

Über die Eigenschaften von Zementpasten und -mörteln von sehr niedriger Porosität

On the properties of cement pastes and mortars of very low porosity

A propos des caractéristiques des pâtes et des mortiers de ciment à porosité très faible

Von A. Bajza, VI. Fraňo und J. Skalný, Slowakische Technische Hochschule, Bratislava/ČSSR

Zu den Verdichtungsverfahren, die in der technischen Praxis laufend verwendet werden, gehören vor allem Vibrieren, Pressen, Zentrifugieren, Absaugen usw., evtl. die Kombination dieser Methoden. Der Zweck dieser Verfahren ist die größtmögliche Verdichtung der bearbeiteten Masse.

Pressen als Verdichtungsverfahren wird in der Praxis selten und nur mit niedrigem Preßdruck angewandt. Die ersten Abhandlungen, die die Frage des Hochdruckpressens behandeln, wurden von Freyssinet^{1,2)}, L'Hermite, Valenta³⁾, L'Hermite^{4,5)} u. a., neuerdings von Kluz, Lecznar⁶⁾, Lecznar, Barnoff⁷⁾, Gaca^{8,9)} u. a. veröffentlicht. Aus den Arbeiten der angeführten Autoren und bekannten theoretischen Erkenntnissen^{10,11)} ergab sich, daß die Festigkeit des Betons außer anderem, wie z. B. Wasserzementfaktor, Qualität der Komponenten u. a., von seiner Dichte abhängt, wobei für Zementpasten und -mörtel Druckfestigkeiten bis über 2000 kp/cm² erreicht wurden. Powers erwähnte, daß Abrams eine Druckfestigkeit bis 2800 kp/cm² erreichte. Einige weitere Ergebnisse und Ansichten wurden beim V. Kongreß FIP in Paris vorgetragen¹²⁾.

Da Betone mit speziellen Eigenschaften eine immer größere Bedeutung erlangen, überprüfen wir die veröffentlichten Angaben und ergänzen sie durch neue Messungen physikalischer Größen.

Experimenteller Teil

Zu diesen Untersuchungen wurde Zement PC 450 mit 15% basischer Hochofenschlacke (Zement A) und Portlandzement PC 450 (Zement B) verwendet. Außer Zementpasten aus diesen Zementen wurden Zementmörtel aus einer Mischung von Zement A, Quarzsand und Flugasche eines Elektrizitätswerks, und zwar im Verhältnis 5:1, 3:1, 1:1, verwendet. Die Eigenschaften der angeführten Materialien sind in Tabelle 1 angegeben.

TABELLE 1
Analysen der Zemente und der Flugasche

	Zement A	Zement B	Flugasche
Unlöslicher Rückstand	3,94	1,14	—
SiO ₂	21,15	22,95	55,84
Fe ₂ O ₃	2,50	2,58	36,89
Al ₂ O ₃	6,33	5,29	36,89
CaO	56,07	60,49	2,45
MgO	4,21	3,25	1,01
SO ₃	2,33	2,07	1,25
Glühverlust	2,06	1,72	2,20

Die Probekörper wurden in einer Stahlform mit den Maßen $\phi = 7$ cm, $h = 7$ cm hergestellt; die Verdichtung erfolgte auf einer hydraulischen Presse. Zur Herstellung der Proben wurden ein Preßdruck von 600 bis 3000 kp/cm² und Wasserzementfaktoren w/c je nach Art und Zusammensetzung der Mischung mit den Grenzwerten 0,04 bis 0,36 verwendet.

Die gepreßten Proben wurden folgendermaßen behandelt:

1. 24 Std. an feucht. Luft + 2 Tage Wasserlager. bei 20 °C
2. 24 Std. an feucht. Luft + 6 Tage Wasserlager. bei 20 °C
3. 24 Std. an feucht. Luft + 27 Tage Wasserlager. bei 20 °C
4. 24 Std. an feucht. Luft + 59 Tage Wasserlager. bei 20 °C

5. 24 Std. an feucht. Luft + 18 Std. Dampfbedhl. bei 95 °C
6. 24 Std. an feucht. Luft + 24 Std. Autoklavbehandlung bei 206 bis 211 °C und 18 bis 20 atü.

Den Behandlungen 1 bis 5 wurden die Zementpasten, den Behandlungen 3 und 6 die Proben aus Zement-Sand- und Zement-Flugaschen-Mischungen unterworfen.

