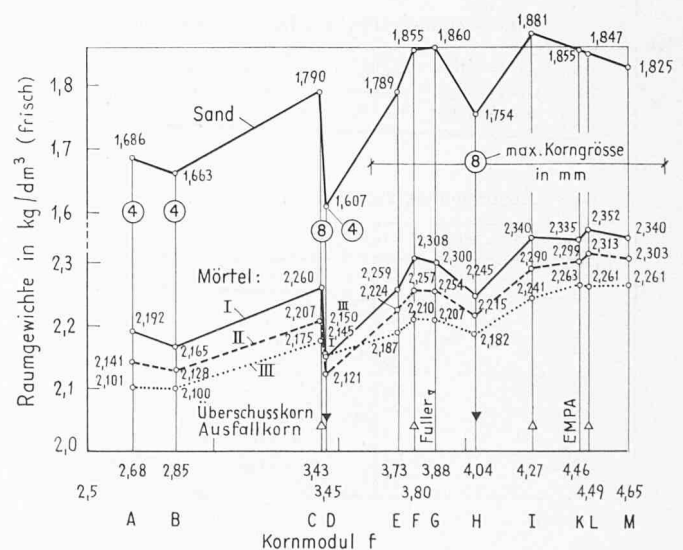


Bild 3. Raumgewicht der drei Mörtelarten: Zementmörtel I, verlängerter Zementmörtel II und hydraulischer Kalkmörtel III beim Einfüllen in die Schalung in Funktion des Kornmoduls im Vergleich mit den Raumgewichten der Sande

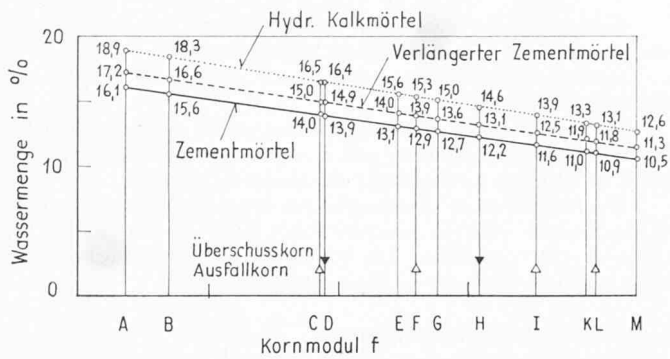


Bild 4. Anmachwasser der Mörtel in Prozent der festen Bestandteile, dargestellt in Funktion des Kornmoduls

Bei höherer *Schlagzahl* nimmt das Ausbreitmass weniger zu. Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der verschiedenen Mörtelmischungen genügt es, z. B. die Kuchendurchmesser mit 20 Schlägen zu vergleichen.

b) Mit zunehmendem *Kornmodul f* nimmt der Kuchendurchmesser, also die Verarbeitbarkeit, bei den drei Mischungen I, II und III ab. Daraus ergibt sich, dass der Wasserzusatz des Mörtels für die Sandmischungen mit höherem Kornmodul, d. h. für diejenigen mit einem höheren Anteil an groben Körnern, relativ zu klein gewählt wurde.

c) Die *Neigung der Geraden der Konsistenz* – gegeben durch den Mittelwert der beiden ersten und der beiden letzten Körnungen – ist beträchtlich kleiner als diejenige der Geraden des Wasserzusatzes.

Die Verhältniszahlen der Neigungen:

$$\frac{\text{Kuchendurchmesser}}{\text{Wasserzusatz in \%}}$$

betragen: Mischung I: 0,90
Mischung II: 0,79
Mischung III: 0,70

Beim Zementmörtel vermindert sich bei fallendem Wassergehalt die Plastizität mit steigendem Kornmodul stärker als beim verlängerten Mörtel und bei letzterem noch ausgeprägter als beim hydr. Kalkmörtel.

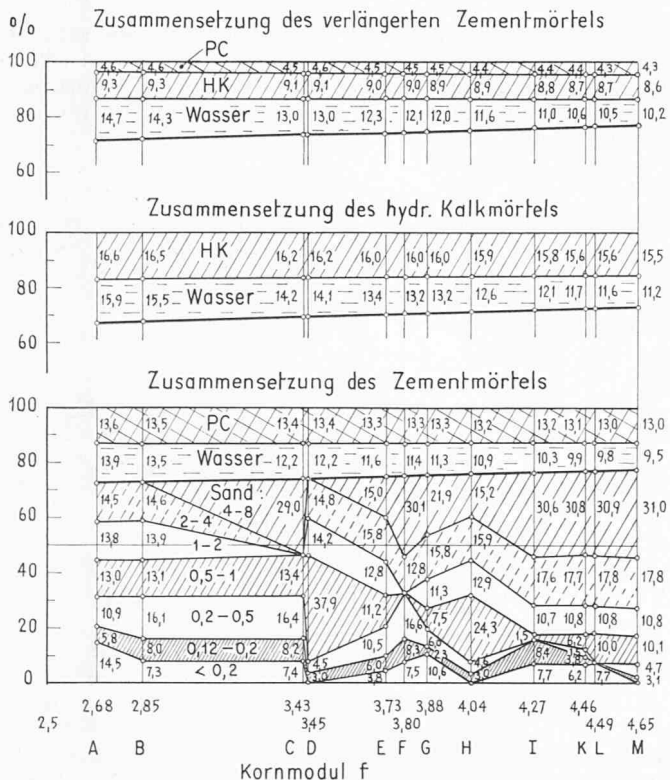


Bild 6. Prozentuale Anteile der Bindemittel, des Anmachwassers und der Sandfraktionen in Abhängigkeit vom Kornmodul

