

# Mikrohärteprüfung von Beton

Von Vladislav Kadleček und Jiří Dohnálek, Prag \*)

## Übersicht

*Die derzeit überwiegend angewendeten Methoden zur Untersuchung der Mikrostruktur von Beton können durch die bisher vorwiegend in der Metallographie und Mineralogie verwendete Mikrohärteprüfung zweckmäßig ergänzt werden. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, die Härte des zu untersuchenden Materials in sehr nahe beieinander liegenden Mikrobereichen feststellen zu können; ihr Nachteil ist der zur Zeit noch ziemlich große Arbeitsaufwand für jeden einzelnen Wert der Mikrohärte.*

*Die vorliegenden Untersuchungen über die Mikrohärte von Beton, bei denen eine genau definierte und reproduzierbare Prüfmethodik angewendet wurde, hat zu einer erweiterten Anwendung dieser Methode geführt. Die Untersuchungen bestätigen zunächst die enge Beziehung zwischen der Mikrohärte und den Grundeigenschaften von Beton, nämlich seiner Druckfestigkeit, Porosität und seinem Wasserzementwert. Sie deuten ferner weitere Verwendungsmöglichkeiten dieser Methode bei der Untersuchung der Qualität der Kontaktzone zwischen einer der drei verwendeten Gesteinsarten (Basalt, Kalkstein oder Quarz) und dem Zementstein an sowie auch bei Vorgängen, bei denen es infolge von äußeren Kräften oder durch Einwirkung eines aggressiven Milieus zu einer Schädigung der Betonstruktur kommt.*

*Die Ergebnisse zeigen, daß die Methode der Mikrohärteprüfung neue Möglichkeiten bei der Untersuchung der Bildung oder der Schädigung der Betonstruktur bietet.*

## 1. Allgemeines

Die Verbesserung und planmäßige Beherrschung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Beton hängt in großem Maß von der gründlichen Kenntnis seiner Mikrostruktur ab. Zur Lösung dieser Frage kann die Methode der Mikrohärteprüfung wirksam herangezogen werden.

---

\*) Durch Vermittlung und mit Unterstützung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes DAAD waren V. Kadleček 1969 und J. Dohnálek 1982 für jeweils mehrere Monate im Forschungsinstitut der Zementindustrie wissenschaftlich tätig.

Die Bestimmung der Eindringhärte von Materialien durch die Verwendung von sehr kleinen Prüflasten, die sog. Mikrohärt, hat seit der ersten Verwendung dieser Methodik in den dreißiger Jahren eine weite Anwendung in vielen Wissenschaftsbereichen gefunden [1]. Sie wird vor allem zur Prüfung von Metallen und Legierungen und in der Mineralogie gebraucht, findet jedoch ihre Anwendung auch in der Untersuchung der strukturellen und mechanischen Eigenschaften von Gläsern, Keramik, Plasten oder Halbleitern, siehe u. a. [2]. Die Methode wurde später auch zur Untersuchung der Eigenschaften von Zementstein herangezogen. Ihre Empfindlichkeit gegenüber z. B. den Änderungen des Elastizitätsmoduls des Zementsteins [3], seiner Porosität [4] und des Wasserzementwerts [5] hat sich bereits bestätigt; die Mikrohärtprüfung wurde auch als Komplementärmethodik zur Charakterisierung seiner Mikrostruktur verwendet, siehe [6, 7, 8].

Die Prüfung der Mikrohärt unterscheidet sich von der der Makrohärt insbesondere durch die verwendeten Prüflasten. Üblicherweise wird die folgende Einstufung verwendet:

- 1) Mikrohärt (microhardness, microdureté) – sie wird mit einer Prüflast unterhalb von 2000 mN bestimmt,
- 2) Kleinhärte (low-load hardness, dureté à charge réduite) – die Prüflast liegt im Bereich 2000 mN bis 20 N,
- 3) Makrohärt (macrohardness, macrodureté) – sie wird mit Prüflasten zwischen 20 N und 300 N gemessen.

Das Prinzip der Methode besteht im Eindrücken eines aus Diamant gefertigten Eindringkörpers vorgeschriebener Form mit der Prüflast  $P$  senkrecht in die geprüfte Oberfläche. Nach der Entlastung wird das Ausmaß des ausgebildeten Eindruckes gemessen. Die Mikrohärt  $HM$  ist dann durch das Verhältnis der Last  $P$  zur Oberfläche des Eindruckes bestimmt. Bei dem Entwurf des Prüfverfahrens müssen in allen Fällen vier folgende Grundfaktoren berücksichtigt werden, die in einem größeren oder kleineren Maß in der Lage sind, die Genauigkeit und die Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse zu beeinflussen:

- 1) Der Typ des verwendeten Gerätes. Die Nutzqualität des Gerätes wird überwiegend vom Maß der Automatisierung der einzelnen bei der Messung stattfindenden Vorgänge bestimmt [9]. Bei kommerziell hergestellten Instrumenten wird zwar die Belastung in einer automatisierten Arbeitsweise durchgeführt, die Mikrohärtprüfgeräte sind jedoch im allgemeinen noch nicht durch eine Vorrichtung zur automatischen Registrierung der ausgebildeten Eindrücke ausgestattet. Die eigentliche Ausmessung des Eindruckes wird daher in den meisten Fällen mit einem optischen Mikroskop durchgeführt, welches einen Bestandteil des Mikrohärtprüfgerätes bildet. Dadurch wird jedoch der Arbeits- und Zeitaufwand der Messung erheblich vergrößert und gleichzeitig ihre Genauigkeit beeinflusst.
- 2) Die Form des aus Diamant gefertigten Eindringkörpers. Gegenwärtig werden Mikrohärtprüfungen nach der Vickersschen Methode durchgeführt, d. h. mit einem Diamanten in der Form einer quadratischen Pyramide, deren Flächen an der Spitze einen Winkel von  $136^\circ$  bilden. Zu weiteren Typen gehören z. B. die Eindringkörper

Bild 1  
Einige Formen  
der Eindringkörper



nach Knoop, nach Berkovič und nach Stern und Grodzinski (siehe Bild 1).

3) Die Vorbereitung der Proben vor der Messung. Eine Grundbedingung für die Mikrohärteprüfung stellt eine ebene und glatte Oberfläche des untersuchten Materials dar. Gleichzeitig muß jedoch die mechanische Anstrengung der Oberflächenschichten möglichst niedrig sein. Diese kontroversen Forderungen zeigen, daß die Vorbereitung der Proben hoher Qualität eine der anspruchsvollsten Phasen der ganzen Arbeit darstellt.

4) Das Prüf- und Auswertungsverfahren. Die Prüfung und auch ihre Auswertung müssen in einer Weise durchgeführt werden, die eine gute Reproduzierbarkeit der einzelnen Schritte gestattet [10, 11]. Meßfehler können vorwiegend auf Grund folgender Ursachen entstehen:

- große und ungleiche Geschwindigkeiten beim Senken des Eindringkörpers,
- kurze Belastungszeiten bei der Eindruckbildung,
- starke Vibrationen, die von der Umgebung aus auf den Eindringkörper übertragen werden,
- Fehler, die bei der optischen Ausmessung entstehen,
- fehlerhafte Form und Eindringrichtung des Eindringkörpers,
- mangelhafte Qualität der Probenoberflächen,
- ungleiche Feuchtigkeit der untersuchten Proben,
- ungleiche Rückfederung desindrucks bei elastisch-plastischen Materialien.

## 2. Problematik der Mikrohärteprüfung von Beton

Beim Beton bzw. bei Zementmörteln konzentriert sich die Untersuchung üblicherweise auf die Mikrohärteprüfung vom Zementstein, welcher der Regel nach den Hauptträger ihrer physikalisch-mechanischen Eigenschaften darstellt.