Dabei wurden folgende Eigenschaften beobachtet:

1. Druckfestigkeit,
2. Dichte,
3. Elastizitätsmodul,
4. Gehalt an gebundenem Wasser.

Der Elastizitätsmodul wurde mit Hilfe von Tensometern und Ultraschall ermittelt. Die so gewonnenen Werte wurden mit Hilfe von Huggenbergers Deformometer und dem Spiegelgerät nach Martens kontrolliert. Einige Proben wurden einer Querkzugfestigkeitsprüfung (brasilianische Prüfung), einer Volumenbeständigkeitsprüfung und einer thermo-analytischen Untersuchung unterzogen.

Ergebnisse und Diskussion

Auf Bild 1 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeit der Proben dargestellt. Die Proben wurden aus Zement A und B beim optimalen Wasserzementfaktor w_0/c für jeden einzelnen Preßdruck hergestellt. Hierbei hielten wir für den optimalen Wasserzementfaktor w_0/c das ex-

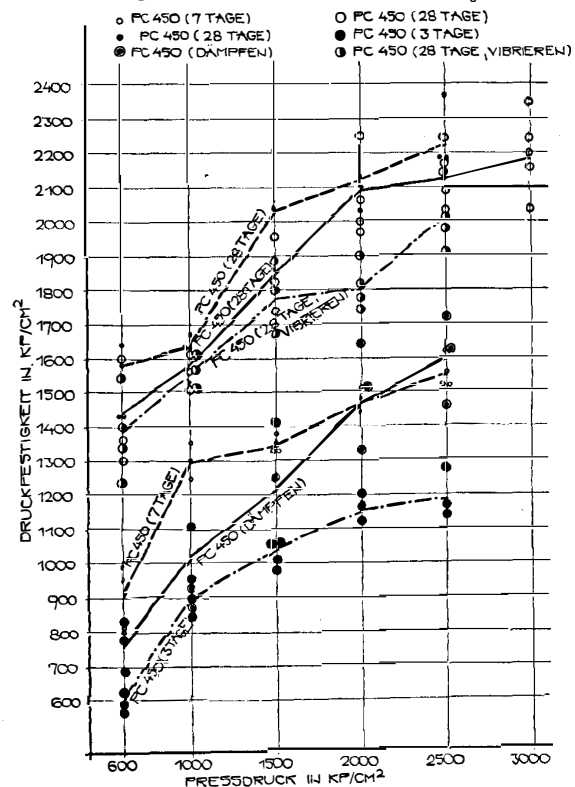


Bild 1: Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Preßdruck beim optimalen Wasserzementfaktor
Die Punkte ● gehören zu Zement B

perimentell gefundene Verhältnis w/c , bei dem es bei dem gegebenen Preßdruck noch nicht zum Herauspressen von Wasser aus der Paste kam.

Aus Bild 1 geht hervor, daß die Druckfestigkeit für alle angeführten Bearbeitungsarten und für verschiedene Zeitdauer der Behandlung der Proben mit dem Preßdruck wächst. An einer kleineren Anzahl von Proben, die wir 60 Tage unter Wasser lagerten, haben wir die von L'Hermite⁵⁾ beschriebene Erscheinung nicht beobachtet, wonach bei einer Vergrößerung des Preßdruckes über eine gewisse Grenze (1000 kp/cm²) die Festigkeit geringer wird.

Das Pressen der Proben bei gleichzeitigem Vibrieren mit einer Frequenz von ungefähr 7000 pro Minute erwies sich als nicht wirksam, und die erreichten Festigkeiten waren etwas niedriger als bei den gepreßten und nicht vibrierten Proben.

Ein gewisser Teil der Proben aus gepreßten Zementpasten (aus Zement A) wurde einer Dampfbehandlung unterzogen (Dämpfen). Aus dem Vergleich der Druckfestigkeitswerte mit und ohne Dampf behandelter Proben ist zu ersehen, daß durch Dampfbehandlung der gepreßten Proben Druckfestigkeiten erreicht wurden, deren Werte sich zwischen 55 bis 75% der 28tägigen Druckfestigkeiten gepreßter Zementpasten ohne Dampfbehandlung bewegen, mit anderen Worten, sie entsprachen ungefähr siebentägigen Festigkeiten. Zum Unterschied von nicht dampfbehandelten Proben, bei denen wir während der Behandlung keine Volumenveränderung feststellten, kam es bei den dampfbehandelten Proben zu einer gewissen Volumenvergrößerung.

Die Ergebnisse der Querkzugfestigkeitsprüfung zeigten, daß, ähnlich wie bei der Druckfestigkeit, auch die Querkzugfestigkeit durch Pressen wächst.