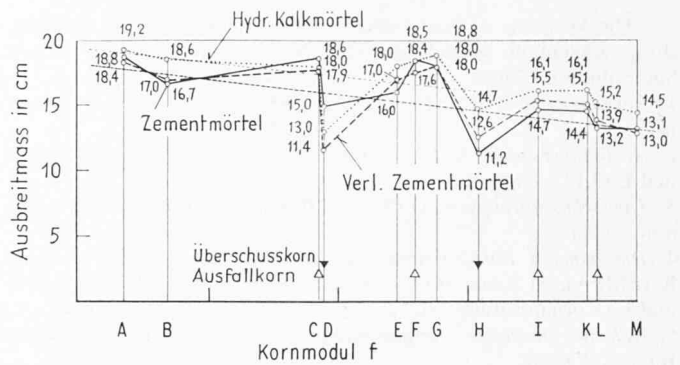


Bild 5. Ausbreitmass (= Kuchendurchmesser in Zentimeter) der drei Mörtelarten in Abhängigkeit vom Kornmodul

d) Der *Wasserzusatz* zur Erzielung gleicher Plastizität verschiedener Mörtel ist *praktisch unabhängig vom Kornmodul*. Für ein Ausbreitmass von 15 cm sind für die Bindemittelarten folgende Wasserzusätze notwendig:

$$\begin{aligned} \text{I:} & w = 16,2 \% \\ \text{II + III:} & w = 17,3 \% \end{aligned}$$

e) Über eine bessere *Verarbeitbarkeit* als aus der Geraden zu erwarten war, haben sich die Sandkörnungen C, E, F, G, I und K bei allen drei Mörtelarten ausgewiesen. Es sind dies die *Ausfallkörnungen* C, F und I sowie die *stetig gekörnten Sande* E, G und K.

f) Eine beträchtlich schlechtere Verarbeitbarkeit lassen die beiden *Überschusskörnungen* D und H feststellen. Diese benötigen zur Erreichung gleicher Plastizität mehr Anmachwasser als die andern Körnungen, weshalb die Festigkeitseigenschaften noch kleiner als in der vorliegenden Untersuchung gefunden werden.

g) Die Sande mit einem Ausbreitmass von 17 bis 18,8 cm (Mittelwerte der drei Mörtelarten I, II und III, 20 Schläge) enthalten 25 bis 43 % *Feinsand* unter 0,5 mm. Körnungen mit einem Feinsandgehalt von 15 ÷ 21 % haben ein Ausbreitmass von 15,2 bis 15,4 cm bestimmen lassen; über ein Ausbreitmass von 12,8 bis 14,1 cm haben sich die Mörtel mit Sanden, die nur 10 % Feinsand unter 0,5 mm enthalten, ausgewiesen.

Das Ausbreitmass, das vom inneren Reibungswiderstand des frischen Mörtels gegen Verformung abhängig ist, wird demnach vor allem durch den Gehalt an Feinsand unter 0,5 mm beeinflusst.

h) Obwohl der mittlere Wasserzusatz der 12 verlängerten Mörtel um 7 % höher als derjenige des Zementmörtels gewählt wurde, ist die Konsistenz nicht entsprechend plastischer gefunden worden. Ein 19 % höherer Wasserzusatz des hydraulischen Kalkmörtels verbessert die Verarbeitbarkeit gegenüber dem Zementmörtel lediglich um 6 %.

Der hydraulische Kalk vermittelt demnach dem verlängerten Zementmörtel im Mittel keine bessere Verarbeitbarkeit. Diese Feststellung steht im Widerspruch mit der verbreiteten Ansicht, dass hydr. Kalk die Verarbeitbarkeit verbessere, dagegen ist die Steigerung der Verarbeitbarkeit bei verlängertem Zementmörtel mit höherem

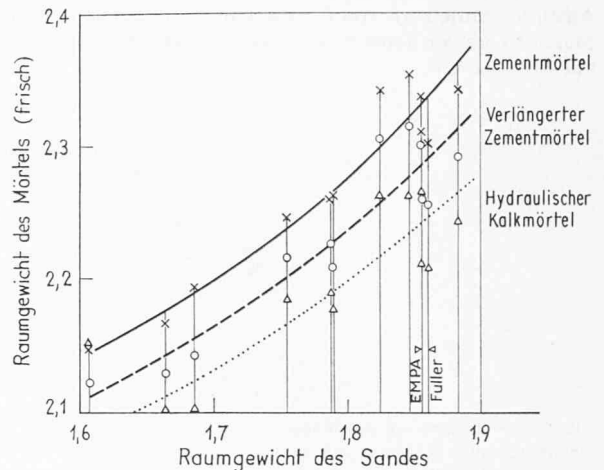


Bild 7. Zusammenhang zwischen dem Raumgewicht des Sandes und den Raumgewichten der damit hergestellten Mörtel

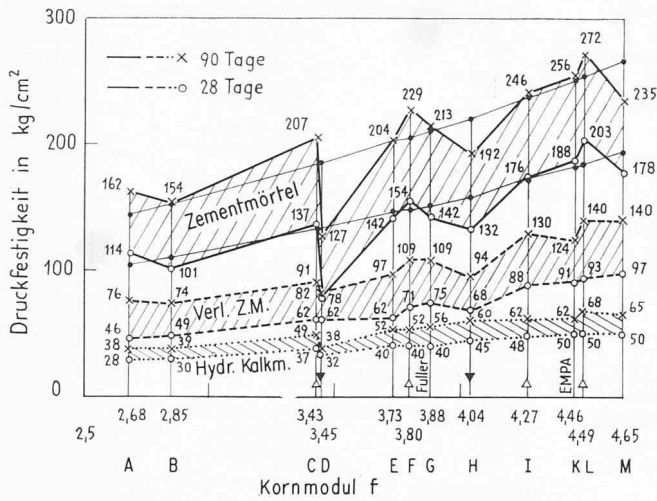


Bild 8. Würfeldruckfestigkeit der drei Mörtelarten im Alter von 28 und 90 Tagen, in Funktion des Kornmoduls aufgetragen

