

# Über den Widerstand von Beton gegen die mechanische Einwirkung von Wasser hoher Geschwindigkeit

Von Kurt Walz und Gerd Wischers, Düsseldorf

## Übersicht

*Zweckmäßig zusammengesetzter Beton ist gegenüber schwach fließendem oder stehendem Wasser beständig, wenn es keine chemisch angreifenden oder mitgeführte feste Stoffe enthält. Jedoch kann Beton von rasch stömendem Wasser, das keine Feststoffe enthält, unter besonderen Verhältnissen abgetragen werden. Als Ursache hierfür kommt im wesentlichen Kavitation in Betracht.*

*Das Auftreten einer Erosion durch Kavitation kann vor allem durch eine günstige geometrische Ausbildung der die Wasserströmung umschließenden Bauteile und Flächen hinten gehalten werden. Durch eine auf den Mechanismus der Kavitation abgestimmte Betonzusammensetzung kann der Widerstand von Beton wesentlich über den des üblichen Betons hinaus erhöht, wenn auch nicht voll gesichert werden. Förderlich sind hohe Festigkeit und Dichte, insbesondere auch an der Betonoberfläche, hohe Zähigkeit und gute Haftung der Zuschläge sowie homogenes Gefüge mit möglichst geringen Strukturunterschieden.*

*Bei Versuchen über die Wirkung eines dünnen Wasserstrahls, der mit ungewöhnlich hoher Geschwindigkeit ( $> 100$  m/s) auf eine Betonfläche auftraf, wurde bei kurzer Dauer in hochwertigem Beton nur eine wenige Millimeter tiefe Höhlung erzeugt. Auch gegenüber einer solchen Beanspruchung, bei der vermutlich Kavitation oder ähnliche Druck- und Stoßwellen auftreten, wird sich ein gegen Kavitation widerstandsfähiger Beton günstig verhalten.*

## 1. Allgemeines

Das hydraulische Bindemittel Zement verleiht dem Beton chemische Beständigkeit gegenüber Wasser. Nur wenn das Wasser andere Stoffe, wie z. B. Säuren oder bestimmte, gelöste Salze, enthält und wenn deren Konzentration bestimmte Grenzwerte überschreitet oder unterschreitet [1], können solche Wässer chemisch angreifend wirken. Es sind dann auf das Angriffsvermögen abgestimmte betontechnische oder auch andere Maßnahmen erforderlich [2].

Wegen seiner chemischen Beständigkeit eignet sich Beton in besonderem Maße für alle mit Wasser in Berührung kommenden Bauwerke und wird dort auch in großem Umfange verwendet, ohne daß bei einer zweckentsprechenden Zusammensetzung (siehe DIN 1045, künftige Fassung) besondere Maßnahmen und spätere Unterhaltungsarbeiten durch Schutzschichten nötig werden oder eine seine Eigenschaften mindernde Alterung eintritt. Zu den bevorzugten Anwendungsgebieten gehören z. B. alle Arten, Formen und Größen von Behältern für die Trinkwasserversorgung und die Abwasserbeseitigung, ferner Schwimmb Becken, Kunstbauten für oberirdische Wasserspeicherung, wie z. B. Talsperren, aber auch Gründungen und Bauten im Grundwasser.

Während bei den zuvor genannten Beispielen sich das Wasser nicht bewegt oder nur schwach fließt, gibt es andere Bauwerke, auf die rasch fließendes Wasser mechanisch einwirken kann. Dies können Überlauf- und Entlastungseinrichtungen von Talsperren (DIN 19 700, Blatt 1, Abschn. 8.1 und 8.2) und Wehren, Zu- und Ableitungen im Wasserkraftbau, ferner Bauten für die Flußregulierungen, den Ufer- und Küstenschutz sowie Brückenpfeiler sein. Als Sonderfall kann man werten, wenn Wasser unter sehr hohem Druck kurzfristig auf Betonflächen strahlt, wie bei Schadensfällen von Hochdruckanlagen in chemischen Betrieben oder Kraftwerken. Dies kann auch im Hinblick auf die Sicherheit eines Umschließungsbauwerks aus Spannbeton bei Atomreaktoren von Bedeutung sein.

Die mechanische Einwirkung von schwach oder mäßig fließendem Wasser ist so gering, daß ihr jeder üblich zusammengesetzte Konstruktionsbeton ausreichend widersteht. Kann der Beton durch Feststoffe in fließendem Wasser (Sandschliff) beansprucht werden, so sind alle Maßnahmen zu beachten, die zur Erlangung eines hohen Abschleifwiderstandes förderlich sind. Orientierende Kennwerte liefert z. B. die Verschleißprüfung nach DIN 52 108 mit feuchten Betonproben unter Wasserzufuhr. Der Beton muß einen hohen Abnutzwiderstand aufweisen und mindestens zur Festigkeitsklasse Bn 350 der DIN 1045 (künftige Fassung) gehören. Der Zementgehalt sollte nicht zu hoch liegen, z. B. bei einem Größtkorn von 31,5 mm nicht über 350 kg/m<sup>3</sup>, da der Zementstein weniger abschleift als das Zuschlaggestein. Beton, der beim Verarbeiten Wasser absondert, ist ungeeignet.

Zuschläge bis 4 mm Korngröße müssen überwiegend aus Quarz oder aus Stoffen mindestens gleicher Härte bestehen, das gröbere Korn aus Gestein oder künstlichen Stoffen mit hohem Verschleißwiderstand (siehe auch DIN 52 100, Tafel 1, Spalte 8). Bei besonders hoher Beanspruchung sind ausgewählte Hartstoffe zu verwenden. Die Körner sollen mäßig raue Oberfläche und gedrungene Gestalt haben. Das Zuschlaggemisch soll möglichst grobkörnig sein (Sieblinie nahe der Sieblinie A oder bei Ausfallkörnungen zwischen den Sieblinien B und U der Bilder 1 bis 4 der DIN 1045, künftige Fassung).

Es ist ein möglichst steifer Beton (Konsistenz K 1) mit niederem Wasserzementwert zu verwenden, damit sich die äußere Schicht an den Betonflächen nicht mit Zementschlämme oder Wasser an-

reichert. Ein hoher Verschleißwiderstand kann nur erwartet werden, wenn der Beton nach der Herstellung wenigstens 7 Tage, besser 14 Tage lang feucht gehalten wird.

Wenn die Geschwindigkeit von Wasser, das keine Feststoffe enthält, bestimmte Werte übersteigt, deren Grenze allerdings auch von weiteren Einflußgrößen, wie z. B. der Ebenheit der Betonfläche, den geometrischen Formen und Abmessungen des Bauwerks, bestimmt wird, kann Beton einem mechanischen Abtragen durch das Wasser ausgesetzt sein.

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich im wesentlichen auf diese mechanische Einwirkung von Wasser hoher Geschwindigkeit (Wasser ohne nennenswerte Mengen an Feststoffen) und auf Maßnahmen für einen hohen Widerstand des Betons hiergegen.

## **2. Mechanische Einwirkung von Wasser hoher Geschwindigkeit** [3, 4, 5]

Strömt Wasser mit einer Geschwindigkeit von einigen Metern pro Sekunde parallel zu einer Begrenzungsfläche, so ruft jede geometrische Veränderung der Begrenzungsfläche ein Ablösen der Strömung und damit lokale Unterdruckbereiche an der Begrenzungsfläche hervor. Dieser „Hohlsog“, der im Grenzfall in die Kavitation (siehe nachfolgend) übergeht, kann bereits so groß sein, daß Fugendichtungsmassen, Fugenmörtel und sogar Bruchsteinquader aus dem gemauerten Verband herausgerissen werden.