Die Dichte der durch Pressen von Zementpasten erzeugten Proben und die ihnen entsprechenden Druckfestigkeiten sind auf Bild 2 dargestellt. Wie man sieht, gilt für Zement A und B die direkte Abhängigkeit bei den angeführten Parametern, was mit den bekannten theoretischen Erkenntnissen übereinstimmt.

Tensometrische Messungen des Elastizitätsmoduls an gepreßten Zementpasten zeigten, daß die Werte des Elastizitätsmoduls sich in den Grenzen 4,0 bis 5,7 · 10⁵ kp/cm²

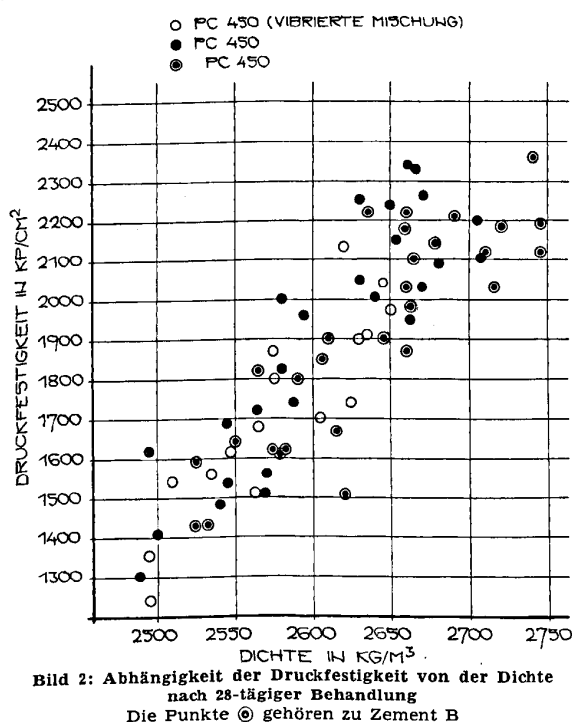


Bild 2: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Dichte nach 28-tägiger Behandlung
Die Punkte ⊙ gehören zu Zement B

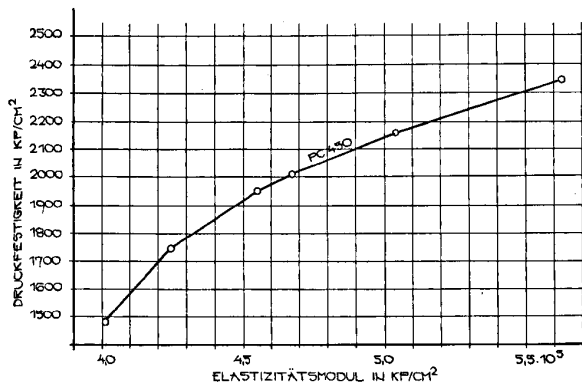


Bild 3: Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Druckfestigkeit

bewegen (Bild 3). Proben mit höheren Druckfestigkeiten (mittels höheren Preßdrucks erzeugt) hatten auch einen höheren Elastizitätsmodul.

Die mit Hilfe des Spiegelgerätes nach Martens und Ultraschall gewonnenen Werte sind durchschnittlich um 10% höher als die Werte, die durch tensometrische Messungen oder Messungen mit dem Huggenbergerschen Deformometer gewonnen wurden.

Ein Teil der Proben wurde einer thermischen Analyse unterzogen, um die Gesamtmenge des chemisch gebundenen Wassers und des Ca(OH)_2 -Gehalts in der hydratisierten gepreßten Zementpaste festzustellen. Die vorläufigen Ergebnisse zeigten, daß in dichteren Pasten die Menge des gebundenen Wassers geringer ist als in poröseren Pasten.

Beim Vergleich der von uns erreichten Ergebnisse und der Ergebnisse anderer Autoren⁶⁾ sahen wir, daß es in der Frage des optimalen Wasserzementfaktors w_0/c gewisse Unterschiede gibt. Zum Unterschied von den angeführten Autoren, die die höchste Festigkeit für einen jeden Preßdruck bei $w/c = 0,06$ fanden, zeigen unsere Ergebnisse, daß man maximale Festigkeiten bei verschiedenem Preßdruck bei den ihnen zugehörigen optimalen Wasserzementfaktoren w_0/c finden kann; diese sind nicht identisch und sinken bei wachsendem Preßdruck.