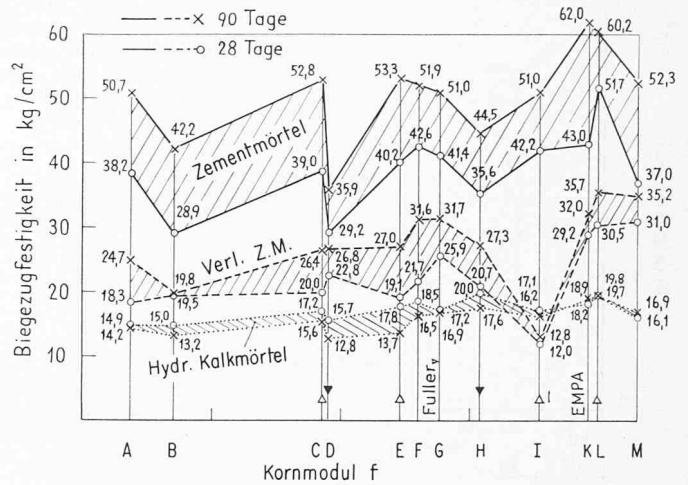


Bild 9. Biegezugfestigkeit der drei Mörtelarten in Abhängigkeit vom Kornmodul. Prismengröße 4 x 4 x 16 cm, Alter: 28 und 90 Tage

Kornmodul beträchtlich; der verlängerte Mörtel ist demnach bezüglich der Kornabstufung weniger empfindlich.

4. Raumgewichte der Mörtel

Mit den verschiedenen Mörteln, deren Zusammensetzung in Bild 6 in Funktion des Kornmoduls f dargestellt ist, wurden Prismen von der Grösse 4 x 4 x 16 cm hergestellt und daran nach Erhärtung in Raumlufte nach 28 und 90 Tagen die Biegezug- und Würfeldruckfestigkeit geprüft. Vor dem Einfüllen wurde das Raumgewicht des frischen Mörtels im Einliterhohlraum bestimmt.

In Bild 7 sind die Raumgewichte der Mörtel denjenigen der Sandmischung gegenübergestellt.

Auffallend ist das deutliche Abzeichnen des Raumgewichtes des Sandes im Raumgewicht der Mörtel. Der Zementmörtel hat das höchste Raumgewicht, kleiner ist dasjenige des verlängerten Mörtels und noch kleiner dasjenige des hydr. Kalkmörtels entsprechend dem spezifischen Gewicht und der Anteile der beiden Bindemittel Portlandzement und hydraulischer Kalk.

Offenbar werden die Hohlräume der Sandmischung nur teilweise mit dem Bindemittel gefüllt; der Bindemittelbrei umhüllt die Sandkörner, und ihre Bindung erfolgt vorzugsweise an den Berührungsfächen.

Ein hohlraumreicher Sand liefert einen entsprechend porösen Mörtel. Aus dem Raumgewicht des Sandes allein kann also eine wertvolle Aussage über die zu erwartende Mörtelporosität gemacht werden. Die Bestimmung des Raumgewichtes des trockenen Sandes vermittelt schon ein gutes Bild über seine Kornabstufung und ist ein sehr wertvolles und einfaches Hilfsmittel zur Beurteilung der granulometrischen Güte des Sandes.

Aus Bild 3 ist noch zu ersehen, dass mit zunehmendem Gehalt an hydr. Kalk die Hohlräume des Sandes sich weniger akzentuiert im Mörtel abzeichnen; bei diesen Mörteln füllen sich also die Hohlräume mehr mit Bindemittelbrei an als beim Zementmörtel.

5. Festigkeitseigenschaften

Das gleiche Bild vermitteln auch die Festigkeiten, Bilder 8 und 9. Während die Druck- und Biegezugfestigkeiten des Zementmörtels dem Raumgewicht des Sandes entsprechend verlaufen, zeigen die beiden Mörtel mit hydr. Kalk zur Hauptsache nur noch die grössten Raumgewichtsschwankungen an.

Aus den Bildern 8 und 9 sind noch folgende Zusammenhänge der einzelnen Gegebenheiten zu erkennen:

a) Vergleicht man die Mittelwerte der beiden feinsten Sandkörnungen A und B mit denjenigen der beiden grössten L und M, so ergibt sich folgendes Bild:

$$\left(\text{Festigkeitsverhältnis} \frac{L + M}{A + B} \right) :$$

Mörtelart	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit	
	28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage
I	1,77	1,60	1,33	1,21
II	2,00	1,87	1,59	1,59
III	1,72	1,72	1,20	1,34

Der Kornmodul f beeinflusst die Druckfestigkeit empfindlicher als die Biegezugfestigkeit. Eigenartigerweise werden die beiden Festigkeiten des verlängerten Zementmörtels stärker vom Kornmodul beeinflusst als die des Zementmörtels und des hydr. Kalkmörtels.

b) Die Biegezugfestigkeit des hydr. Kalkmörtels ist im Alter von 90 Tagen meist kleiner als nach 28 Tagen. Offenbar setzt die Wirkung der beim Austrocknen entstehenden Schwindspannungen die Biegezugfestigkeit herab.

c) Die Würfeldruckfestigkeit der Mörtel wächst mit steigendem B/W -Faktor und mit der Wurzel aus dem Kornmodul, wobei folgende Konstanten, die die Bindekraft der Bindemittel, die petrographische Beschaffenheit des Sandes und das Alter berücksichtigen, in die Rechnung einzuführen sind: $\beta_a = a \cdot \sqrt{f} \cdot B/W$