Unterschreitet der statische Unterdruck des strömenden Wassers den Dampfdruck, der bei offenen Gerinnen je nach Wassertemperatur und Luftgehalt des Wassers in der Größenordnung von  $-8$  m Wassersäule liegt (theoretisch  $\leq -10,33$  m [6]), so entstehen in ihm wasserdampfgefüllte Bläschen. Gelangen diese Bläschen mit der Strömung in Wasserbereiche, in denen der statische Druck wieder über dem Dampfdruck liegt – das ist meist kurz hinter dem Ort der Entstehung der Bläschen der Fall –, dann kondensiert der Dampf in den Bläschen, und die Bläschen brechen schlagartig zusammen. Diese „Implosion“ beim Zusammenbrechen der Bläschen ruft Druck- und Stoßwellen hervor, wie sie auch von einer Explosion bekannt sind. Allgemein bezeichnet man den gesamten Vorgang des Bildens und des anschließenden Zusammenbrechens von dampf- und gasgefüllten Hohlräumen oder Blasen in Flüssigkeiten als Flüssigkeitskavitation (Kavitation von lat. cavitare = aushöhlen).

Wenn solche Blasen an oder in der Nähe von Werkstoffoberflächen zusammenbrechen, rufen die durch die Implosion hervorgerufenen Druck- und Stoßwellen dort lochfraßartige Zerstörungen und Aushöhlungen hervor, die als Werkstoffkavitation bezeichnet wird. (Es werden also im deutschen Sprachgebrauch sowohl die mit einer Hohlraumbildung in einer Flüssigkeit sich abspielenden Vorgänge als auch die dadurch verursachte Erosion eines Werkstoffs als Kavitation bezeichnet.)

Ob in strömendem Wasser Unterdruck und damit Kavitation auftreten und gegebenenfalls wie stark dann diese Kavitation ist, hängt von mehreren Einflüssen ab, vor allem von der Geschwindigkeit des strömenden Wassers und den geometrischen Formen und Abmessungen der Grenzflächen. Auch die Temperatur des Wassers und der Anteil der gelösten Luft wirken sich etwas aus. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, daß Kavitation in offenen Gerinnen und Freispiegelleitungen nicht auftritt, wenn die Geschwindigkeit des Wassers 12 m/s nicht überschreitet [5]. Bei günstiger geometrischer Ausbildung braucht sie auch dann nicht aufzutreten, wenn die Wassergeschwindigkeit wesentlich höher ist [4]. Andererseits kann Kavitation in geschlossenen Leitungen bereits bei Geschwindigkeiten um 8 m/s dort auftreten, wo durch das Fließverhalten des Wassers der Druck der Luft entsprechend vermindert ist [5].

Einer erodierenden Beanspruchung können auch Wasserbauwerke ausgesetzt sein, wenn das Wasser nicht parallel zu den Begrenzungsflächen strömt, sondern – im Extremfall rechtwinklig – auf Begrenzungsflächen auftrifft. Das ist z. B. bei Prallschwellen am Auslauf von Stollen der Fall, ferner beim Auftreffen von frei fallenden Überlaufstrahlen bei hohen Bogenstaumauern und bei den eingangs erwähnten Brüchen bei Hochdruckanlagen. Zwar lehren die Erfahrungen mit Prallschwellen, daß nahezu die gesamte kinetische Energie umgelenkt wird [7], doch dürften bei der hohen Wassergeschwindigkeit und der großen abrupten Richtungsänderung entweder Kavitation oder Druck- und Stoßwellen auftreten, wie sie für die Kavitation charakteristisch sind. Auch nimmt man an, daß sich bei porösen Baustoffen, wie z. B. Beton, im Bereich der Wasserbeaufschlagung ein Porenwasserüberdruck einstellt, der an der Grenzlinie der beaufschlagten Fläche zu Zugspannungen führen kann, die vom Beton nicht mehr aufgenommen werden [5]. Nach [5] soll jedoch ein dichter, fester Beton im Bereich des Aufschlags einem Wasserstrahl mit Geschwindigkeiten von 30 m/s ohne Schaden widerstehen. Andererseits haben frei fallende Überlaufstrahlen mit etwa entsprechender Aufprallgeschwindigkeit (60 m Fallhöhe, entsprechend 35 m/s) große Auskolkungen in Fels verursacht [7], für die jedoch nicht Verschleiß, sondern der sprengende Wasserdruck in den immer vorhandenen Spalten im Fels verantwortlich gemacht wird.

Wasserstrahlen mit noch wesentlich höherer Geschwindigkeit, wie sie z. B. mit Hochdruckpumpen zu erzeugen sind, erodieren auch dichten Beton und andere Baustoffe. Man benutzt solche Wasserstrahlen zur Beseitigung von Krusten und Ansätzen verschiedener Art. Dafür werden Drücke bis nahezu 1000 atü erzeugt. Schon bei 150 atü liegt die Wassergeschwindigkeit – je nach Durchmesser der Düse – zwischen 100 und 200 m/s.

### **3. Prüfverfahren [3, 8]**

Soweit den Autoren bekannt und aus dem Schrifttum ersichtlich ist, sind bislang im wesentlichen vier unterschiedliche Prüfverfahren für die Widerstandsfähigkeit von Werkstoffen gegenüber

Wasser hoher Geschwindigkeit angewandt worden, die jedoch – zumindest qualitativ – alle gleiche oder ähnliche Ergebnisse liefern.

### **3.1 Venturirohr**

Bei Untersuchungen mit einem Venturirohr wird der Probekörper an der Stelle in die Wand des Rohres eingebaut, an der bei einer bestimmten Wassergeschwindigkeit und Querschnittsverengung Kavitation auftritt.

### **3.2 Ultraschall**

Kavitation kann auch durch Ultraschall hervorgerufen werden (wird auch zur Reinigung in Ultraschallbädern genutzt). Bei dieser Prüfung wird die Probe fest mit einem Magnetostriktionschwinger verbunden und dann in ein Wasserbad getaucht.

### **3.3 Tropfenschlag**

Bei der Tropfenschlag-Prüfmaschine durchfährt die Probe in kurzen Zeitabständen einen senkrecht auf sie auftreffenden Wasserstrahl; wie bei Dauerfestigkeitsprüfungen liegt die Anzahl dieser Durchgänge in der Größenordnung von  $10^6$ .

### **3.4 Hochdruckwasserstrahl**

Man kann eine ruhende Probe auch einem Hochdruckwasserstrahl mehr oder weniger lange aussetzen. Dabei können der Abstand zur Düse, der Druck sowie der Durchmesser der Düse und damit die Wassergeschwindigkeit und die Durchflußmenge verändert, außerdem Luft oder Feststoffe zugesetzt werden.

### **3.5 Prüfungen mit Beton**

Für Untersuchungen mit Magnetostriktionschwingern und Tropfenschlagmaschinen eignen sich nur kleine Proben; sie werden daher vorwiegend für Metalle und andere homogene Werkstoffe verwendet und kommen für Beton wegen seines in einer kleinen Einheit heterogenen Gefüges nicht in Betracht.