Bei den Querkzugfestigkeitsprüfungen wurde festgestellt, daß sie ungefähr ein Elftel bis ein Fünfzehntel der Druckfestigkeit erreichen. Der maximale Querkzugfestigkeitswert, den wir gemessen haben, war 180 kp/cm², was mit den Ergebnissen übereinstimmt, die C. D. Lawrence¹³⁾ erreicht hat. Ebenso stimmen auch die gefundenen Elastizitätsmoduln völlig mit den Ergebnissen von Lawrence überein, sie sind um vieles höher als die Werte, die Bäumelt und Augusta¹⁴⁾ erreicht haben.

Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Preßdruck für gepreßten Zement-Sandmörtel bei optimalem Wasserzementfaktor w_0/c und bei Wasserlagerung bzw. Autoklavbehandlung ist in den Bildern 4a und 4b dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß auch hier die Tendenz einer mit dem Preßdruck wachsenden Druckfestigkeit auftritt, wobei die Festigkeit mit wachsendem Sandgehalt sinkt. Bei einem Vergleich der Werte autoklavbehandelter und normal gelagerter Proben sieht man den negativen Einfluß der Autoklavbehandlung auf die Druckfestigkeit.

Ähnliche Ergebnisse wie in Bild 4 wurden auch bei gepreßten Zement-Flugasche-Mörteln erreicht. Der Elastizitätsmodul dieser Mörtel bewegte sich in Abhängigkeit vom Preßdruck zwischen 4,5 bis 5,2 · 10⁵ kp/cm².

Aus den erreichten Ergebnissen kann man folgende Schlüsse ziehen:

1. Für ein sonst identisches Material hängt der optimale Wasserzementfaktor w_0/c vom Preßdruck ab; dabei gilt die Abhängigkeit, daß bei wachsendem Preßdruck der optimale Wasserzementfaktor sinkt.

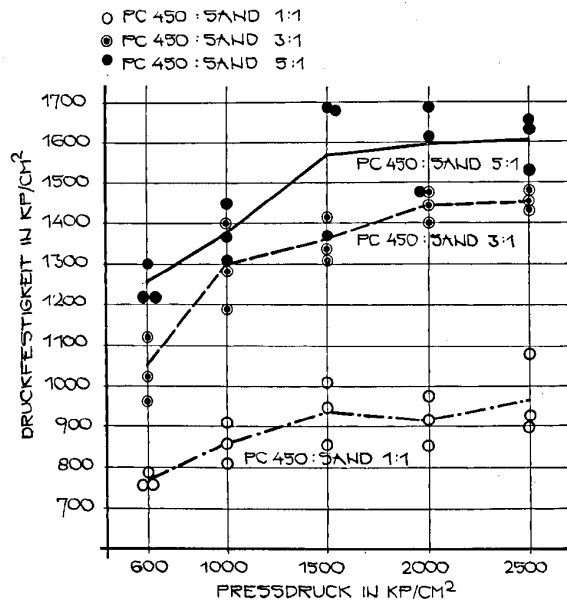


Bild 4a: Abhängigkeit der 28-Tage-Druckfestigkeit vom Preßdruck für Mischungen Zement-Sand-Wasser bei optimalem w_0/c

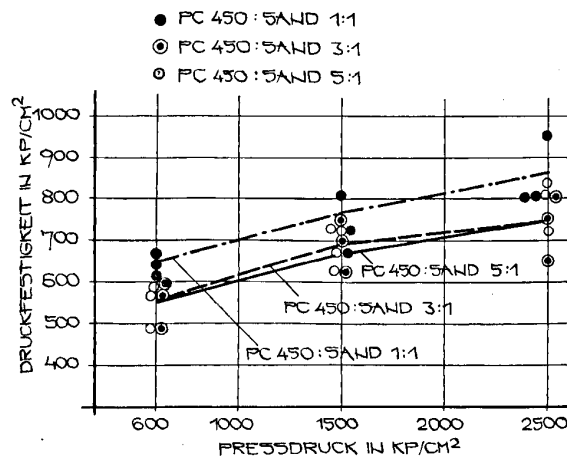


Bild 4b: Abhängigkeit der Druckfestigkeit im Autoklav behandelte Proben vom Preßdruck für Mischungen Zement-Sand-Wasser bei optimalem w_0/c