B = Bindemittelmenge in kg	W = Wassermenge in Liter
f = Kornmodul	B/W = Faktor, siehe Bild 10
a -Werte	28 Tage 90 Tage
Zementmörtel I:	65 90
verl. Zementmörtel II:	32 47,5
hydr. Kalkmörtel III:	16,5 22

d) Die aus der oben gegebenen Beziehung berechneten Werte werden von den Versuchswerten der Ausfallkörnungen C, F, I und L noch übertroffen. Dagegen haben sich die beiden Überschusskörnungen über eine wesentlich kleinere Druckfestigkeit ausgewiesen. Die Körnungen mit stetig gekrümmten Kurven A, E, G, und K weichen nur wenig von den Werten der oben gegebenen Beziehung ab.

e) Die Biegezugfestigkeit steigt nur geringfügig mit dem Kornmodul; auch diese wurde bei den Ausfallkörnungen und solchen mit stetigem Kornaufbau höher und bei den beiden Überschusskörnungen kleiner gefunden.

f) Werden die Ausfallkörnungen nach der Mittelkörnung des Ausfallbandes aufgetragen, Bild 11, so erkennt man, dass beim Fehlen von groben Fraktionen die Festigkeit abnimmt. Bei allen drei Mörtelarten

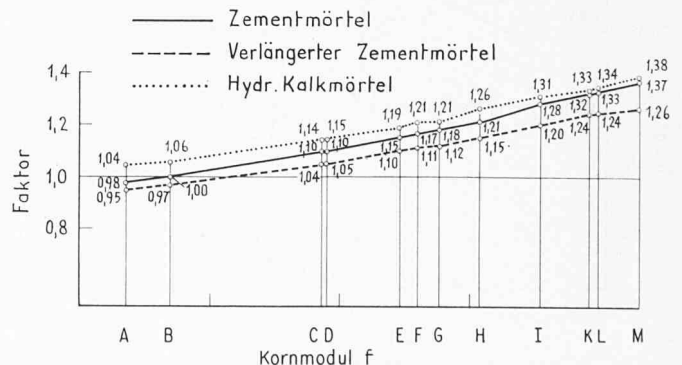


Bild 10. Bindemittel/Wasser-Faktor der drei Mörtelarten, aufgetragen in Funktion des Kornmoduls

II. Druckfestigkeiten von Mörteln mit verschiedenen Bindemitteln

Der Einfluss der Bindekraft der drei Bindemittel Weisskalk (WK), hydraulischer Kalk (HK) und Portlandzement (PC) in verschiedenen Mischungsverhältnissen im Mörtel 1:4 in Gewichtsteilen auf die Würfeldruckfestigkeit zeigt Bild 15. Die Bindemittelmenge war jedesmal die gleiche: ein Teil des Bindemittels (1) wurde durch einen gleich grossen Teil des zweiten Bindemittels (2) ersetzt.

Für die Herstellung der Mörtelprismen $4 \times 4 \times 16$ cm kam ein Bausand $0 \div 8$ mm aus der Grube Oberhard zur Verwendung; dessen Kornabstufung ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

Der Mörtel wurde mit so viel Wasser angemacht, dass er, von Auge beurteilt, die gleiche Plastizität aufwies.

Die Druckfestigkeitswerte der verschiedenen Bindemittelmischungen wurden aufgetragen und durch Kurven ausgeglichen. Diese ausgeglichenen Werte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die Druckfestigkeitszunahme der reinen Mörtel ist in Bild 15 zur Darstellung gelangt. Über die relative Druckfestigkeit, bezogen auf diejenige des Zementmörtels, orientiert Bild 16.

Der *hydraulische Kalkmörtel* hat im Vergleich mit dem Zementmörtel in jungem Alter, d. h. bis zu 10 Tagen, eine relativ geringe Druckfestigkeit (10%); diese erhöht sich im Alter von 180 Tagen auf 25%. Der Weisskalk hat eine relativ sehr kleine Druckfestigkeit zwischen 3 und 4%; die letztere wird erst im Alter von einem halben Jahr erreicht.

Die Erhärtungskurve der Mischung 1:1 (G.T.) von PC und HK liegt im jungen Alter unter dem Mittelwert der beiden reinen Mörtel; nähert sich jedoch mit zunehmendem Alter über den Mittelwert hinaus der Druckfestigkeit des Portlandzementmörtels, Bild 15. Die Druckfestigkeit des Mörtels aus gleichen Gewichtsteilen Portlandzement und Weisskalk liegt wesentlich unter dem Mittelwert der reinen Mörtel; mit zunehmendem Alter ist jedoch eine Annäherung an die Mittelkurve festzustellen (53% bei 3 Tagen auf 74% bei 180 Tagen; 100% = Mittelwert).

Tabelle 1: Kornabstufung des Sandes

Sieb mm	Rückstand Gewichts-%	Fraktion Gewichts-%
8	0	0
4	24,7	24,7
2	46,7	22,0
1	68,3	21,6
0,5	87,5	19,2
0,2	94,0	6,5
0,12	98,1	4,1
feiner		1,9
Kornmodul:	4,19	

Tabelle 2: Druckfestigkeiten (ausgeglichen) der Mörtel 1:4 in Gewichtsteilen mit verschiedenen einzelnen und gemischten Bindemitteln, in kg/cm^2