Über die Widerstandsfähigkeit von Beton gegen die mechanische Einwirkung von Wasser hoher Geschwindigkeit sind systematische Untersuchungen im U.S. Bureau of Reclamation, Denver, mit einem Venturirohr [9, 10] und mit einem Hochdruckwasserstrahl, teilweise mit Natursandzusatz [9, 11], durchgeführt worden.

Bei den Untersuchungen mit dem Venturirohr wurden durch eine Wassergeschwindigkeit von rund 27,5 m/s gleichbleibende Kavitationsbedingungen geschaffen. Ermittelt wurde die Zeit, in der ein Betonvolumen von rd. 2,5 cm<sup>3</sup> je cm<sup>2</sup> Oberfläche abgetragen wurde (i. M. 2,5 cm Abtragtiefe). Je länger die dazu benötigte Einwirkungsdauer war, desto widerstandsfähiger erwies sich der Beton gegen diese Beanspruchung.

Die Wassergeschwindigkeit bei den Wasserstrahlversuchen lag ohne Sandzusatz zwischen 27,5 und 53,4 m/s. Bei einem Sandzusatz von  $\frac{1}{2}$  Vol.-% betrug die Wassergeschwindigkeit 22,3 m/s. Die Verfasser haben bei orientierenden Versuchen für eine praktische Aufgabe ebenfalls Prüfungen mit dem Hochdruckwasserstrahl durchgeführt, deren Versuchsanordnung im folgenden kurz beschrieben wird.



Bild 1 Versuchseinrichtung zur Prüfung des Widerstands von Beton (B) gegen einen mit Luft vermischten Hochdruckwasserstrahl

Die Versuchseinrichtung wurde von der Firma WOMA-Apparatebau, Wolfgang Maasberg & Co. GmbH, Rheinhausen, auf deren Versuchsstand zur Verfügung gestellt. (Die Firma stellt solche Geräte vor allem für die Beseitigung von Krusten und Ansätzen her.) Der Aufbau der Versuchseinrichtung geht aus Bild 1 hervor. Die Strahldüse wurde in einem schweren Stahlbock in horizontaler Richtung gehalten. Es konnten Düsen eingebaut werden, die Austrittsdurchmesser von 2 und 5 mm besaßen und eine gleichzeitige Zufuhr von Luft oder Sand im Wasserstrahl ermöglichten. Die Düsen wurden mit Druckschlauch an eine Hochdruckkolbenpumpe (im Bild nicht sichtbar) angeschlossen. Der Wasserdruck, den ein Kontrollmanometer in der Düse anzeigte, konnte durch Steuerung der Pumpen bis auf mehrere Hundert atü eingestellt werden. Außerdem konnte der Wasserdurchfluß bestimmt werden; er betrug bei einem Druck von 150 atü bei der 2-mm-Düse rd. 33 l/min und bei der 5-mm-Düse rd. 135 l/min. Diesem Durchfluß entsprechen Wassergeschwindigkeiten von 176 bzw. 115 m/s.

Der Wasserstrahl wurde rechtwinklig auf die Oberfläche der Betonprobe gerichtet, die in einem zweiten Stahlbock eingespannt war. Der Abstand von der Düse zur Betonoberfläche konnte beliebig eingestellt werden.

#### **4. Widerstand von Beton gegen Kavitation [5, 9, 10, 11]**

Aus den im Schrifttum recht zahlreichen Veröffentlichungen über den Widerstand von anderen Werkstoffen, vor allem Metallen, gegen Kavitation geht hervor [3], daß hohe Festigkeit und gleichmäßige Härte, daneben jedoch auch Zähigkeit günstig sind und daß alle Einflüsse, die zu Inhomogenität führen – seien es Gußlegierungen, Einschlüsse oder Poren –, den Widerstand herabsetzen. (Die Härte gilt dabei nur als ein Maß für gleichmäßiges Gefüge, denn sehr harte und zugleich spröde Werkstoffe verhalten sich schlecht.)

Da Beton sowohl stofflich als auch im Gefüge sehr heterogen ist (Zementstein, Zuschlaggemisch), kann sein Widerstand gegen Kavitation nicht so groß sein wie der von Stahl oder auch Metalllegierungen. Aus den Untersuchungen mit anderen Stoffen kann man jedoch schließen, daß alle Maßnahmen, die zu einem Beton höherer Festigkeit, Zähigkeit und verminderter Heterogenität führen, seinen Widerstand gegen Kavitation erhöhen. Da die Beanspruchung durch Kavitation so groß ist, daß selbst Stahl auf die Dauer nicht widersteht, ist es nicht möglich, einen gegen Kavitation beständigen Beton herzustellen. Durch geeignete betontechnische Maßnahmen kann aber der Widerstand von Beton gegen Kavitation – bezogen auf üblichen Konstruktionsbeton – auf etwa das Drei- bis Vierfache gesteigert werden [9].

#### **4.1 Ausgangsstoffe**

##### **4.1.1 Zement**

Für Beton mit hohem Kavitationswiderstand sind alle genormten und bauaufsichtlich zugelassenen Zementarten gleichermaßen geeignet. Zemente mit höherer Normfestigkeit liefern unter sonst gleichen Verhältnissen Beton höherer Festigkeit und sind daher günstig. Zemente mit langsamer Festigkeitsentwicklung setzen eine längere, besonders gute Nachbehandlung voraus, ehe der Beton dem Kavitationsangriff ausgesetzt werden darf. Bei niedrigen Temperaturen, z. B. während der kalten Jahreszeit oder im Gebirge, können Zemente mit sehr langsamer Erhärtung bei frühzeitiger Beanspruchung des Bauwerks daher weniger zweckmäßig sein.

##### **4.1.2 Zuschlag**

Schließt man ausgesprochen weiches Gestein aus, so wird – im Vergleich zur Härte des üblichen, an sich festen Zuschlaggesteins – die Widerstandsfähigkeit des Betons gegen Kavitation durch Wahl eines besonders harten Zuschlags (Hartbeton) nicht wesentlich verbessert [5]. Das liegt daran, daß bei Kavitationsbeanspruchung die Zuschlagkörner durch Abtrag des umschließenden, weniger widerstandsfähigen Feinmörtels meist aus dem Beton herausgelöst werden, so daß der Widerstand des Gesteins sich nicht voll auswirken kann. Maßgebend für den Widerstand sind daher neben der Dichte und Festigkeit des verkittenden Zementsteins die Haftung zwischen Zementstein und Zuschlagkorn. (Wie bereits in Abschnitt 1 ausgeführt, gilt das nicht für eine Abnut-

zung durch Feststoffe in fließendem Wasser; in diesen Fällen ist ein besonders harter, fest in das Betongefüge eingebundener Zuschlag eine wesentliche Voraussetzung für hohen Abnutzwiderstand.)

Mit zunehmendem Größtkorn des Zuschlaggemisches nimmt die Heterogenität des Betons zu und damit der Kavitationswiderstand ab. Das Größtkorn sollte daher 30 mm auf keinen Fall überschreiten; das ACI-Committee 210 empfiehlt sogar, das Größtkorn auf 19 mm zu begrenzen [5]. Eine Kornzusammensetzung etwas unterhalb  $B_{16}$  nach DIN 1045 (künftige Fassung) entspricht dieser Forderung und ist auch deshalb angebracht, weil damit einerseits kein wesentlich gesteigerter Wasseranspruch und andererseits eine gute Verarbeitbarkeit verbunden sind. Obschon durch Versuche nicht nachgewiesen, kann man aus verschiedenen Überlegungen ableiten, daß eine stetige Kornzusammensetzung für den Widerstand gegen Kavitation günstiger sein könnte als eine Ausfallkörnung. Das trifft nicht für den Widerstand gegen schleifende Beanspruchung zu. (Untersuchungen über den Einfluß der Kornverteilung – Zuschlag mit stetigem oder extremem Ausfallkorn-Aufbau – sind angezeigt.)