Vom Gesichtspunkt der Härtebestimmung bildet der Zementstein ein sehr kompliziertes System. Die durch Hydratation entstandenen Produkte bestehen aus verschiedenen Phasen von gelartigem wie

auch kristallinem Charakter. Außerdem enthält der Zementstein auch Reste der unhydratisierten Zementkörner, welche verschiedene Klinkerminerale enthalten. Darüber hinaus ist hier ein kompliziertes Porensystem vorhanden mit Porengrößen im Bereich zwischen einigen Nanometern und einigen Millimetern.

Mit Rücksicht auf die extreme Heterogenität des Zementsteins muß die Mikrohärtprüfung in diesem Fall – im Gegensatz z.B. zu den Metallen – einen eindeutig statistischen Charakter haben. Das bedeutet, daß ein Mikrohärtewert, der die komplexe Härte des untersuchten Mikrovolumens des Zementsteins charakterisieren soll, durch Bearbeitung einer größeren Anzahl von Teilmessungen ausgedrückt werden muß. Zur Charakterisierung der Mikrohärt können dann nicht nur der Mittelwert, sondern es müssen weitere Kennwerte herangezogen werden, wie die mittlere Abweichung und der Variationskoeffizient der Meßdatenfolge. Die Frequenzfunktion dieser statistischen Datenfolge hängt vor allem von der Menge und dem Ausmaß der einzelnen Strukturkomponenten mit unterschiedlichen Härten, von der Eindrucksgröße, d. h. von der Prüflast, und von der Anzahl der Daten ab.

Die optimale Größe der Prüflast bewegt sich beim Zementstein zwischen 200 und 1000 mN, was den in der Mineralogie für weiche bis sehr weiche Minerale empfohlenen Werten entspricht. Entsprechend der Möglichkeit, daß die Mikrohärt von Zementstein infolge der Veränderlichkeit vieler Faktoren innerhalb von breiten Grenzen schwanken kann – zwischen 150 und 1500 MPa, d. h. 15 und 150 kp/mm<sup>2</sup> – kann auch die Diagonale des Eindrucks zwischen 10 und 70 µm schwanken. Die Prüflast wird üblicherweise so gewählt, daß die Diagonale des Eindrucks 20 bis 40 µm beträgt [12].

In Bild 2 ist die Analyse der Mikrohärtprüfung eines idealisierten Zweikomponentenmaterials dargestellt, in welchem der härtere Bestandteil weniger als 50 % und der weichere mehr als 50 % der Gesamtmenge ausmacht. Bei einem großen Eindruck werden bis zu einer gewissen Größe die weichen und auch die harten Komponenten erfaßt, und zwar annähernd immer im gleichen Verhältnis. Der Mittelwert der Härte wird konstant sein und wird vom relativen Gehalt beider Komponenten bestimmt sein (siehe Bild 2 a). Verringert sich die Größe des Eindruckes, so wird einmal eine größere, ein anderes

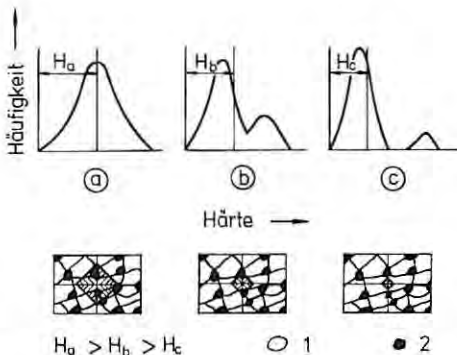


Bild 2  
Beispiel der Analyse  
der Mikrohärtprüfung  
eines idealisierten  
Zweikomponenten-  
materials  
1 – weiche Kompo-  
nente, 2 – harte Kom-  
ponente

Mal eine kleinere Anzahl von weichen Partikeln erfaßt. Bei der Untersuchung der Häufigkeit der einzelnen gemessenen Härtewerte erhalten wir eine Kurve mit zwei Maxima (siehe Bild 2 b). Bei einer noch kleineren Eindrucksgröße erscheinen zwei getrennte Häufigkeitskurven, die den Härten einerseits der weichen, andererseits der harten Komponente entsprechen (siehe Bild 2 c). Eine ähnliche, wenn auch weit kompliziertere Situation besteht bei der Mikro Härteprüfung von Zementstein. Die Anzahl der Teilmessungen sowie die Eindrucksgrößen müssen je nach den vorliegenden Bedingungen so gewählt werden, daß die Datenfolge der Teilergebnisse die komplexe Härte der untersuchten Probe repräsentiert.

Eine für die Mikro Härteprüfung geeignete Betonprobe sollte ein Anschliff hoher Qualität sein, der hohen Ansprüchen auf Ebenheit genügen und ein vernachlässigbares Relief zwischen den Phasen verschiedener Härte aufweisen sollte. Das Problem der Vorbereitung einer solchen Probe besteht darin, daß diese nicht durch eine Imprägnierung verfestigt werden darf, da die Porosität des Zementsteins ein wichtiger Faktor ist, der seine physikalisch-mechanischen Eigenschaften in bedeutender Weise beeinflusst. Dies verursacht natürlich viele Schwierigkeiten, besonders bei dem Polieren der Probe. Das unverfestigte Material fängt z. B. die Schleifmittelkörner auf, die dann nicht mit Wasser ausgewaschen werden können. Beim Polieren dringen dann diese Partikel in die Polierplatte ein und beschädigen die polierte Oberfläche. Aus diesem Grund modifizierten wir in unseren Versuchen die Vorbereitung der Proben, indem wir auf ein Polieren der Proben verzichteten.

### 3. Versuchsdurchführung

Bei der Mikro Härteprüfung von Beton wurde in den weiter angeführten Beispielen ein einheitliches Prüfverfahren verwendet. Betonproben, einige  $\text{cm}^2$  groß und 3 bis 5 mm dick, wurden aus größeren Probekörpern mit einer Diamantkreissägescheibe ausgeschnitten. Auf die Oberfläche der ausgeschnittenen Proben wurde unter Vakuum (Druck  $225 \cdot 10^{-8}$  Pa) eine einige Mikrometer dicke Metallschicht aus Aluminium bzw. Platin oder Iridium aufgedampft. Das ist praktisch das gleiche Verfahren, wie es zur Herstellung von Abdrucken zur Untersuchung der Zementsteinstrukturen mit einem klassischen Elektronenmikroskop verwendet wird. Die in solcher Weise aufgetragene Mikroschicht ermöglicht die Ausbildung von kontrastreichen Eindrucken. Gleichzeitig vermindert sich das Spiegeln der untersuchten Oberfläche, und teilweise wird auch Feuchtigkeit aus den Proben beseitigt, womit der Hydratationsvorgang praktisch augenblicklich zum Stillstand gebracht wird. Vergleichsmessungen haben gezeigt, daß die metallische Mikroschicht keinen Einfluß auf die Werte der Mikro Härte ausübt. Vor der Messung wurden die Proben in einem Exsikkator über Calciumchlorid  $\text{CaCl}_2$  angebracht.

Das dargestellte Verfahren zur Probenvorbereitung ist gut reproduzierbar. Die vollkommene Einheitlichkeit der Vorbereitung aller Proben ist die grundlegende Voraussetzung für die Erzielung objektiver Ergebnisse. In diesem Fall ist z. B. auch die mechanische Beeinflussung der Proben beim Schneiden gleichartig und übt daher

keinen negativen Einfluß auf die gegenseitige Vergleichbarkeit der Meßergebnisse aus.

Die vorbereiteten Proben wurden mit dem Mikrohärteprüfgerät PMT 3 (UdSSR) mit einem speziellen Zusatzgerät untersucht. Dieses Zusatzgerät ermöglichte eine Automatisierung des Belastungsvorganges bei der Eindruckbildung. Am Belastungsmechanismus dieses Gerätes ist der pyramidenförmige Eindringkörper nach Vickers angebracht. Die Größe des Eindrucks wird im Blickfeld eines speziellen Mikroskops durch Anlegen eines Fadenkreuzes an beide Seiten des Eindrucks ausgemessen.