- Bei einem bestimmten Wasserzementfaktor w/c wächst die Festigkeit der Proben bis zu dem ihm zugehörigen optimalen Preßdruck.
- Dreitägige Druckfestigkeiten gepreßter Zementpasten erreichten ca. 55 %, siebentägige Festigkeiten ungefähr 75 % der 28tägigen Druckfestigkeiten. Mit Dampf behandelte Proben erreichten 55 bis 75 % von 28tägigen Festigkeiten normal gelagerter Proben.
- Die Festigkeit gepreßter Proben wächst mit ihrer Dichte, trotz der Tatsache, daß in solchen Proben der Gehalt an chemisch gebundenem Wasser kleiner ist.
- Die Querkzugfestigkeit für die einzelnen Proben erreicht ein Elftel bis ein Fünfzehntel der entsprechenden Druckfestigkeit.
- Der Elastizitätsmodul der gepreßten Proben bewegt sich in den Grenzen $4,0$ bis $5,7 \cdot 10^5$ kp/cm².
- Die Wärmebehandlung von Zementpasten, Zement-Sand- und Zement-Flugasche-Mörteln erwies sich nach der von uns gewählten Behandlung als nicht wirksam.
- Pressen der Proben bei gleichzeitigem Vibrieren mit einer Frequenz von 7000 pro Minute brachte keine positiven Ergebnisse.

Die Autoren danken ihrem Kollegen B. Dura für seine Mitarbeit.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden einige physikalische Eigenschaften von Zementpasten und Mörteln von sehr geringer Porosität, die durch Hochdruckpressen erzeugt wurden, beobachtet. Es wird eine Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Wasserzementfaktor und vom Preßdruck festgestellt. Die Ergebnisse wurden durch Messungen des Elastizitätsmoduls, der Querkzugfestigkeit, Dichte, Volumenbeständigkeit und Menge des gebundenen Wassers erzielt. Die Feststellungen wurden mit den Ergebnissen anderer Autoren verglichen.

Summary

In this article some observations relating to physical properties of cement pastes and mortars of very low porosity, which were produced by means of high-pressure presses, are reported. A relationship between the compressive strength, the water/cement ratio and the pressure applied is established. The results were obtained from measurements of the modulus of elasticity, the transverse tensile strength, the density, the volume stability, and the quantity of combined water. The results were compared with those reported by other authors.

Résumé

Dans le présent travail, les auteurs ont soumis à l'observation certaines caractéristiques physiques de pâtes et de mortiers de ciment ayant été réalisés par pressage haute pression. Ils ont pu constater une relation entre la résistance à la compression et le facteur eau/ciment ainsi que la pression de serrage. Ces résultats ont été obtenus grâce à des mesures du module d'élasticité, de la résistance à la traction transversale, de la densité, de la stabilité de volume et de la quantité d'eau combinée. Ces constatations ont été comparées aux résultats d'autres auteurs.

Schrifttum

- Freyssinet, M. E.: Developments in concrete making. Concrete and Construction Engineering, Vol. 21 (1936), 207.
- Freyssinet, M. E.: High-early-strength concrete with portland cement. Cement and Concrete Manufacture, Vol. 9 (1936), 71.
- L' Hermite, M. R., und Valenta, M.: Recherche concernant l'influence de la pression sur la prise des ciments. Inst. tech. Batiment et Trav. Publ. Ann. 2, Nr. 6 (1937), 23.
- L' Hermite, M. R.: Recherches concernant l'influence des facteurs mécaniques sur la prise des ciments et l'agglomération des poudres minérales. International Association for Testing Materials, Congress London (1937), 332.
- L' Hermite, M. R.: Bétons et ciments. Bois, Paris 1940.
- Kluz, T., und Lecznar, F.: Zjawiska fizyczne w prasowanym betonie. Inżynieria i budownictwo (1960), 204.
- Lecznar, F. J., und Barnoff, R. M.: Strength of neat cement pastes molded under pressure. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 32, Nr. 8 (1961) (Proceedings V. 57).
- Gaca, W.: Prasowanie zaczynów cementowych i perspektywy wykorzystania tej metody do określania jakości cementów. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr. 25, Budownictwo Lądowe, Zeszyt IV, Gdańsk 1961.
- Gaca, W.: Szybkościowe określanie marki cementów metoda prasowania. Cement-Wapno-Gips (1963), 141.
- Powers, T. C., und Brownyard, T. L.: Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. Proc. ACI, Vol. 41 (1946/47), 101, 249, 469, 549, 669, 845, 933.
- Philleo, R. E.: The origin of strength of concrete. Special Report 90, Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, Highway Research Board, Publication 1389, Washington, D. C. (1966), 175.
- Fédération Internationale de la Précontrainte. Report of the FIP Commission on methods of achieving high-strength concrete. Proceedings of the Fifth Congress of the FIP, Paris 1966, London 1966, 187.
- Lawrence, C. D.: Private Informationen. Cement and Concrete Association, London 1967.
- Bäumelt, F., und Augusta, I.: Private Informationen (aus den Arbeiten PSZ-PPU), Prag 1964.