Da die Haftung zwischen Zuschlag und Zementstein bzw. Feinmörtel für den Widerstand des Betons gegen Kavitation maßgebend ist, sind grobe Zuschlagkörner mit sehr glatter Oberfläche weniger geeignet. Abgesehen vom Sand sind daher möglichst gedrungene Zuschlagkörner zweckentsprechend, z. B. doppelt gebrochenes „Hartgestein“ mit kantiger Form und mäßig rauher Oberfläche.

#### 4.1.3 Zusatzmittel und Zusatzstoffe

Verflüssigende Zusatzmittel (BV), die den erforderlichen Wasserbedarf für eine bestimmte, an sich schon auf das Mindestmaß beschränkte Konsistenz noch vermindern und damit den Wasserzementwert herabsetzen, können in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht vorteilhaft sein.

Auch luftporenbildende Zusatzmittel (LP) verbessern die Verarbeitbarkeit, insbesondere bei mangelndem Feinstsandanteil. Sie sind zudem bei exponierten Bauwerken mit starkem Frost-Tauwechsel-Angriff nötig. Wie aus Tafel 1 hervorgeht, nehmen bei sonst gleicher Zusammensetzung die Festigkeit und der Widerstand des Betons gegen Kavitation mit zunehmendem Luftporengehalt ab. LP-Beton weist nur dann gleichen Widerstand gegen Kavitation wie Beton ohne LP-Zusatzmittel auf, wenn wegen der besseren Verarbeitbarkeit oder Verminderung des Feinstsandgehalts und natürlich auch durch Erhöhung des Zementgehalts der Wasserzementwert des LP-Betons so weit herabgesetzt werden kann, daß damit gleiche Festigkeit entsteht wie beim zusatzmittelfreien Beton (siehe Tafel 1, Mischungen Nr. 16 bis 18).

Zusatzstoffe, wie z. B. Traß oder Gesteinsmehl, können in begrenzten Mengen vorteilhaft sein, wenn der Mehlkorngehalt unterhalb derjenigen Menge liegt, die für dichten, wasserundurch-



Tafel 1 Einfluß des Luftporengehalts auf den Widerstand des Betons gegen Kavitation; nach [9]

Mischung Nr.	Wasserzementwert	Luftporengehalt	Druckfestigkeit nach 28 Tagen (DIN 1048)	Widerstand gegen Kavitation*)
–	–	Vol.-%	kp/cm <sup>2</sup>	Stunden
12	0,55	–	396	27,7
13	0,55	2	392	22,6
14	0,55	4	342	12,2
15	0,55	6	319	9,9
16*	0,59	–	384	23,8
17	0,55	2	381	21,7
18	0,49	4	398	23,3

\*) Zeit, in der rd. 2,5 cm<sup>3</sup> Beton je cm<sup>2</sup> Betonoberfläche abgetragen werden; Alter des Betons 28 Tage

lässigen Beton zweckmäßig ist (siehe Richtwerte in DIN 1045, künftige Fassung). Da ein Beton mit möglichst hoher Festigkeit und demzufolge niedrigem Wasserzementwert angestrebt werden muß, sollte der Mehlkorngelbalt auf ein Mindestmaß beschränkt bleiben; wenn nötig, dürfte es in solchen Fällen günstiger sein, den Zementgehalt anzuheben.

#### 4.2 Zusammensetzung der Betonmischung

Beton, bei dem die Möglichkeit einer Kavitationsbeanspruchung besteht, ist mit möglichst hoher Druck- und Zugfestigkeit herzustellen (Zugfestigkeit geprüft als Spaltzug- oder Biegezugfestigkeit). Die Zusammensetzung muß bei dem vorgesehenen Einbau- und Verdichtungsvorgang eine ausreichende Verarbeitbarkeit gewährleisten, so daß unter Baustellenverhältnissen ein dichtes, porenfreies Gefüge zuverlässig entsteht. Sofern die Bauwerksabmessungen und die Bewehrung es gestatten, ist ein Beton an der unteren Grenze der Konsistenz K 1 (steif) zu wählen; er muß sorgfältig und gleichmäßig durch Rütteln verdichtet werden. Auf keinen Fall sollte die Konsistenz den Bereich von K 2 (plastisch) in Richtung auf K 3 (weich) überschreiten. Zudem muß der Beton so aufgebaut werden, daß er sich auch beim Rütteln nicht entmischet und vor allem kein Wasser absondert, damit die beaufschlagte äußere Zone nicht wasserreicher wird und damit sich um gröbere Zuschläge oder Bewehrungsstäbe keine Wasserfilme bilden, die die Haftung vermindern.

Für die Dichte und Festigkeit des Zementsteins, der nach vollständiger Erhärtung im Mörtel und Beton die Zuschläge miteinander verkittet, ist unter sonst gleichen Verhältnissen auch bei Kavitation der Wasserzementwert bestimmend. In welchem Maße der Wasserzementwert den Widerstand von Beton gegen Kavitation beeinflusst, geht aus Tafel 2 hervor. Durch ein Herabsetzen des Wasserzementwerts von 0,60 auf 0,45 erhöhte sich der Widerstand gegen Kavitation um das 2<sup>1/2</sup>-fache, durch Anheben von 0,60 auf 0,70 verminderte sich der Widerstand hingegen auf ein Drittel.

Tafel 2 Einfluß des Wasserzementwerts auf den Widerstand des Betons gegen Kavitation; nach [9]

Mischung Nr.	Wasserzementwert	Druckfestigkeit nach 28 Tagen (DIN 1048)	Widerstand gegen Kavitation*)
—	—	kp/cm <sup>2</sup>	Stunden
1	0,45	404	70,7
2	0,50	398	48,7
3	0,55	363	42,1
4	0,60	362	29,5
5	0,65	323	27,6
6	0,70	287	9,9

\*) Zeit, in der rd. 2,5cm<sup>3</sup> Beton je cm<sup>2</sup> Betonoberfläche abgetragen werden, Alter des Betons 28 Tage

Beton mit besonders hohem Widerstand gegen Kavitation sollte — abgesehen von den Anforderungen an die Ausgangsstoffe nach Abschnitt 4.1 — wenigstens eine Druckfestigkeit entsprechend der Festigkeitsklasse Bn 450 nach DIN 1045 (künftige Fassung) aufweisen, ferner im Alter von 28 Tagen nach feuchter Lagerung eine Spaltzugfestigkeit von im Mittel wenigstens 35 kp/cm<sup>2</sup> (kein Einzelwert unter 30 kp/cm<sup>2</sup>) bzw. eine Biegezugfestigkeit, geprüft an Balken 50 cm • 10 cm • 10 cm mit mittiger Einzellast, von im Mittel wenigstens 60 kp/cm<sup>2</sup> (kein Einzelwert unter 55 kp/cm<sup>2</sup>). Der Wasserzementwert darf 0,45 nicht überschreiten. (Das ACI-Committee empfiehlt für einen Beton mit hohem Widerstand gegen Kavitation sogar eine Betondruckfestigkeit, umgerechnet auf den 20-cm-Würfel, von wenigstens 540 kp/cm<sup>2</sup> [5].)