Bei den Messungen wurde der folgende Verfahrenszyklus eingehalten: das Senken wie das Heben des Eindringkörpers dauerte je 20 Sekunden, die Belastungszeit betrug 10 Sekunden. Der ganze Zyklus wurde durch einen 10 Sekunden langen Leergang ergänzt, der vor jedem neuen Senken des Eindringkörpers eingeschaltet war. Während dieses Leerganges wurde nach der Eindruckbildung das Zusatzgerät abgeschaltet, und die Probe wurde durch Drehung des Probetisches unter das Mikroskop gebracht. Die Diagonale des Eindruckes wurde jeweils zweimal ausgemessen. Die verwendete Prüflast  $P$  betrug in allen Fällen 200 mN.

Mit Rücksicht auf die Heterogenität des Zementsteins wurden für die Berechnung von jedem Mikrohärtemittelwert 30 bis 100 Einzelmessungen vorgenommen. Zur Durchführung von 50 Messungen waren mit dem verwendeten halbautomatischen Gerät 90 bis 120 Minuten sehr konzentrierter Arbeit nötig.

Die Berechnung der Mikrohärtewerte  $HM$  erfolgte nach der Formel

$$HM = \frac{1,8544 \cdot P}{d^2},$$

wobei  $P$  die Prüflast,  $d$  die Diagonallänge des quadratförmigen Vickersschen Eindruckes darstellen (siehe Bild 3).

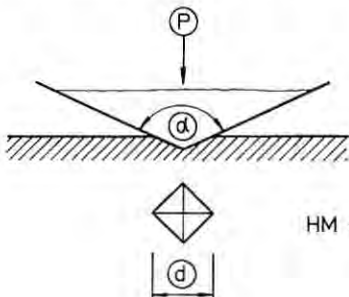


Bild 3  
Schematische  
Darstellung des  
Mikrohärteeindrucks  
nach Vickers

#### 4. Beziehung zwischen der Mikrohärte und der Druckfestigkeit des Betons

Die entscheidende Frage bei der Verwendung der Mikrohärteprüfung in der Untersuchung von Beton ist die der Beziehung des ermittelten Parameters, d. h. der Mikrohärte, zu einigen bedeutenden physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Betons. Dies betrifft

im Prinzip auch allgemeine Probleme der Beziehung zwischen der Mikro- und Makrostruktur von Beton.

Die erste Versuchsreihe hatte daher zum Ziel, das Maß der statistischen Abhängigkeit der Mikrohärtة von der Druckfestigkeit des Betons und die Beziehung der Mikrohärtة zum Wasserzementwert bzw. zur kapillaren Porosität des Betons zu untersuchen.

#### 4.1 Versuche

Es wurden fünf verschiedene Betonmischungen aus Portlandzement PZ 325, welcher annähernd einem PZ 35 F der Fassung November 1978 von DIN 1164 entspricht, entworfen, die bei deutlich unterschiedlichen Druckfestigkeiten ungefähr das gleiche Volumen des Zementleims aufweisen. Als Zuschlag wurden Flußkies der Korngruppen 8/16 mm und 4/8 mm sowie Flußsand 0/4 mm verwendet. Die resultierende Kornzusammensetzungskurve lag zwischen den Regelsieblinien A und B nach DIN 1045. Die mit dem Vebe-Gerät bestimmte Verarbeitbarkeit der einzelnen Mischungen bewegte sich in engen Grenzen (siehe Tafel 1).

In jeder Serie wurden drei Sätze von Würfeln mit der Kantenlänge 20 cm und drei Sätze von solchen mit der Kantenlänge 10 cm betoniert, die am Vibrationstisch die zur optimalen Verdichtung der Mischung notwendige Zeit lang verdichtet wurden. Nach dem Entschalen wurden alle Probekörper einen Tag lang unter feuchten Tüchern gelagert. Nachher wurden sie 20 Tage lang in 20 °C warmem Wasser gelagert. Schließlich wurden alle Probekörper bis zur Untersuchung bzw. bis zum Ausschneiden der Proben für die Mikrohärtةprüfung an Luft mit relativer Feuchtigkeit von 65 % bei 20 °C gelagert.

Die Druckfestigkeit wurde mit der 5000 kN Druckprüfmaschine gemessen. Aus jeder Serie wurden neun 20-cm-Würfel und sechs 10-cm-Würfel im Prüfalter von 28 Tagen untersucht. Außerdem wurde mit einem Satz von 20-cm-Würfeln die Druckfestigkeit nach einem zerstörungsfreien Verfahren mit dem Rückprallhammer von Schmidt vom Typ N gemessen. Die kapillare Porosität, d. h. die Anzahl und die Verteilung der Poren nach ihren Radien im Bereich von 7,5 bis 7500 µm, wurde mit der Methode der Quecksilberporosime-

Tafel 1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Betonserie	Zement kg/m <sup>3</sup>	Wasser l/m <sup>3</sup>	Flußsand 0/4 mm kg/m <sup>3</sup>	Flußkies 4/16 mm kg/m <sup>3</sup>	Theoret. Frischbeton- rohddichte kg/m <sup>3</sup>	w/z-Wert	Verarbeit- barkeit nach Vebe s
1	290	188,5	786	1042	2306,5	0,65	23
2	310	186,0	780	1034	2310,0	0,60	20
3	330	181,5	779	1033	2323,5	0,55	13
4	350	166,0	789	1046	2351,0	0,475	12
5	370	148,0	802	1064	2384,0	0,40	17

trie am Zementmörtel untersucht, der aus der Probe auspräpariert wurde.

Die Mikrohärteprüfung wurde an Prüfkörpern der Größe 4x4x0,5 cm durchgeführt, die aus dem zentralen Bereich eines Satzes von Würfeln mit 10 cm Kantenlänge im Prüfalter von 28 bis 30 Tagen in der vorher beschriebenen Weise (siehe Abschnitt 3) herausgeschnitten wurden. Insgesamt wurden in jeder Serie je drei Proben geprüft. Der die komplexe Mikrohärtة charakterisierende Mittelwert der Mikrohärtة wurde meistens aus 80 bis 100 Ergebnissen von Einzelmessungen berechnet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Tafeln 2 und 3 übersichtlich zusammengestellt und in den Bildern 4 bis 6 graphisch dargestellt.

Tafel 2 Festbetoneigenschaften im Alter von 28 Tagen

Betonserie	Druckfestigkeit			Kapillarporosität cm <sup>3</sup> /g	w/z-Wert	Mikrohärtة N/mm <sup>2</sup>
	Würfel		Rückprallhammer von Schmidt			
	$\beta_{w10}$ N/mm <sup>2</sup>	$\beta_{w20}$ N/mm <sup>2</sup>	$\beta_R$ N/mm <sup>2</sup>			
1	23,4	22,2	21,8	0,078	0,65	256
2	29,1	26,7	28,0	0,067	0,60	343
3	32,8	29,3	30,1	0,061	0,55	471
4	38,8	37,0	35,2	0,054	0,475	558
5	42,6	41,4	42,7	0,041	0,40	732

Tafel 3 Mikrohärtة des Betons

Betonserie	Mikrohärtة N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert der Mikrohärtة N/mm <sup>2</sup>	Standardabweichung N/mm <sup>2</sup>	Diagonallänge des Eindrucks $\mu\text{m}$
1	230 219 319	256	45	38,06
2	296 337 396	343	71	32,88
3	496 408 511	471	79	28,06
4	522 504 648	558	111	25,78
5	701 664 831	732	124	22,51



## 4.2 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die in der Tafel 3 wiedergegebenen Meßergebnisse beweisen die zufriedenstellende Empfindlichkeit der Mikrohärtigkeit gegenüber Änderungen der Druckfestigkeit des Betons; graphisch wird diese Beziehung im Bild 4 gezeigt. Mit steigender Mikrohärtigkeit nimmt die mittlere Abweichung zu, während sich der Variationskoeffizient in verhältnismäßig engen Grenzen bewegt. Ein gleichzeitiger Vergleich der Mikrohärtigkeiten und der Druckfestigkeiten der untersuchten Betonproben mit ihrem Wasserzementwert (Bild 5) bzw. ihrer Porosität (Bild 6) zeigt ebenfalls die enge gegenseitige Beziehung zwischen all diesen Größen.