Bindemittel 1	Anteil von Bindemittel 2 in Prozent										Bindemittel 2	Alter in Tagen	
	1	10:1	6:1	4:1	2:1	1:1	1:2	1:4	1:6	1:10			1
	0%	9,1%	14,3%	20%	33,3%	50%	66,7%	80%	85,7%	90,9%	100%		
Portlandzement	204	196	180	164	126	89	53	30	24	19	12	hydr. Kalk	3
	290	276	262	247	200	143	84	51	41	35	25		7
	367	359	349	340	300	221	149	108	91	78	62		28
	439	431	420	409	363	292	211	157	138	121	100		90
	493	486	478	470	423	348	252	188	167	149	123		180
hydr. Kalk	12	11	9	9	9	9	9	9	8	8	8	Weisskalk	3
	25	21	18	17	17	17	13	11	9	9	9		7
	62	51	47	43	37	33	26	17	13	12	11		28
	100	83	74	66	55	47	32	19	15	13	12		90
	123	104	95	87	75	65	50	32	26	22	21		180
Weisskalk	8	10	12	15	28	56	101	152	172	191	204	Portlandzement	3
	9	11	13	18	34	72	135	214	251	276	290		7
	11	16	19	25	51	111	193	283	323	350	367		28
	12	17	23	31	74	162	260	348	385	413	439		90
	21	26	31	42	90	190	295	381	422	458	493		180

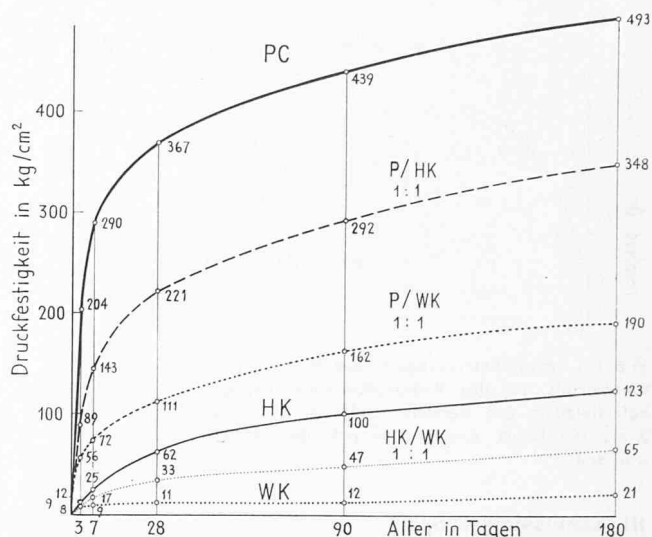


Bild 15. Würfeldruckfestigkeit des Zementmörtels, des hydraulischen Kalkmörtels und des Weisskalkmörtels sowie der Mischung der beiden Bindemittel zu gleichen Teilen (1:1 Gewichtsteile). Bindemittel/Sand-Verhältnis 1:4 in Gewichtsteilen, plastische Konsistenz, $4 \times 4 \times 16$ cm

Bei der Mischung von *Weisskalk mit hydr. Kalk* 1:1 beobachtet man ein ähnliches Verhalten wie beim Mörtel $\text{PC}/\text{HK} = 1:1$ (Gewichtsteile), Bild 15.

Besonderes Interesse erfahren die mit einem zweiten Bindemittel *verlängerten oder verbesserten Mörtel*.

1. Durch Zumischen von *Portlandzement* kann die Druckfestigkeit und auch die Zugfestigkeit *hydraulischer Kalkmörtel* vor allem im jungen Alter wesentlich erhöht werden. Bei zunehmendem Alter nimmt jedoch der Einfluss ab, doch ist die Festigkeitssteigerung noch immer beträchtlich, Bild 17.

2. Beim *Weisskalk* wird die Druckfestigkeit durch zunehmenden Ersatz eines Teiles des Weisskalkes durch *Portlandzement* wesentlich gesteigert. Nach 28 bzw. 90 Tagen ist jedoch die Druckfestigkeitssteigerung rückläufig, Bild 18.

3. Wird der *Portlandzement* zum Teil durch *Weisskalk* ersetzt, fällt die Druckfestigkeit; aber erst bei Zusätzen von Weisskalk über 10% ist mit einer stärkern Festigkeitseinbusse zu rechnen, Bild 19. Die relative Festigkeitszunahme mit dem Alter ist gering; erst bei grösserem Weisskalkzusatz über 20% hinaus ist mit fortschreitender Karbonatisierung des Kalkes eine relative Zunahme festzustellen.

4. Wird anstelle von Weisskalk dem *Portlandzement hydr. Kalk* zugesetzt, so ist die relative Verminderung der Druckfestigkeit kleiner und bei längerer Erhärtung sogar gering, Bild 20.

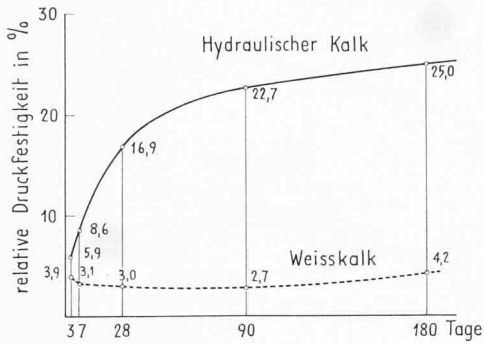


Bild 16. Würfeldruckfestigkeit des hydraulischen Kalkmörtels und des Weisskalkmörtels, bezogen auf diejenige des Zementmörtels im Alter von 3 bis 180 Tagen. Zusammensetzung des Mörtels wie Bild 15

III. Schlussfolgerungen

1. Das ebenso einfache wie wertvolle Verfahren der *Raumgewichtbestimmung des trockenen Sandes* gibt Aufschluss über die zu erwartende Porosität (Dichtigkeit), die Verarbeitbarkeit und die Festigkeitseigenschaften. Diese Bestimmung genügt, um über die Zweckmässigkeit der Kornabstufung eine weitgehende Aussage zu machen, und sie ermöglicht bei ihrer Anwendung auf der Baustelle, die Verwendung eines ungünstig gekörnten Sandes auszuschliessen. Selbstverständlich ist dabei ein allfällig höheres oder niedrigeres spezifisches Gewicht des Sandes ($\gamma \geq 2,65$) zu berücksichtigen.