### 4.3 Schalung

Grundsätzlich können alle Schalungen aus Stahl, Holz oder Kunststoff verwendet werden. Die Schalung muß immer glatt und eben sein. Sie darf die Erhärtung des Betons an der Schalfläche nicht stören, was bei frischem Holz oder Holzfasertafeln durch zuckerähnliche Holzinhaltstoffe eintreten kann.

Die Angaben im Schrifttum über den Einfluß der Schalung oder der Oberflächenbehandlung von nicht geschalteten Betonflächen sind nicht ganz einheitlich. Tafel 3 enthält Ergebnisse, die bei Untersuchungen mit dem Venturirohr in Denver im Auftrage des Corps of Engineers an einem sehr zementreichen Beton mit einem Größtkorn des Zuschlags von 38 mm gefunden wurden. Danach war der Widerstand von Beton, der mit Sperrholz geschalt war, gegen Kavitation etwa doppelt so groß wie der in einer Stahlschalung erhärtete Beton, während in [11] solche Unterschiede nicht festgestellt wurden. Möglicherweise war bei den in Tafel 3 wiedergegebenen Versuchen auch die Sperrholztafel schwach saugend. Darauf deutet auch der sehr hohe Kavitationswiderstand des Betons hin, der in einer saugenden Spezial-Sperrholzschalung betoniert war. Es wird angenommen, daß damit der Wasserzementwert in der an die saugende Schalung angrenzenden Schicht um 0,05 vermindert wurde.

Tafel 3 Einfluß der Schalung und Oberflächenbehandlung auf den Widerstand von Beton gegen Kavitation; nach [10]

Fluß-Kiessand 0/38 mm; Zementgehalt 500 kg/m<sup>3</sup>; Wasserzementwert 0,31; kein Zusatzmittel; 7-Tage-Würfeldruckfestigkeit 400 kp/cm<sup>2</sup>; Alter bei der Kavitationsprüfung 68 bis 92 Tage

Schalung	Oberflächenbehandlung	Widerstand gegen Kavitation*) in Stunden
Stahl	Keine	184
Sperrholz	Keine	379
Spezial-Sperrholz	Saugende Schalung	1 360
-	Nicht geschalte Oberfläche mit Stahlkelle geglättet	485
-	Nicht geschalte Oberfläche mit Lalle abgezogen, nach 28 Tagen eben geschliffen	303
-	Nicht geschalte Oberfläche mit Vakuum-Matte behandelt, dann mit Stahlkelle geglättet	607
-	Nicht geschalte Oberfläche nach 7 Tagen gesandstrahlt, dann 5 mm Hartmörtel mit metallischen Zuschlägen aufgebracht und im Alter von 28 Tagen eben geschliffen	1 600

\*) Zeit, in der rd. 2,5 cm<sup>3</sup> Beton je cm<sup>2</sup> Betonoberfläche abgetragen werden

Nach [11] weisen die geschalteten Flächen des Betons in jedem Fall einen höheren Widerstand gegen Kavitation auf als die nicht geschalteten, was auch verständlich ist, weil sich beim Verdichten und Abziehen an einer freien, meist waagerechten oder schwach geneigten Oberfläche eine etwas wasserreichere oder mit Feinmörtel angereicherte Schicht bilden kann. (Demgegenüber weisen die Ergebnisse in Tafel 3 für nicht geschaltete Betonflächen einen etwa gleichen oder bei Glätten mit einer Stahlkelle sogar noch einen etwas höheren Kavitationswiderstand auf als die geschalteten Flächen. Das unter diesen Umständen abweichende Verhalten ist vermutlich auf die ungewöhnliche Betonzusammensetzung mit einem Wasserzementwert von 0,31 zurückzuführen.) Bei den nicht geschalteten Flächen zeigte sich auch der günstige Einfluß einer Vakuumbehandlung deutlich, mit der ein Teil des Anmachwassers abgesaugt und der Wasserzementwert erniedrigt wurde.

Durch Aufbringen eines besonders harten Mörtels mit metallischen Zuschlägen (weitere Angaben zur Zusammensetzung fehlen) wurde ein sehr hoher Kavitationswiderstand auch von nicht geschalteten Betonflächen erreicht, der allerdings nicht wesentlich über dem mit einer saugenden Schalung erhaltenen lag.

Wie bereits in Abschnitt 2 ausgeführt, können Hohl- und Kavitation bei schnell strömendem Wasser durch sehr raue Betonoberfläche und vor allem durch Unregelmäßigkeiten der angrenzenden Betonfläche hervorgerufen werden. Solche Unebenheiten können an den Stößen von Schalbrettern oder Schaltafeln auftreten; sie können auch durch eine mangelnde Aussteifung der

Schalung verursacht sein. Das ACI-Committee empfiehlt [5], bei einer Wassergeschwindigkeit über 12 m/s Kanten oder andere Unebenheiten parallel zur Fließrichtung auf 6 mm und solche rechtwinklig zur Fließrichtung auf nur 3 mm zu begrenzen. Bezogen auf eine Meßlänge von 1,50 m sollte auch der Stich einer ebenen Betonfläche, z. B. infolge nachgebender oder verzogener Schalung, nicht größer als 6 mm sein. Bei offenen Überlauf-Entlastungseinrichtungen dürfen die Unebenheiten doppelt so groß, hingegen sollen sie bei Wassergeschwindigkeiten über 30 m/s nur halb so groß sein. Sind die Unebenheiten größer, so können sie entweder abgeschliffen oder mit Mörtel ausgeglichen werden; siehe hierzu Abschnitt 6.

#### 4.4 Nachbehandlung

Damit der durch eine sorgfältige Zusammensetzung erreichbare hohe Kavitationswiderstand sich im Bauwerk auswirkt, ist es unerläßlich, daß der verarbeitete Beton besonders sorgfältig nachbehandelt wird, bevor er strömendem Wasser mit einem möglichen Kavitationsangriff ausgesetzt wird. Die Zeitdauer, während der der Beton möglichst naß zu halten ist, richtet sich nach der Erhärtungscharakteristik des verwendeten Zements und nach den Umweltbedingungen. Auch bei schnell erhärtenden Zementen ist der Beton 7 Tage, besser 14 Tage mindestens gegen ein Abtrocknen zu schützen.

#### 5. Widerstand von Beton gegen Wasserstrahl-Beanspruchung

Mit dem in Abschnitt 3.5 beschriebenen Verfahren wurden Proben aus unterschiedlich aufgebautem Mörtel und Beton hoher Festigkeit bei verschiedenen Drücken, aus verschiedener Entfernung ohne und mit einem luft- oder sandführenden Wasserstrahl geprüft. Entsprechend der vorliegenden Aufgabenstellung (Bruch in einer Hochdruckanlage mit rasch absinkendem Druck) wirkte der Wasserstrahl bei den Versuchen nur 10 bis 15 Sekunden lang ein.