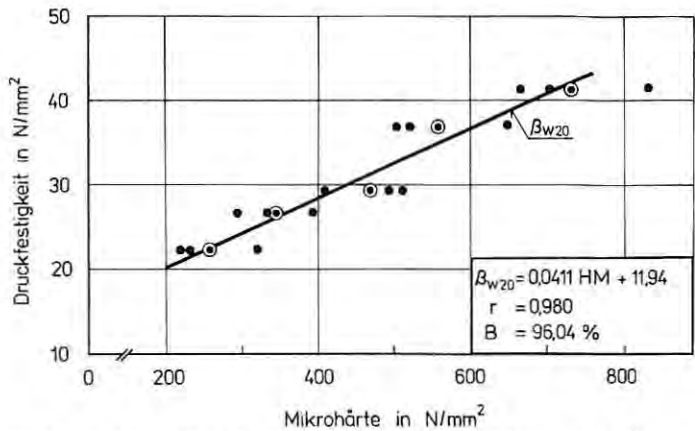


Bild 4 Beziehung zwischen Druckfestigkeit  $\beta_{w20}$  und Mikrohärtigkeit HM

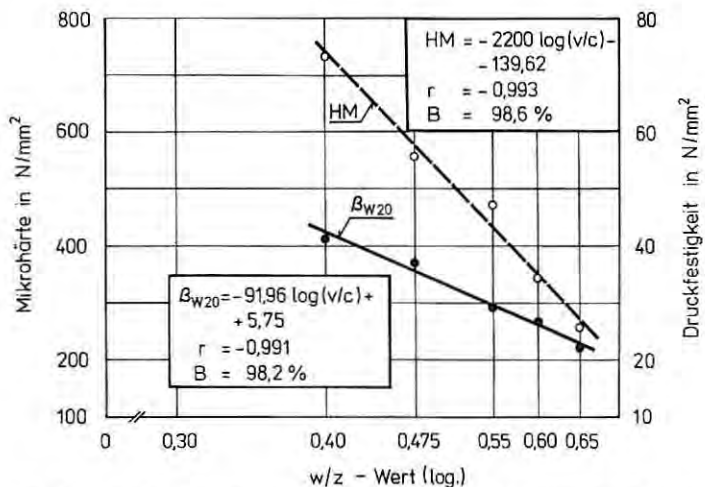


Bild 5 Druckfestigkeit  $\beta_{w20}$  und Mikrohärtigkeit HM in Abhängigkeit von Kapillarporosität

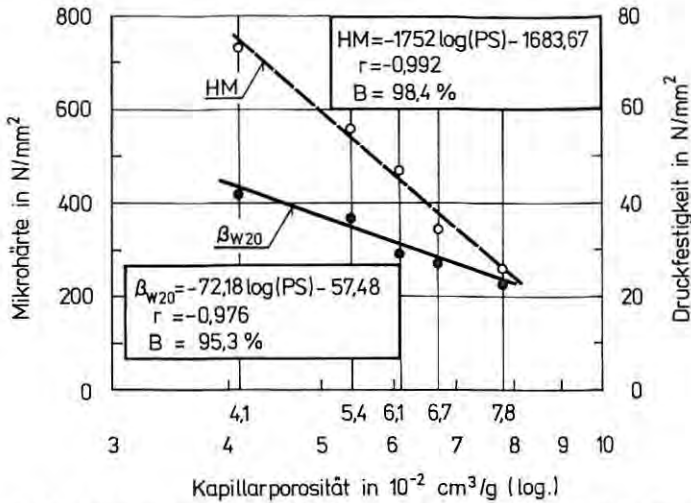


Bild 6 Druckfestigkeit  $\beta_{w20}$  und Mikrohärte HM in Abhängigkeit von w/z-Wert

Die angegebenen Meßergebnisse bestätigen die allgemein bekannte Beziehung zwischen der Druckfestigkeit des Betons und seiner Porosität, an deren Stelle analog auch der Wasserzementwert genommen werden kann [13]. Die hohen Korrelationskoeffizienten für beide Beziehungen beweisen ihre beinahe funktionelle Abhängigkeit (siehe Bilder 5 und 6). In ähnlicher Weise kann die Beziehung zwischen der Mikrohärte und diesen Größen charakterisiert werden. Daraus folgt, daß die Mikrohärte, ähnlich wie die Druckfestigkeit, auf Änderungen des Wasserzementwerts bzw. der Porosität reagiert. Dies bestätigt die Tatsache, daß die Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Porosität eine der wichtigen Eigenschaften der Mikrohärte darstellt.

Beim Eindringen des Eindringkörpers entstehen hohe Spannungs-konzentrationen, was auch durch spannungsoptische Untersuchungen bestätigt wurde. Im Gegensatz zu nichtporösen Materialien bildet die vom Eindringkörper verdrängte Materie keine Randwülste, sondern sie wird in die Poren eingedrückt. Das Volumen des Porensystems beeinflusst daher die Möglichkeiten der Anpassung des Materials beim Eindringen und daher indirekt auch den Wert der Mikrohärte. Die enge Beziehung zwischen der Druckfestigkeit und der Porosität sowie auch diejenige zwischen der Mikrohärte und der Porosität bilden die Voraussetzung für die Verwendung der Werte der Mikrohärte vom Zementstein im Beton zur Charakterisierung der Druckfestigkeit des Betons (siehe Bild 4).

Die erwähnte gegenseitige Abhängigkeit zwischen den Werten der Mikrohärte und der Druckfestigkeit bestätigt die allgemeinen Zusammenhänge zwischen der Mikro- und Makrostruktur des Betons. Die Ergebnisse zeigen auch, daß einige physikalisch-mechanische Eigenschaften des Betons in zufriedenstellender Weise durch die Untersuchung von Mikrovolumina des Zementsteins im Beton er-

mittelt werden können, was zu neuen experimentellen Möglichkeiten führt. Aus diesem Grunde wurden im folgenden Teil dieses Beitrages die Ergebnisse der Untersuchung von Strukturänderungen im Beton in solchen Fällen gezeigt, wo andere Methoden nur in einem beschränkten Maß verwendet werden können.

## 5. Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein

Das Gestein stellt im Beton keinesfalls nur einen inerten Zuschlagstoff dar. Es beeinflusst die Eigenschaften des Betons nicht nur durch seinen Gehalt und die Korngröße der Korngruppen, sondern auch durch seine petrographische Zusammensetzung, die sich in verschiedener Weise auf die Kohäsion beider Grundphasen auswirkt, d. h. auf die Eigenschaften der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein. Diese Frage ist dauernder Gegenstand vieler experimenteller Arbeiten.