Die Kornabstufung wirkt sich in der Verarbeitbarkeit, in der Dichtigkeit (Porosität und Kapillarität) und in den Festigkeitseigenschaften beim Portlandzementmörtel deutlich aus. Auch beim verlängerten Mörtel ist der Einfluss besonders bei den Festigkeiten nachweisbar, jedoch weniger ausgeprägt als beim Zementmörtel. Beim hydr. Kalkmörtel ist der Einfluss des Raumgewichtes des Sandes auf die Festigkeit nicht mehr beträchtlich. Bei der Verarbeitbarkeit und in der Dichtigkeit (Raumgewicht des Mörtels) zeigen alle drei Mörtelarten eine deutliche Abhängigkeit vom Raumgewicht des Sandes bzw. von seiner Kornzusammensetzung.

2. Die Versuche mit den *Ausfallkörnungen* haben zu folgenden Ergebnissen geführt:

- höheres Raumgewicht, d. h. weniger Hohlräume im Sand.
- höhere Raumgewichte der drei Mörtelarten.
- bessere Verarbeitbarkeit (grösseres Ausbreitmass).
- über dem Durchschnitt liegende, sogar bis höchste Druck- und Biegezugfestigkeiten.
- geringes Tropfensaugvermögen: Der Zementmörtel weist nur bei höherem Kornmodul ($f > 3,80$) auch kleineres kapillares Saugvermögen auf. Der verlängerte Zementmörtel und der hydr. Kalkmörtel haben durchwegs eine höhere kapillare Saugfähigkeit als der reichere Portlandzementmörtel bestimmen lassen.
- Je feiner das ausfallende Korn, desto höher die Festigkeit der drei Mörtelarten, wobei zu beachten ist, dass bei den höhern Kornmoduli (gröber) die feineren Faktoren in geringeren Mengen enthalten sind. Auch ist zu berücksichtigen, dass bei den gröbern Mörteln der Wasserzusatz zu klein gewählt wurde, weshalb die Verarbeitbarkeit (Ausbreitmass) auch entsprechend geringer gefunden wurde.

3. Einzelne in grösserer Menge im Sand enthaltene Kornfraktionen (*Überschusskorn*) wirken sich auf der ganzen Linie ungünstig aus: kleineres Raumgewicht des Sandes, d. h. mehr Hohlräume, die auch im Mörtel nicht mit dem Bindemittel gefüllt werden; der Mörtel wird porös und stark saugfähig.

Eine wesentlich geringere Verarbeitbarkeit verlangt mehr Anmachwasser zur Erreichung der notwendigen Verarbeitbarkeit, wodurch die Festigkeitseigenschaften noch stärker abfallen, da ja schon aus dem porösen Gefüge allein eine beträchtliche Festigkeitseinbusse resultiert. Diese Mörtel sind frostanfälliger und als Verputz bleiben sie nach Schlagregen längere Zeit nass.

Sande mit Überschusskorn sind für die Mörtelaufbereitung für jeden Verwendungszweck ungeeignet.

4. Sande mit stetig mit zunehmender Korngrösse wachsendem Kornanteil (*Fuller-, EMPA-Kurve*) liefern dichte, wenig saugende, gute Festigkeitseigenschaften aufweisende Mörtel. Infolge des höhern

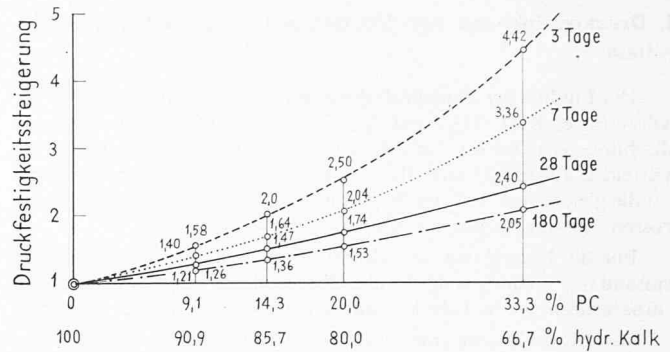


Bild 17. Würfeldruckfestigkeit des mit 66,7 bis 90,9 % hydraulischem Kalk verlängerten Zementmörtels, bezogen auf die Druckfestigkeit des hydraulischen Kalkmörtels. Alter: 3 bis 180 Tage

Gehaltes an Feinsand und an Staub (< 0,12 mm) der Fuller-Körnung ist die Verarbeitbarkeit dieses Mörtels wesentlich besser als bei der EMPA-Körnung, weshalb bei gleicher Konsistenz des Mörtels die Festigkeit der Mörtel mit beiden Sanden ungefähr gleich hoch ausfallen wird.

5. Sande mit kleinerem *Grösstkorn* (bis 4 mm), d. h. Körnungen mit kleinerem Kornmodul lassen porösere, gut verarbeitbare und kleinere Druck- und Biegezugfestigkeiten aufweisende Mörtel herstellen als Sande mit dem Maximal Korn von 8 mm.

6. Der nicht übermässige *Staubanteil* im Mörtel erhöht die Dichtigkeit und verbessert wesentlich die Verarbeitbarkeit. Auch die Festigkeitseigenschaften werden in der Regel erhöht.

7. Mit zunehmendem *Kornmodul* steigt das Raumgewicht, und die Porosität des Mörtels vermindert sich. Die Druckfestigkeit wird stärker beeinflusst als die Biegezugfestigkeit.