Die untersuchten Probekörper, zylindrische Scheiben von 22 cm Durchmesser und etwa 10 cm Dicke, waren zum Zeitpunkt der Prüfung rd. 2 $\frac{1}{2}$  Jahre alt (Lagerung: 14 Tage feucht, dann dauernd in Raumluft). Sie waren liegend in Stahlformen hergestellt worden. Der Zuschlag des Betons bestand zu 45 % aus Rheinsand 0/7 mm und zu 55 % aus doppelt gebrochenem Basaltspilt 7/30 mm. Der Zementgehalt lag bei 350 kg/m<sup>3</sup>, der Wasserzementwert bei 0,40. Der Beton hatte bei Lagerung nach DIN 1048 nach 28 Tagen eine Rohdichte von 2,57 kg/dm<sup>3</sup> und eine Druckfestigkeit von 492 kp/cm<sup>2</sup>. Ein typisches Ergebnis der Strahlwirkung auf diesen hochwertigen Beton zeigt Bild 2.

Auf die im Bild wiedergegebene, bei der Herstellung unten gelegene Zylinderfläche wirkte nacheinander auf 8 Stellen jeweils 10 Sekunden lang ein Wasserstrahl mit 150 atü aus 17 cm Entfernung (Prüfstellen I und II) oder aus rd. 50 cm Entfernung (Prüfstellen III und IV) ein. Die Erosion bei den Prüfstellen I und IV entstand mit reinem Wasserstrahl und die der Prüfstellen II und

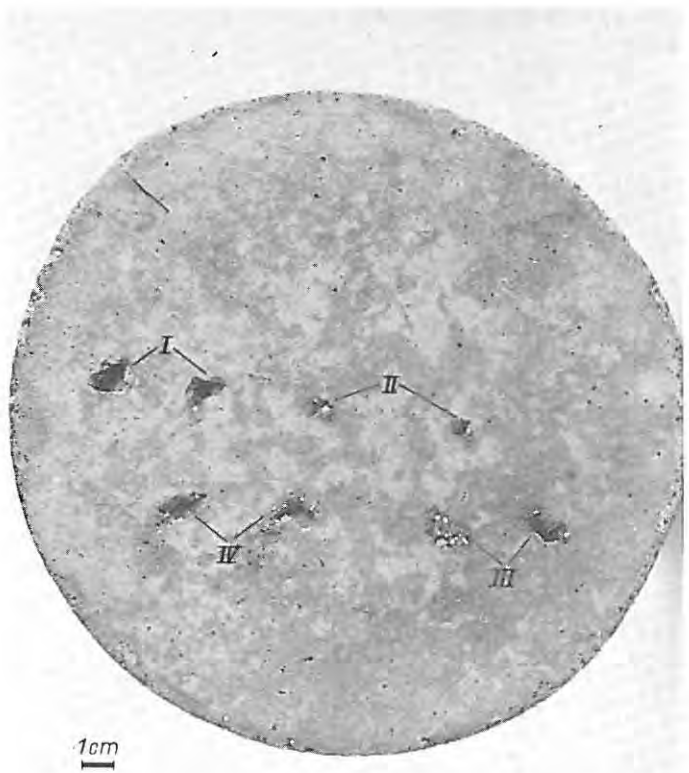


Bild 2 Betonzylinder Nr. 2 (Durchmesser 22 cm) nach 10 s Beanspruchung durch einen Wasserstrahl von 150 atü; Düsendurchmesser 2 mm  
 Prüfstellen I und II: 17 cm Düsenabstand  
 Prüfstellen III und IV: 50 cm Düsenabstand

III mit einem Wasser-Luft-Strahlgemisch. Für jede der vier Beanspruchungsarten sind unter gleichen Bedingungen zwei Stellen der Betonfläche geprüft worden. Die Beanspruchungsart und das Ergebnis (jeweils Mittel aus den beiden Einzelprüfungen) sind in Tafel 4 zusammengestellt. Maximal wurde in dieser kurzen Einwirkungszeit im Beton eine Fläche bis zu 1,5 cm<sup>2</sup> auf eine Tiefe bis zu 4 mm erodiert.

Wurde statt der 2-mm-Düse eine 5-mm-Düse verwendet, so stieg die Durchflußmenge des Wassers von 33 auf 135 l/min. Erwartungsgemäß war dann die Erosion flächenmäßig größer (bis etwa 3 cm<sup>2</sup>), jedoch nicht in dem Verhältnis der höheren Durchflußmenge; die Tiefe des Abtrags lag in der gleichen Größenordnung.

Die Erosion kam auf größeren Zuschlagkörnern zum Stillstand, unabhängig davon, ob ein Korn bereits 1 mm oder mehrere Milli-

meter tief unter der Oberfläche lag. Die Höhlung reichte bei den verschiedenen zusammengesetzten, allerdings hochwertigen Mörteln und Betonen nach dieser kurzen Einwirkungsdauer in keinem Fall tiefer als 6 bis 8 mm.

Tafel 4 Erosion durch einen Hochdruck-Wasserstrahl  
(Wasserdruck 150 atü, Düse 2 mm, 10 s Einwirkung)

Prüfstelle	Abstand von der Betonfläche	Luftführung	Wirkung auf den Beton
I	17 cm	ohne	Größeres Zuschlagkorn in 2 bis 3 mm Tiefe auf einer Fläche von rd. 1 cm <sup>2</sup> freigelegt
II	17 cm	mit	Deutlich geringere Wirkung als bei Prüfstelle I. Freigelegte Fläche etwa 0,5 cm <sup>2</sup> groß und rd. 1 mm tief
III	50 cm	mit	Wirkung etwas größer als bei Prüfstelle I. Freigelegte Fläche etwa 1,5 cm <sup>2</sup> groß und 3 bis 4 mm tief
IV	50 cm	ohne	Wirkung ähnlich wie bei Prüfstelle III

Bei längerer Einwirkung bis zu 10 Minuten nahm die Erosion nach der relativ schnellen Ausbildung eines Kraters von einer Tiefe bis zu 2 cm merklich ab, auch wenn der Wasserdruck bis zu 800 atü erhöht wurde. Meist lag dann am Grunde des Kraters ein größeres Zuschlagkorn, das ein Fortschreiten der Erosion während der Einwirkungszeit von einigen Minuten zunächst verhinderte.

Die Erosion an der Auftreffstelle des Hochdruckstrahls wurde wesentlich stärker, wenn in den Wasserstrahl Natursand oder ein noch stärker wirkender Stahlsand eingeführt wurde. Es war so möglich, innerhalb von 4 bis 8 Minuten die rd. 10 cm dicke Betonscheibe röhrenartig zu durchbohren; an der sehr unebenen Wandfläche der Erosionsröhre standen überwiegend gröbere Zuschlagkörner an. Auf diese Weise konnten, z. B. auch durch Aneinanderreihen von Erosionsröhren, Trennschnitte durch eine mehrere Zentimeter dicke Wand eines geschleuderten Stahlbetonrohres geführt werden.

Zusammenfassend ergab sich aus diesen Versuchen, daß bei einem Schadensfall in einer Hochdruckanlage die erodierende Wirkung eines Wasser- oder Wasser-Dampf-Strahls von mehreren Hundert atü selbst bei einer Einwirkungsdauer bis zu 1 min unbedeutend ist und daß daher bei dem zweckentsprechend zusammengesetzten, sehr festen Beton eines solchen Umschließungsbauwerks allenfalls eine örtlich sehr begrenzte Abtragung von 1 bis 2 cm zu erwarten ist. Für den Bestand der Umschließungswand ist daher nur deren Widerstand gegen den Druckstoß des gespannten Dampfes aus dem geplatzten Druckbehälter oder dem Druckrohr maßgebend.