### 5.1 Versuche

Die Eigenschaften der Kontaktzone wurden an drei Typen von Gestein untersucht, die üblicherweise im Beton als Zuschlag verwendet werden, nämlich an Basalt, Kalkstein und Quarz, deren petrographischer Charakter bedeutende Unterschiede aufweist. Die gewählten Zuschlagarten in der Korngruppe 4/8 mm wurden gemeinsam mit dem Portlandzement PZ 325 (der annähernd einem PZ 35 F der Norm DIN 1164, Ausgabe November 1978, entspricht) zur Herstellung von Einkorngruppen-Betonmischungen verwendet. Der Zementgehalt in den einzelnen Mischungen wurde anhand der Ken-

Tafel 4 Zusammensetzung und Eigenschaften der Einkorngruppenbetone

		Zuschlagart		
		Basalt	Kalkstein	Quarz
Schüttdichte von Zuschlag	kg/m <sup>3</sup>	1 605	1 472	1 594
Korndichte von Zuschlag	kg/m <sup>3</sup>	3 000	2 610	2 630
Zement	kg/m <sup>3</sup>	730	707	631
Wasser	l/m <sup>3</sup>	255	247	221
Zuschlag 4/8 mm	kg/m <sup>3</sup>	1 485	1 331	1 472
Theoretische Frischbetonrohddichte	kg/m <sup>3</sup>	2 470	2 285	2 324
Zementleimvolumen je 1 m <sup>3</sup> des Frischbetons	kg/m <sup>3</sup>	490	475	425
w/z-Wert		0,35	0,35	0,35
Dicke der Oberflächenschicht des Zementleims nach Kennedy	m · 10 <sup>-5</sup>	5,0	5,0	5,0

nedy-Methode so bestimmt, daß eine konstante Dicke der Oberflächenschicht von  $5 \cdot 10^{-5}$  m um die Körner herum erzielt wurde. Die für die Charakterisierung der Zusammensetzung aller drei untersuchten Betonmischungen notwendigen Daten sind in der Tafel 4 übersichtlich zusammengestellt.

Aus jeder Mischung wurde je 18 Prismen der Größe  $4 \times 4 \times 16$  cm (d. h. insgesamt 6 Sätze) hergestellt, die nach dem Entschalen in Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  gelagert wurden. Im Prüfalter von 28 Tagen wurden bei 5 Sätzen von Prismen aus jeder Serie die grundlegenden physikalisch-mechanischen Eigenschaften untersucht, nämlich der dynamische Elastizitätsmodul mit der Resonanzmethode, die Ultraschallimpulsgeschwindigkeit, die Biegezugfestigkeit und an Prismenhälften die Spaltzugfestigkeit und die Druckfestigkeit.

Die Proben für die Mikrohärteprüfung wurden in der bereits im Abschnitt 3 beschriebenen Weise vorbereitet. Die Mikrohärte wurde in den folgenden Entfernungen von der Kontaktfuge zwischen Zuschlag und Zementstein gemessen: 20, 50, 75, 100, 150, 200, 300 und  $550 \mu\text{m}$ . Die Mikrohärte an diesen Stellen wurde als Mittelwert von 50 Teilmessungen erhalten, wobei die Entfernung der Eindrücke zur Kontaktfuge jeweils annähernd gleich groß waren.

## 5.2 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen von physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Betone mit den gewählten Zuschlagarten sind in Bild 7 dargestellt. Die gegenseitige Beziehung zwischen den mechanischen Eigenschaften der Betonarten B (Basalt), K (Kalkstein) und Q (Quarz), d. h. die Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und die Biegezugfestigkeit, entspricht den bekannten Beziehungen. Die Betonart B weist die höchsten Festigkeiten, K die mittleren und Q die deutlich niedrigsten aus.

Anscheinend überraschend ist die Beziehung zwischen den zerstörungsfrei gemessenen Kennwerten der untersuchten Betonarten, d. h. der Ultraschallimpulsgeschwindigkeit und des dynamischen Elastizitätsmoduls. In diesem Fall werden im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen bei der Betonart Q die höchsten Werte ermittelt. Zur Deutung dieses entgegengesetzten Verlaufs könnten gerade Ergebnisse der Mikrohärteprüfung beitragen.

Die Verläufe der Mikrohärte in der Kontaktzone sind für die einzelnen Betonarten in Bild 8 dargestellt. Es hat sich gezeigt, daß sich die Mikrohärte in der Kontaktzone allmählich ändert. Die Breite der Kontaktzone im Zementstein, wo diese Änderungen registriert werden, beträgt annähernd  $300 \mu\text{m}$ . Eine ähnliche Zone kann auch in den Zuschlagkörnern abgesteckt werden. Bei den Betonarten B und K wird im Gebiet der Kontaktzone eine Abnahme der Mikrohärte im Zementstein beobachtet. Im Gegensatz dazu wird beim Beton Q nach einer kleineren Abnahme der Mikrohärte in enger Nähe der Kontaktfuge ein deutlicher Anstieg ihrer Werte festgestellt.

Die Änderungen der Mikrohärte in der Kontaktzone können aufgrund des Entstehens von modifizierten Hydratationsprodukten erklärt werden, infolge der spezifischen Beeinflussung des Erstarren-

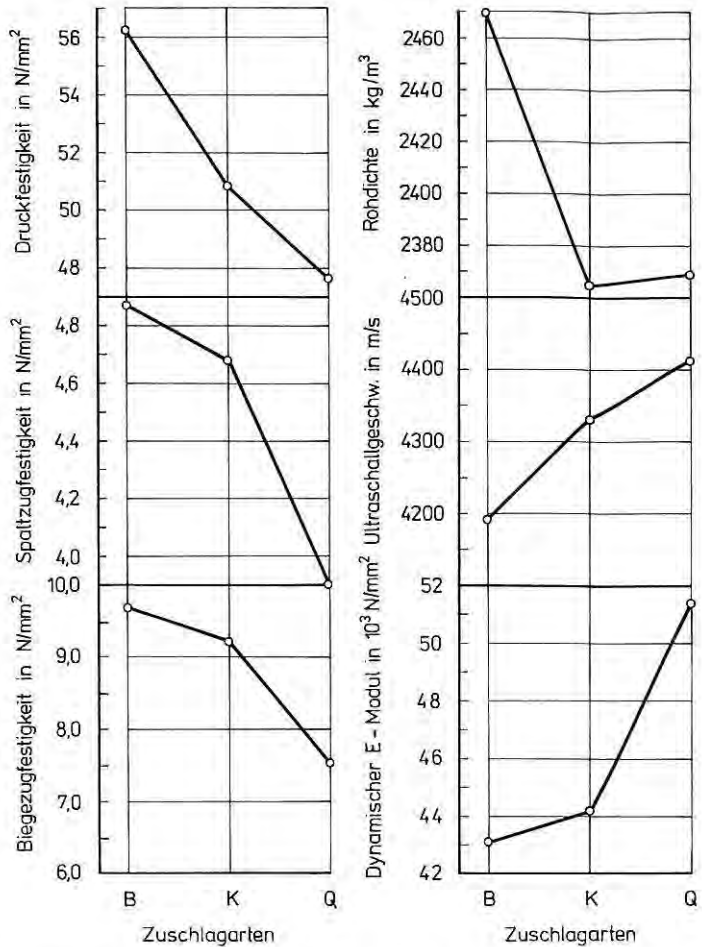


Bild 7 Physikalisch-mechanische Eigenschaften der Einkorngruppenbetone aus drei Typen der Zuschlagarten: B – Basalt, K – Kalkstein, Q – Quarz

den Zementleims durch den Zuschlag unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung. Bei den Betonarten B und K entstehen in der Kontaktzone wahrscheinlich Phasen, die zwar eine verminderte Mikrohärtigkeit, jedoch eine erhöhte Kohäsion mit dem Zuschlag aufweisen. So z. B. kann infolge der chemischen Zusammensetzung des Zuschlags ein epitaxiales Wachstum von Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  stattfinden. Dies würde dann die mechanischen Eigenschaften günstig beeinflussen (siehe Bild 7). Bei der Betonart Q entstehen im Gegensatz dazu dichtere Phasen mit erhöhter Mikrohärtigkeit, deren Kohäsion mit dem Zuschlag jedoch der bei den Betonarten B und K beobachteten deutlich unterlegen ist, woraus auch die ver-