8. *Der Kornmodul hat praktisch keinen Einfluss auf den Wasserzusatz zur Erreichung gleicher Verarbeitbarkeit* (Schlagtisch). Da die Überschusskörnungen mehr Anmachwasser zur Erzielung gleicher Plastizität verlangen, werden die Festigkeiten noch kleiner als die festgestellten gefunden.

9. Die *Druckfestigkeit* des Mörtels ist proportional dem *Bindemittel/Wasser-Faktor*, während der *Kornmodul* diese nur proportional seiner Wurzel beeinflusst ($\beta_a = a \cdot B/W \cdot \sqrt{f}$).

10. Mit zunehmendem Raumgewicht des Sandes, mit wachsendem *B/W-Faktor* und mit grösserem Kornmodul nimmt die *Saugfähigkeit* der Mörtel ab.

11. Wird ein Mörtel mit einem *zweiten Bindemittel* verlängert oder verbessert, so tritt erst bei einem über 20%-igen Zusatz (20:80) eine gravierende Beeinflussung der Druckfestigkeit ein. Mit zunehmendem Alter, oft erst nach 28 bzw. 90tägiger Erhärtung nimmt der Einfluss

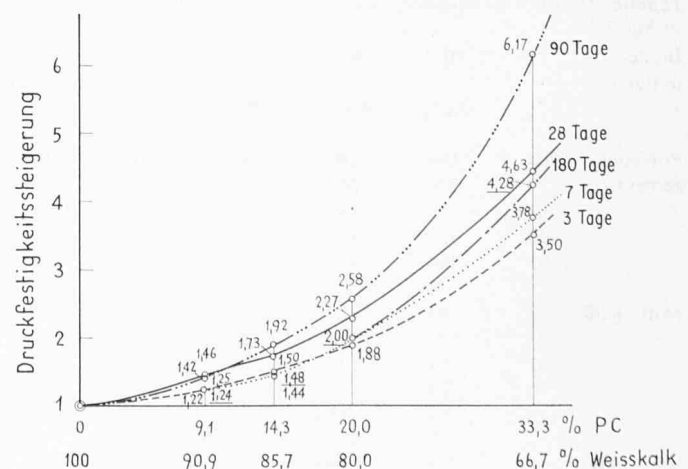


Bild 18. Würfeldruckfestigkeit des mit 66,7 bis 90,9 % Weisskalk verlängerten Portlandzementmörtels, bezogen auf die Druckfestigkeit des reinen Weisskalkmörtels im Alter von 3 bis 180 Tagen. Bindemittel/Sand 1:4 in Gewichtsteilen, plastische Konsistenz

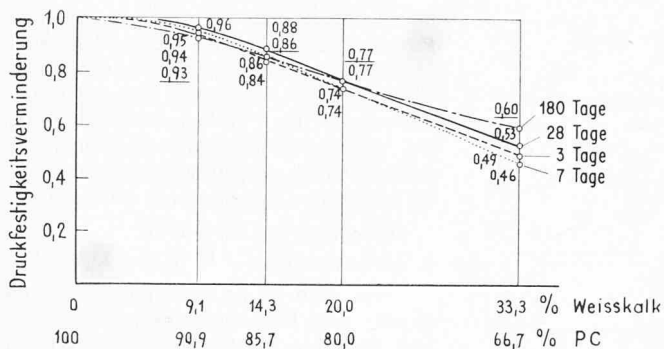


Bild 19. Würfeldruckfestigkeit des mit 9,1 bis 33,3 % Weisskalk verlängerten Portlandzementmörtels, bezogen auf diejenige des reinen Portlandzementmörtels im Alter von 3 bis 180 Tagen

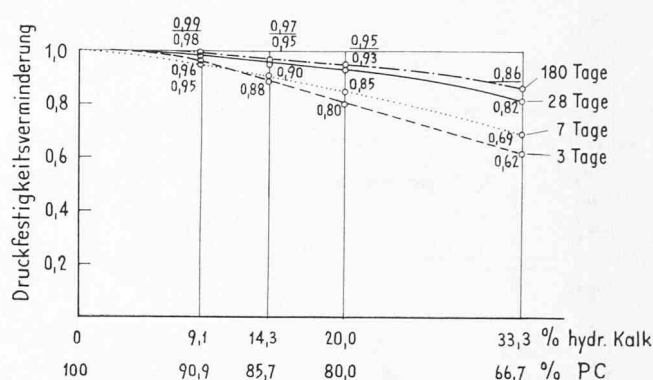


Bild 20. Würfeldruckfestigkeit des mit 9,1 bis 33,3 % hydraulischem Kalk verlängerten Portlandzementmörtels, bezogen auf diejenige des reinen Portlandzementmörtels im Alter von 3 bis 180 Tagen. Bindemittel/Sand 1:4 Gewichtsteile, Konsistenz: plastisch

des zweiten Bindemittels zu. Die Verbesserung von hydr. Kalk- oder Weisskalkmörtel durch Portlandzement ist erheblich grösser als die Verschlechterung von Portlandzementmörtel durch Zusatz von Weisskalk oder hydr. Kalk.

Für *Mauermörtel*, von denen eine höhere Druckfestigkeit und geringe Verformungsfähigkeit des erhärteten Mörtels verlangt werden, können *sauber gewaschene Rundsande mit stetigen oder Ausfallkörnungen* verwendet werden. Sande mit *Überschusskorn* sind dazu ungeeignet.

Beim Waschen wird mit dem Lehm auch der Steinstaub ausgewaschen. Mit solchen Sanden aufbereitete Mörtel sind porös, ungenügend verarbeitbar, übermässig Anmachwasser beanspruchend, saugfähig und weisen sich über geringere Festigkeitseigenschaften aus. Durch Zusetzen von Kalksteinmehl, etwa 5 % der Sandmenge, können diese Nachteile erfahrungsgemäss behoben werden.