## 6. Ausbesserung erodierter Betonflächen

Wenn eine Erosion am Bauwerksbeton durch eine ungünstige Wasserführung bedingt ist, wird es in den meisten Fällen wirtschaftlicher sein, die erodierten Partien im Zuge der allgemeinen Unterhaltung des Bauwerks im Abstand von einigen Jahren auszubessern, als größere bauliche Veränderungen für eine günstigere Wasserführung vorzunehmen [5].

Mörtel und Beton für solche Ausbesserungen müssen ebenso die Anforderungen für hohen Kavitationswiderstand erfüllen, die in Abschnitt 4 beschrieben sind. Darüber hinaus ist jedoch die Haftung zwischen altem und neuem Beton wichtig, insbesondere bei dünneren Ausbesserungsschichten und an Fugen. Die amerikanischen Empfehlungen [5] geben vermutlich aus diesem Grunde an, daß die aufzutragende Schicht wenigstens 15 cm dick sein sollte, wenn die Bauteilabmessungen dies gestatten. Nach diesen Empfehlungen sollte die Fläche des Auftrags nicht zu der gesunden Betonfläche hin keilartig auslaufen („auf Null auslaufen“), sondern für die seitliche Begrenzung der Ausbesserung sind im gesunden Beton rechtwinklig zur Oberfläche abgearbeitete Flächen zu schaffen, z. B. durch Schnitte mit einer Steinsäge oder durch schonendes Ausstemmen der erodierten Partien. Eine entsprechende Arbeitsweise wird in dem „Merkblatt für die Unterhaltung und Instandsetzung von Betonfahrbahnen“ in Abschnitt 3.3.4.2 beschrieben [15].

Aufgrund der Erfahrungen mit der Ausbesserung von Oberflächen- und Kantenschäden an Betonfahrbahnen dürfte es nach Auffassung der Verfasser auch möglich sein, dünnere Schichten als 15 cm dauerhaft aufzubringen, wenn hinsichtlich der Haftung die Hinweise beachtet werden, die in den Vorläufigen Merkblättern der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen für die Ausbesserung von Oberflächenschäden mit Zementmörtel [12] oder mit Kunstharzmörtel [13] aufgeführt sind. Abweichend von diesen Merkblättern ist auch bei den hier aufzutragenden Flickmörtelschichten eine rechtwinklig zur Oberfläche verlaufende Begrenzungsfläche vorzusehen (siehe oben). In jedem Fall ist der an den erodierten Partien noch anstehende, angegriffene Beton so weit abzuarbeiten, daß der aufgetragene Mörtel oder Beton an die gesunde Grobstruktur des Betons angebunden werden kann.

### 6.1 Ausbesserung mit Zementmörtel und Beton

Gelockerte Teile sind von den bearbeiteten Flächen zu entfernen und die Flächen, insbesondere waagerechte, mit Druckwasser von anhaftendem Staub zu reinigen. Dabei ist darauf zu achten, daß kein Wasser über längere Zeit in den Vertiefungen zurückbleibt, weil sich sonst eine Kalkhaut abscheidet, die die Haftung beeinträchtigt. Darauf ist auch bei Regenfällen zu achten. Wasser in Vertiefungen wird zweckmäßig mit ölfreier Druckluft entfernt. Die vorbereiteten Flächen müssen beim Auftragen des Mörtels oder Betons so weit abgetrocknet sein, daß sie nur noch matt feucht erscheinen (eher zu trocken als zu naß). Sehr dichter, nicht saugender Beton verlangt keine vorausgehende Durchfeuchtung. Vor

dem Aufbringen des Mörtels oder Betons wird ein dickflüssiger Zementleim (Wasserzementwert etwa 0,40) oder bei dickeren Schichten ein dickflüssiger Zementmörtel (Zement : Sand etwa 1 : 1 nach Gewichtsteilen) in die Begrenzungsflächen mit einem harten Besen kräftig eingebürstet. Unmittelbar anschließend wird der Mörtel oder Beton („frisch auf frisch“) eingebracht. Wird der Mörtel oder Beton mit Druckluft angetragen, so ist ein Einbürsten mit Zementleim oder Mörtel nicht erforderlich.

Für die Zusammensetzung des Mörtels oder Betons sind die Angaben in den Abschnitten 4.1 und 4.2 sinngemäß zu beachten. Doch soll das Größtkorn höchstens ein Drittel, besser nur ein Fünftel der Dicke der auszubessernden Schicht betragen.

Waagerechte und wenig geneigte Schichten sind mit einer Rüttelbohle zu verdichten und mit einer Abstreichbohle abzugleichen; damit sie ausreichend glatt entstehen, sind sie in der Regel mit einer Stahlkelle zu glätten, die Fläche darf aber nicht angenäßt oder mit Zement eingepudert werden.

Dünnere Schichten bei der Ausbesserung senkrechter Bauteilflächen werden zweckmäßig aufgespritzt und nach mäßigem Erstarren abgerieben. Derart ausgebesserte Partien weisen jedoch hinsichtlich Zusammensetzung und Dichte des Betons nicht die optimalen Eigenschaften auf, die mit Rüttelbeton möglich sind. Dickere, senkrecht anzubringende Ausbesserungsschichten werden daher zweckmäßig hinter einer Schalung eingebracht und durch Rütteln verdichtet, wie dies in [14] ausführlich beschrieben ist; siehe auch [16].

Für die Nachbehandlung gelten die Hinweise in Abschnitt 4.4; Grate und Kanten sind nach ausreichender Erhärtung abzuschleifen.

## **6.2 Ausbesserung mit Kunstharzmörtel [13]**

Für eine Ausbesserung mit Kunstharzmörtel, die im allgemeinen für dickere Schichten nicht angewendet wird, muß der Haftgrund die Beschaffenheit wie unter 6.1 beschrieben aufweisen, jedoch trocken sein.

Zur Verbesserung der Haftung und zur Verhinderung einer Blasenbildung ist zunächst eine dünne Schicht des Kunststoffbinders ohne Zuschlag auf die trockene Betonfläche anzutragen. Bilden sich hierbei Blasen, so sind sie sofort aufzustechen; zweckmäßig ist dann ein zweiter Anstrich. Hierbei sowie bei dem anschließenden Aufbringen des Kunstharzmörtels muß die Fläche der vorher aufgetragenen Beschichtung wenigstens noch etwas klebrig sein.

Für den Zuschlag zu Mörtel oder Beton mit Kunstharz als Bindemittel gelten hinsichtlich Größtkorn, Kornform und Kornzusammensetzung die gleichen Anforderungen wie für Zementmörtel. Bei wasserempfindlichen Harzen muß der Zuschlag vor dem Mischen getrocknet werden. Als Richtwert für den Mindestgehalt an Kunstharzbinder können bei einer Schichtdicke von 10 bis 20 mm etwa 8 Gew.-%, bei dickeren Schichten 6 Gew.-% gelten. Das Auftragen von Kunstharzmörtel oder -beton verlangt besondere Erfahrungen und Techniken.



Da die Kunstharze bei niedrigen Temperaturen nur langsam aushärten, sollen Ausbesserungsarbeiten bei Tagestemperaturen unter 15 °C im allgemeinen nicht ausgeführt werden. Bei sehr heißer Witterung können die Kunstharze schnell abbinden. Bis zum Abbinden sind die ausgebesserten Flächen vor Regen und anderer Feuchtigkeit zu schützen. Bei Temperaturen zwischen 20 und 30 °C härten Kunstharzbinder in wenigen Tagen weitgehend aus.