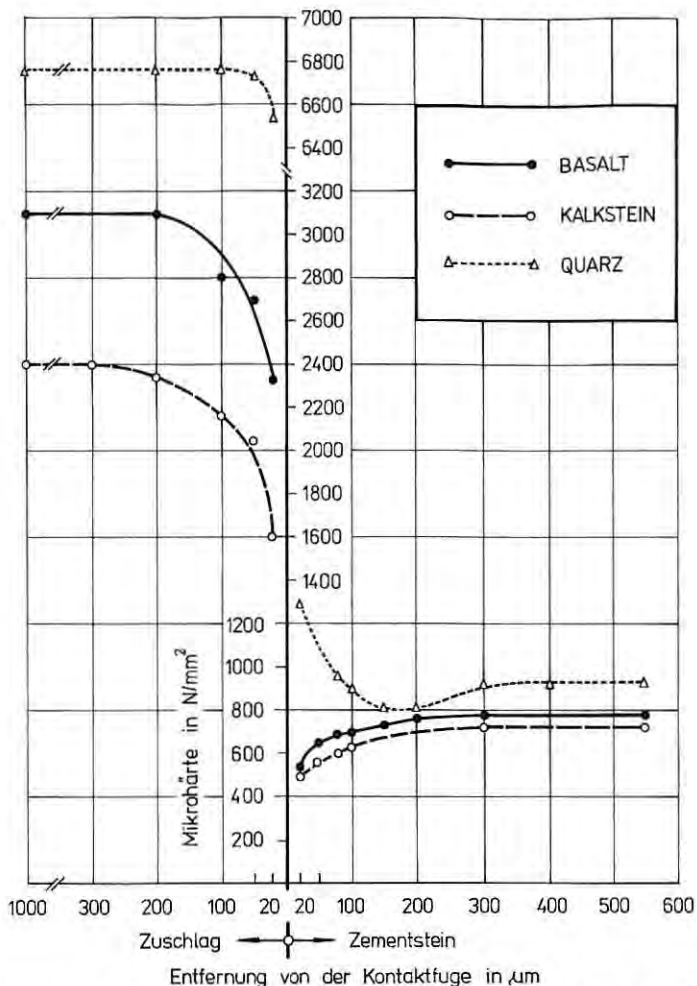


Bild 8 Verlauf der Mikrohärtigkeit in der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein

hältnismäßig niedrigen Werte der durch die Untersuchung ermittelten Festigkeiten folgen.

Die Resonanzmethode und noch deutlicher die Ultraschallimpulsmethode reagieren hauptsächlich auf die Häufigkeit akustischer Verbindungen in der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein sowie auch auf die Rohdichte bzw. auf den Volumenanteil des Zuschlags im Beton. Aus diesem Grunde werden die höchsten Werte der zerstörungsfrei ermittelten Größen bei der Betonart Q gemessen, was unter anderem auch durch die erhöhte Mikrohärtigkeit in ihren Kontaktzonen gedeutet werden kann. Die erhöhte Mikrohärtigkeit entspricht der größeren Dichte der entstehenden Neugebilde, die

zwar offensichtlich die akustischen Verbindungen deutlich verbessern, jedoch nicht in der Lage sind, eine größere mechanische Anstrengung zu übertragen [14].

Die Methode der Mikrohärteprüfung kann hiermit eine Aussage über die Qualität der Kontaktzone liefern und daher als ergänzende Methode z. B. bei der Beurteilung der Verwendbarkeit von verschiedenen Gesteinsarten als Zuschlag dienen, namentlich in den Fällen, wo die mineralogische Zusammensetzung des Gesteins berechnete Zweifel an seiner Verwendbarkeit zur Betonherstellung hervorruft – z. B. bei einigen Dolomitarten. Die Methode kann jedoch auch zur Untersuchung der Einflußnahme des Wasseraufnahmevermögens des Ziegelscherbens bei keramischen Bauplatten auf die mechanischen Eigenschaften des Zementmörtels sowie auf die Eigenschaften der Kontaktzone zwischen Ziegelscherben und Vergußmasse dienen.

## **6. Untersuchung der Prozesse der Betonstrukturschädigung**

Äußere Belastung sowie die Einwirkung physikalisch-chemischer Einflüsse können die Ausbreitung von Mikrorissen im Beton hervorrufen, deren Anhäufung zu einem fortschreitendem Verlust an Festigkeit und in der Endphase auch zu einer eventuellen Zerstörung des Materials führen kann. Die Prozesse der Schädigung der Betonstruktur durch äußere Kräfte wurden bisher mit Hilfe einer Reihe von Methoden untersucht [15], und es werden fortwährend neue gesucht. In dieser Hinsicht war in letzter Zeit auch die Methode der Mikrohärteprüfung von Interesse. So wurde sie z. B. mit der Bruchzähigkeit als Kennwert für die Charakterisierung der Sprödigkeit von Keramik vorgeschlagen. Dieser Zusammenhang beruht hauptsächlich auf der physikalischen Ähnlichkeit zwischen den Eindrücken des Eindringkörpers und der Ausbreitung von Rissen im Material sowie auf der ähnlichen Spannungsverteilung in der Umgebung des Eindringkörpers mit der in der Nähe der Reißfront eines sich erweiternden Mikrorisses [16].

Eine andere Verwendung findet die Mikrohärteprüfung im Maschinenbau bei der Verfolgung von Zustandsänderungen im belasteten Material. Die Bildung von plastischen Zonen führt nämlich bei Metallen zur Verdichtung der Struktur und hiermit auch zu einer ausgeprägten Änderung der Mikrohärte. Dies kann z. B. bei der Untersuchung von verschiedenen Ermüdungsvorgängen ausgenutzt werden [17].

Beim Zementstein ist die bereits erwiesene Empfindlichkeit gegenüber Porositätsänderungen von entscheidender Bedeutung (siehe Abschnitt 4). Das Volumen der bei der Betonbelastung entstehenden Mikrorisse kommt nämlich in Gestalt einer neugebildeten „Pseudoporosität“ zur Geltung, die den Widerstand gegen das Eindringen des Eindringkörpers und hiermit auch die Mikrohärte vermindert.

### **6.1 Versuche**

Die Forschungsarbeiten, die der Untersuchung der Möglichkeiten für die Verwendung der Methode der Mikrohärteprüfung bei der

Schädigung der Betonstruktur durch den Einfluß äußerer Kräfte zum Ziel hatten, wurden an der Betonart K durchgeführt (siehe Tafel 4). Für die Versuche wurden insgesamt 30 Prismen der Größe 4x4x16 cm hergestellt. Nach dem Entschalen wurden sie bis zum Prüfalter von 28 Tagen in 20°C warmem Wasser gelagert und dann durch die Prüfung der Biegezugfestigkeit in zwei Teile getrennt, die dann zur Bestimmung der Druckfestigkeit verwendet wurden. Der erhaltene Mittelwert der Grenzfestigkeit  $\beta_{D,Grenz}$  diente als Bezugswert für die Bestimmung von fünf Belastungsstufen, nämlich 20 %, 40 %, 60 %, 80 % und 100 % von  $\beta_{D,Grenz}$ . Mit den berechneten Prüflasten wurde jeweils ein Satz von drei Prismenhälften belastet. In der letzten Belastungsstufe wurden die Prismenhälften mit der Maximallast in der Weise belastet, daß kein Zerfall der Prüfkörper stattfand. Der Anstieg der Prüflast dauerte jeweils 3 Minuten mit darauffolgender dreiminütiger Haltezeit.