Da sich in *Verputzmörteln* mit hoher Zugfestigkeit gut sichtbare Risse bilden, ist die Zugfestigkeit soweit im Rahmen zu halten, dass die Risse unsichtbar bleiben. Es wäre verfehlt, die geringe Zugfestigkeit mit einem unzuweckmässig gekörnten Sand zu erreichen zu suchen, weil die wesentlich grössere Porosität die Frostbeständigkeit herabsetzt und die Wasseraufnahmefähigkeit und das Wasserrückhaltevermögen erhöht. Nur durch die Verwendung eines Bindemittels mit geringer Bindekraft kann die Rissigkeit in Verputzen in zulässige Bahnen gelenkt werden.

Bei *wasserdichten Verputzen* ist die Verwendung eines zweckmässig gekörnten Sandes eine unabdingbare Forderung.

Adresse des Verfassers: *Paul Haller*, dipl. Bau-Ing. ETH, Sektionschef der EMPA, 8600 Dübendorf, Ueberlandstrasse 129.

Untersuchung einiger für die Praxis wichtiger Zement- und Mörtel Eigenschaften, die von den S.I.A.-Normen nicht erfasst werden

DK 666.94.001.4

Von **R. Joosting**, dipl. Ing., Abteilungsvorsteher der EMPA, Dübendorf

Durchführung der Versuche: B. Geiger

Neben den Zement- und Normenmörtel-Eigenschaften, für welche in den S.I.A.-Normen No. 115 (1953) «Normen für die Bindemittel des Bauwesens» Güterwerte vorgeschrieben sind, gibt es noch einige andere, die für die Praxis von Bedeutung sind. Dass diese Eigenschaften bisher nicht in die Normen aufgenommen wurden, ist darauf zurückzuführen, dass entweder die Grundlagen noch nicht genügend erforscht sind oder dass, sofern eine Prüfungsmethode besteht, der Aussagewert der Prüfungsergebnisse für die Praxis noch nicht mit Sicherheit abgeschätzt werden kann.

Nachfolgend werden die Ergebnisse einiger diese Eigenschaften betreffenden Untersuchungen, welche an der EMPA durchgeführt wurden, behandelt.

a) Lagerung der Normenprismen

Nach den S.I.A.-Normen Nr. 115 müssen die Normenmörtelprismen nach einer 24stündigen Lagerung im Modell an feuchter Luft von mindestens 95% relativer Luftfeuchtigkeit (r. F.) und +18 °C ausgeschalt und anschliessend bis zur Prüfung in Wasser von +18 °C gelagert werden. Es wird aber nur selten vorkommen, dass ein Mörtel oder Beton unter Wasser erhärten kann.

In Bild 1 ist die Festigkeitsentwicklung von Normenmörtelprismen bei verschiedener Lagerung dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die in Wasser gelagerten Prismen durchwegs die höchsten Druck- und Biegezugfestigkei-

ten aufweisen. Bei einer Lagerung an Luft von 90% r. F. nehmen die Festigkeiten etwas ab; dagegen ist bei einer Lagerung an Luft von 70% r. F. und 35% r. F. der Abfall der Festigkeiten beträchtlich. Das Verhältnis

zwischen der Festigkeit bei Wasserlagerung und derjenigen bei einer bestimmten Luftlagerung streut bei den verschiedenen Altersstufen ziemlich stark, so dass hierfür kein Wert angegeben werden kann. Dieses Ver-

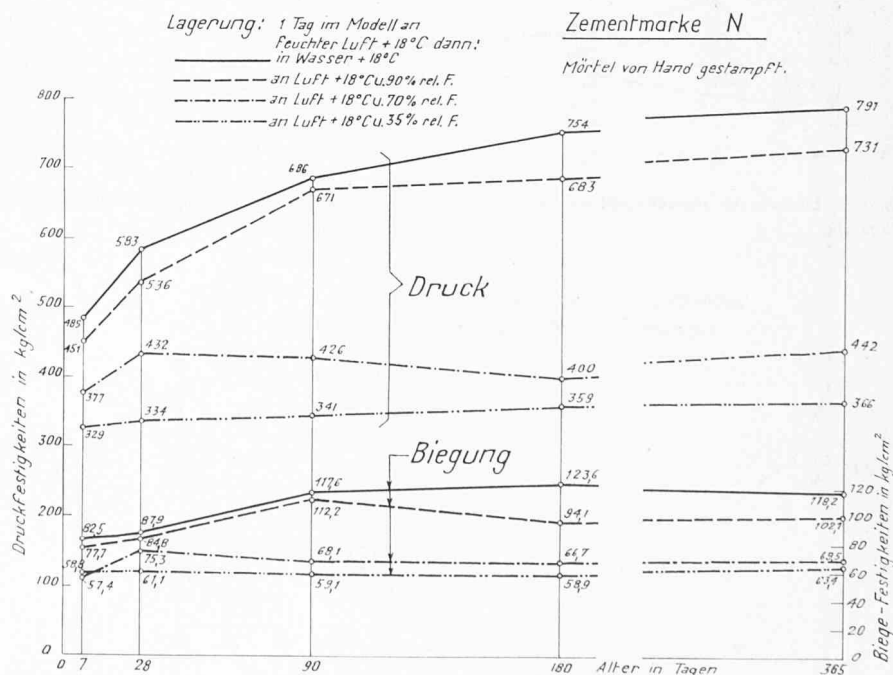


Bild 1. Festigkeit von Normenmörtelprismen bei verschiedener Lagerung