Die Proben für die Mikrohärteprüfung wurden aus der Mitte der Druckflächen ausgeschnitten, parallel mit der Prüflastrichtung, d. h. senkrecht zur Längsachse der Prismen. Es sei betont, daß die hervorgerufene Schädigung der Betonstruktur in allen Fällen dem irreversiblen Anteil der Formänderungen entsprach; reversible (elastische) Änderungen konnten nicht erfaßt werden. Gleichzeitig wurden Proben auch aus unbelasteten Prüfkörpern ausgeschnitten. Die Wahl der Zonen in der Umgebung der Zuschlagkörner, in denen die Mikrohärte gemessen wurde, wurde aufgrund gegenwärtiger Vorstellungen über die Spannungsverteilung in der Betonstruktur getroffen [15]. Wenn die äußeren Kräfte auf die Probe in senkrechter Richtung einwirken, treten die höchsten Konzentrationen der Druckspannungen oberhalb und unterhalb der Zuschlagkörner (in der Zone D) auf. Im Gegensatz dazu sind an den Seiten der Körner (in der Zone Z) vorwiegend Zugspannungen zu erwarten (siehe die schematische Darstellung in Bild 9). Für die Mikrohärteprüfung wurden Körner mit einer ähnlichen Form ausgesucht, so daß in ihrer Umgebung etwa die gleiche Dicke des Zementsteins erhalten blieb. Für jede Belastungsstufe wurde die Umgebung von 10 Körnern vermessen. In allen Fällen wurden etwa 80 Eindrücke durchgeführt – je die Hälfte in der Zone D und in der Zone Z. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet [18].

## 6.2 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die resultierenden Mittelwerte der Mikrohärte aus einigen hundert Teilmessungen sind gemeinsam mit den entsprechenden Standardabweichungen für die Zonen D wie Z in Bild 9 graphisch dargestellt. Eine Abnahme der Mikrohärte mit zunehmender Prüflast ist aus ihnen ersichtlich. In der Anfangsphase bis zu 20 % von  $\beta_{D,Grenz}$  ist diese Abnahme gering, sie vertieft sich jedoch deutlich zwischen 20 bis 60 % von  $\beta_{D,Grenz}$ ; die weitere Abnahme ist dann nicht mehr so groß. Der Verlauf der Abhängigkeit zeigt, daß die Bildung von Mikrorissen bereits bei niedrigen Belastungen beginnt. Dieser Vorgang steigert sich dann intensiv. Bei weiter steigender Belastung ist dann die Abnahme der Mikrohärte kleiner. Um diese Tatsache richtig deuten zu können, muß die Tatsache in Betracht gezogen werden, daß sich die Eindruckdiagonale zwischen 20 und 35  $\mu\text{m}$  bewegt, was



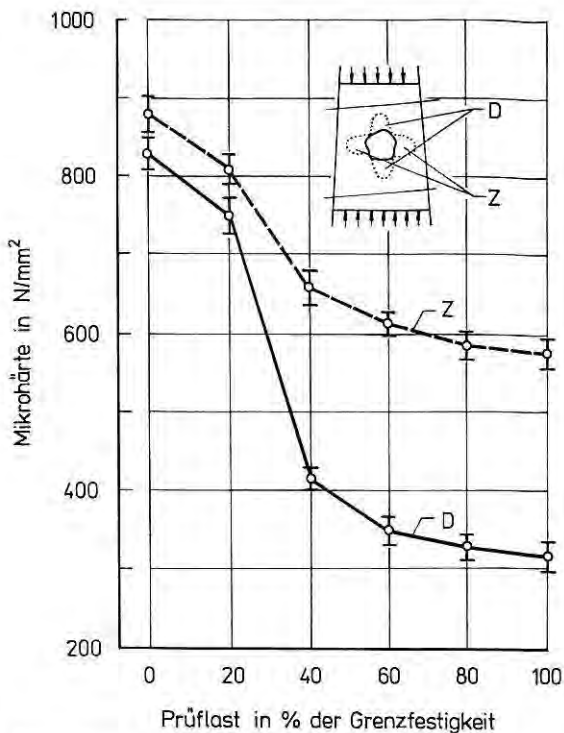


Bild 9 Einfluß der Druckbeanspruchung des Einkorngruppenbetons auf die Mikrohärteänderungen von Zementstein in der Umgebung der Zuschlagkörner

gleichzeitig auch den Radius der Halbkugel definiert, die das von Deformationen betroffene Gebiet annähernd darstellt. Die registrierten Schädigungen haben daher den Charakter von kleinen Dislokationen. Ihre Intensität erreicht ihren Höhepunkt offenbar in dem Augenblick, wo die äußere Kraft 60 % der Grenzkraft beträgt. Für die höheren Prüflastwerte ist das Entstehen von ausgeprägten Mikrorissen typisch, die von der Methode in zuverlässiger Weise nicht mehr erfaßt werden können. Die Eindrücke wurden nämlich in allen Fällen außerhalb der größeren, im Blickfeld des Mikroskops bereits deutlich sichtbaren Risse angebracht. Eine geringere Abnahme der Mikrohärte im Prüflastbereich in der Nähe der Grenzbelastung steht daher nicht in Widerspruch zur Voraussetzung, daß gerade in diesem Prüflastbereich eine intensive Entwicklung von größeren, auch bei geringerer Vergrößerung sichtbaren Rissen stattfindet.

Interessant ist der Vergleich des Mikrohärteverlaufs in den Zonen D und Z. Die Mikrohärte in der Zone D weist eine etwa 60 %ige Abnahme bei der Grenzbelastung auf, während in der Zone Z eine solche Abnahme nur etwa 35 % beträgt. Die Erklärung ist im Entwicklungsprozeß von Kontaktmikrorissen zu suchen, die sich in der Zone Z infolge von Zugspannungen ausbreiten und den Spannungszustand in ihrer Umgebung vermindern. Im Gegensatz dazu kommen

im Gebiet oberhalb und unterhalb der Körner Konzentrationen von Druckspannungen deutlich zur Geltung.

Aus dem Erwähnten folgt, daß die Schädigung von Beton mit Vorgängen der Entwicklung von Mikrorissen verbunden ist, die hauptsächlich von Spannungskonzentrationen beeinflusst werden. Diese Spannungskonzentrationen im Zementstein treten in der Umgebung von Zuschlagkörnern und von Poren auf. Dabei ist die jeweilige Unterschiedlichkeit des Elastizitätsmoduls von demjenigen des Zementsteins typisch. Man kann also feststellen, daß der Zusammenhang der Mikrohärtigkeit und der Porosität nicht nur vom erwähnten Vorgang des Eindrückens des Materials in die Poren bestimmt wird, sondern auch durch Vorgänge, die infolge der Spannungskonzentration in der Porenumgebung stattfinden. Eine größere Porosität bedeutet hiermit nicht nur einen größeren Raum für das Eindringen des Materials, sondern auch die Ursache von höheren Spannungskonzentrationen und hiermit auch einer Störung der Mikrostruktur des Zementsteins. Durch diesen Einfluß könnte auch die deutliche Abnahme der Mikrohärtigkeit in den Druckspannungszonen in der Umgebung der Körner erklärt werden.

Eine ähnliche Verwendung der Methode der Mikrohärtigkeitprüfung hängt mit der Untersuchung der Tiefe der geschädigten Schicht zusammen, die infolge eines fortschreitenden Transportes eines aggressiven Mediums aus der Betonoberfläche in sein inneres Volumen entsteht. Die Mikrohärtigkeit wird in diesem Fall in verschiedenen Tiefen unterhalb der exponierten Oberfläche gemessen [19].

In Bild 10 ist der Verlauf der Mikrohärtigkeit bei einer korrodierten Probe von Zementstein in Abhängigkeit von der Tiefe unterhalb der Oberfläche dargestellt. Die niedrigeren Werte der Mikrohärtigkeit kennzeich-

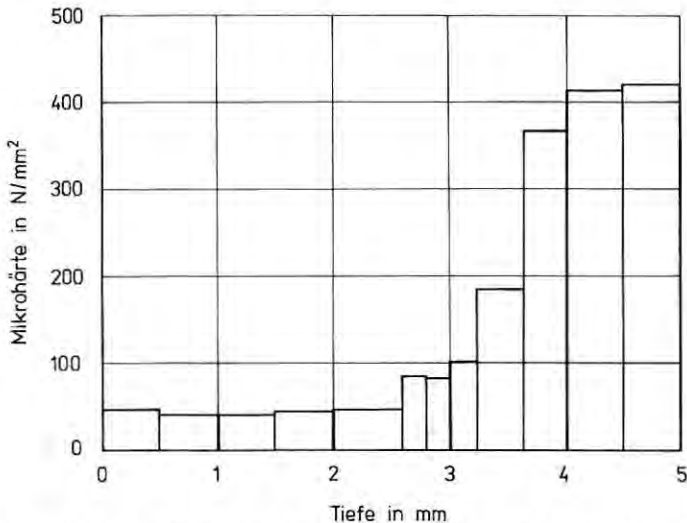


Bild 10 Verlauf der Mikrohärtigkeit bei einer korrodierten Probe von Zementstein in Abhängigkeit von der Tiefe unterhalb der Oberfläche (nach 7 Tagen Lagerung in 5%iger  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Lösung von  $15^\circ\text{C}$ )

nen das bereits von Korrosionsvorgängen erfaßte Gebiet. Durch die Auswertung gleicher Abhängigkeiten in anderen Zeitintervallen kann die Geschwindigkeit des Fortschreitens der Grenzfläche zwischen dem bereits gestörten und dem noch unbeschädigten Gebiet verfolgt und hiermit auch die Kinetik der Korrosionsvorgänge indirekt untersucht werden. Dies kann z. B. bei der Untersuchung des Zustandes der Betondeckschicht auf Bewehrungsstählen in aggressivem Milieu von Bedeutung sein.

Die durchgeführten Versuche haben die Möglichkeit bestätigt, daß die Vorgänge der Betonstrukturschädigung mit der Methode der Mikrohärteprüfung untersucht werden können. Im Gegensatz zu den bisher verwendeten Prüfverfahren ist die Feststellung der Strukturveränderung in gewählten Mikrovolumina des Prüfkörpers oder aus der Konstruktion entnommener Proben möglich.

## 7. Schlußfolgerungen

Das Verfahren der Mikrohärteprüfung bietet neue, untraditionelle Möglichkeiten der Untersuchung einiger Probleme der Bildung und der Störung der Betonstruktur unter verschiedenen Bedingungen, wie es die in den Abschnitten 5 und 6 gegebenen Beispiele gezeigt haben. Einen bedeutenden Vorteil dieser Methode stellt die Tatsache dar, daß die erhaltenen Werte der Mikrohärte des untersuchten Mikrovolumens des Zementsteins von seiner Porosität eng abhängen (siehe Abschnitt 4) und in dieser Weise gleichartig beeinflußt werden wie die grundlegende mechanische Eigenschaft des Betons, die Druckfestigkeit.

Der zur Zeit zum Erhalten eines einzelnen Ergebnisses bei der Mikrohärteprüfung notwendige Zeitaufwand ist im Prinzip die Folge der großen Heterogenität des Zementsteins. Aus diesem Grund muß immer eine Reihe von Teilmessungen durchgeführt werden, um zahlreiche Meßdaten mit möglichst niedriger Streuung zu erhalten. Diese Schwierigkeit wird man durch die Einführung neuer Prüfgeräte lösen können, wodurch die Automatisierung der Messungen ermöglicht wird. Zu den Bedingungen der Verwendung von vollautomatisierten Mikrohärteprüfgeräten gehört auch eine höhere Qualität der Oberflächen der untersuchten Betonproben. Dies kann durch ihr Ausschneiden mit Diamantkreissägescheiben bei niedriger Umdrehungszahl erreicht werden.

Die Erfüllung der erwähnten Bedingungen wird dann zweifellos die Voraussetzungen für eine zweckmäßige Verwendung der Methode der Mikrohärteprüfung bei der Lösung spezieller Fragen der Betonmikrostruktur schaffen. Dabei kann man eine Vertiefung der bisherigen Kenntnisse und auch den Gewinn neuer Erkenntnisse erwarten.

## SCHRIFTTUM

- [1] Mott, B. W.: Micro-indentation hardness testing. Butterworth-Verlag, London 1958.
- [2] Eyerer, P.: Kleinlast- und Mikrohärteprüfung (Eindringverfahren) an nichtmetallischen Werkstoffen. VDI-Berichte Nr. 308, Düsseldorf 1978, S. 23/28.

- [3] Sereda, P. J.: Significance of microhardness of porous inorganic materials. *Cement and Concrete Research* 2 (1972) Nr. 6, S. 717/729.
- [4] Kozak, L. A., und S. Modrý: Relation between pore structure and microhardness of hardened cement pastes. RILEM/IUPAC Int. Symposium „Pore Structure and Properties of Materials“, Prague 1973. Academia, Prague 1974, Proceedings Part III, S. D 139/D 148.
- [5] Stehno, G., und O.W. Blümel: Anwendung der Mikrohärteprüfung an Zementsteinprobekörpern. *Zement und Beton* (1974) Nr. 76, S. 16/18.
- [6] Ljubimova, T. J., und R. A. Aganova: Anwendung der Mikrohärteprüfung für Untersuchung der Struktur des Zementsteins im Beton (in russisch). *Beton i Schelesobeton* (1959) Nr. 7, S. 299/303.
- [7] Kozak, L. A., und B. J. Lindenberg: Untersuchung des Gasbetons bei Verwendung der Mikrohärteprüfung (in russisch). *Sawodskaja laboratorija* (1971) Nr. 6, S. 723/724.
- [8] Grudemo, A.: Strength vs. structure in cement pastes. VI. International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow 1974, Proceedings Section II, S. 1/15.
- [9] Terasawa, M.: Über die Normung eines Mikrohärtegerätes in Japan. *VDI-Berichte* Nr. 308, Düsseldorf 1978, S. 105/110.
- [10] Bückle, H.: Echte und scheinbare Fehlerquellen bei Mikrohärteprüfung – Ihre Klassifizierung und ihre Auswirkung auf die Meßwerte. *VDI-Berichte* Nr. 11, Düsseldorf 1957, S. 9/27.
- [11] Harendza, H. B., und D. Dengel: Zur Frage des Einflusses der Geräteparameter bei der zeitabhängigen Härteprüfung an Kunststoffen. *VDI-Berichte* Nr. 308, Düsseldorf 1978, S. 145/151.
- [12] Stehno, G.: Über Probleme der Mikrohärteprüfung von Zementstein. *Material und Technik* (1975) Nr. 1, S. 21/25.
- [13] Kadleček, V.: Response of various strengths of concrete on its porosity. RILEM/IUPAC Int. Symposium „Pore Structure and Properties of Materials“, Prague 1973. Academia, Prague 1974, Proceedings Part III, S. D 189/D 202.
- [14] Kadleček, V., und J. Dohnálek: Ermittlung der strukturellen Veränderungen und des Schädigungsgrades des Betons mit der Mikrohärteprüfungsmethode. Internationales Kolloquium über das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton, Dresden 1979. TU Dresden 1980, Tagungsberichte 1, S. 78/86.
- [15] Wischers, G., und M. Lusche: Einfluß der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton. *beton* 22 (1972) H. 8, S. 343/347, und H. 9, S. 397/403; ebenso *Beton-technische Berichte* 1972, Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 135/163.
- [16] Lawn, B. R., und D. B. Marshall: Hardness, toughness and brittleness: An indentation analysis. *Journal of the American Ceramic Society* 62 (1979) Nr. 7–8, S. 347/350.
- [17] Karamanenko, O. J., und O. V. Kulikovska: Anwendung der Mikrohärteprüfungsmethode für Ermittlung der Ermüdungsbeschädigung (in russisch). *Sawodskaja laboratorija* (1972) Nr. 1, S. 80/85.
- [18] Kadleček, V., und J. Dohnálek: Detection of the deterioration of concrete by the microhardness measurements. RILEM Symposium "Quality control of concrete structures", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm 1979, Bd. 2, S. 77/84.
- [19] Modrý, S.: Anwendungsmöglichkeiten der Rotationsscheibemethode im Gebiet der chemischen Betonkorrosion (in tschechisch). Symposium „Dauerhaftigkeit des Betons '77“, Prag 1977, S. 81/98.