Bei der Verarbeitung von Kunstharzen sind wegen möglicher physiologischer Schäden die Anweisungen der Hersteller und die einschlägigen Vorschriften der Berufsgenossenschaft zu beachten. Das Tragen von Schutzbrillen und Gummihandschuhen ist vorgeschrieben.

## **7. Zusammenfassung**

7.1 Während ruhendes oder schwach fließendes Wasser Beton praktisch weder chemisch noch physikalisch angreift, kann Wasser hoher Geschwindigkeit Beton — ebenso wie Stahl — durch Kavitation abtragen. Fließendes Wasser, das Sand oder Geröll führt, wirkt auch bei mäßigen Geschwindigkeiten abschleifend.

7.2 Die starke mechanische Einwirkung von sehr schnell fließendem Wasser ohne Feststoffe beruht im wesentlichen auf der sogenannten Kavitation. Sie entsteht, wenn in diesem Wasser Bereiche mit einem unter dem Dampfdruck liegenden Unterdruck auftreten, der zur Bildung dampfgefüllter Bläschen führt, die dann an Stellen mit geringerem Unterdruck schlagartig zusammenbrechen. Diese Implosionen rufen lokal begrenzte Druck- und Stoßwellen hervor, die wie Explosionsschläge wirken und alle Werkstoffe — auch gehärteten Stahl — bei längerer Einwirkung erodieren. (Sowohl die in der Flüssigkeit sich abspielenden Vorgänge als auch die dadurch verursachte Erosion werden als Kavitation bezeichnet.)

7.3 In offenen Gerinnen und Freispiegelleitungen kann Kavitation auftreten, wenn die Wassergeschwindigkeit mehr als 12 m/s erreicht. Weitere Voraussetzung dafür sind jedoch geometrische Unterschiede im Querschnitt; hierzu zählen auch schon um nur 1 cm versetzte Stufen. Andererseits hat man Kavitation von Beton in geschlossenen Leitungen bereits bei Geschwindigkeiten um 8 m/s beobachtet und dies auf ein Absinken des Luftdrucks durch den Sog des fließenden Wassers zurückgeführt.

7.4 Zur Prüfung des Widerstands von Beton gegen die mechanische Einwirkung von Wasser hoher Geschwindigkeit verwendet man bevorzugt ein Venturirohr, in dem durch Querschnittsveränderung des schnell fließenden Wasserstroms Kavitation erzeugt wird. Ferner hat man zur Prüfung auch schon eingespannte Proben einem Hochdruckwasserstrahl ausgesetzt, dessen erodierende Wirkung ebenfalls auf Kavitation zurückgeführt wird.

7.5 Der Widerstand von Beton gegen Kavitation kann durch geeignete betontechnische Maßnahmen um das Drei- bis Vierfache — verglichen mit üblichem Konstruktionsbeton — gesteigert werden.

7.6 Beton mit hohem Kavitationswiderstand muß hohe Druckfestigkeit (über  $500 \text{ kp/cm}^2$ ) und hohe Zugfestigkeit besitzen (Spaltzugfestigkeit über  $35 \text{ kp/cm}^2$  bzw. Biegezugfestigkeit über  $60 \text{ kp/cm}^2$ ). Der Wasserzementwert soll deshalb allgemein nicht über 0,45 liegen und der Zement eine möglichst hohe Normfestigkeit aufweisen. Das Größtkorn des Zuschlags ist möglichst auf rd. 20 mm zu begrenzen. Eine wesentliche Voraussetzung für Beton mit hohem Widerstand gegen Kavitation ist ein guter Verbund zwischen Feinmörtel und Zuschlagoberfläche. Hierzu tragen doppelt gebrochene Zuschläge mit mäßig rauher Oberfläche aus hartem Gestein bei. Um dickere oder wasserreiche Feinmörtelschichten zu vermeiden, soll der Beton möglichst steif angemacht, mit Rüttlern verdichtet und sorgfältig nachbehandelt werden (feuchte Nachbehandlung nicht unter 7 Tagen). Zusätzliche Maßnahmen, die die Dichte und Festigkeit der vom Wasser beanspruchten Betonfläche verbessern, wie z. B. Vakuumbehandlung, erhöhen den Widerstand. Wenig widerstandsfähig sind horizontale Betonflächen, wenn sich beim Verdichten eine dickere oder wasserreiche Schlämmeschicht gebildet hat.

7.7 Bei Brüchen in Hochdruckanlagen kann kurzfristig ein Flüssigkeits- oder Flüssigkeits-Dampf-Strahl mit hohem Druck (mehrere Hundert atü) auf Belonschutzwände einwirken. Orientierende Versuche haben gezeigt, daß bei Beton mit einer Festigkeit von über  $500 \text{ kp/cm}^2$  und der hier auftretenden, kurzzeitigen Strahleinwirkung (unter 1 Minute) die beaufschlagte Stelle höchstens 1 bis 2 cm tief erodiert wird.

7.8 Erodierete Flächen können durch Zementmörtel, Beton oder Kunstharzmörtel ausgebessert werden. Neben einer Zusammensetzung für hohen Kavitationswiderstand sind alle Voraussetzungen für eine gute Haftung der zur Ausbesserung aufgetragenen Schicht sorgfältig einzuhalten.

## SCHRIFTTUM

- [1] DIN 4030 E — Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Beton- und Stahlbetonbau 63 (1968) H. 4, S. 91/94.
- [2] Bonzel, J., und F. W. Locher: Über das Angriffsvermögen von Wässern, Böden und Gasen auf Beton, beton 18 (1968) H. 10, S. 401/404, und H. 11, S. 443/445; ebenso Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf 1969, S. 127/144.
- [3] Piltz, H.-H.: Werkstoffzerstörung durch Kavitation — Literaturbericht. VDI-Verlag, Düsseldorf 1966.
- [4] Gsaenger, A.: Beanspruchungen von Beton und Betonbauwerken unter Einwirkung von hohen Wassergeschwindigkeiten, beton 12 (1962) H. 9, S. 405/412.
- [5] ACI Comiltee 210: Erosion resistance of concrete in hydraulic structures. Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1955/56) S. 259/271.
- [6] Böss, P.: Technische Hydromechanik. Taschenbuch für Bauingenieure, Hrsg. F. Schleicher. Band II, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Göttingen, Heidelberg 1955, S. 509/589.

- [7] Hartung, F.: Betonbauwerke zur Beherrschung der Energie des Überschußwassers an Stauanlagen. *beton* 12 (1962) H. 9, S. 393/404.
- [8] Keller, A.: Kavitation und Tropfenschlag. *Schweizer Archiv* 23 (1957) Nr. 11, S. 346/361.
- [9] Price, W. H., und G. B. Wallace: Resistance of concrete and protective coatings to forces of cavitation. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 46 (1949/50) S. 109/120.
- [10] Clark, R. R.: Bonneville dam stilling basin repaired after 17 years' service. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 52 (1955/56) S. 821/837.
- [11] Price, W. H.: Erosion of concrete by cavitation and solids in flowing water. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 43 (1946/47) S. 1009/1023.
- [12] Vorläufiges Merkblatt für die Ausbesserung von Oberflächenschäden an Betonfahrbahnen mit Zementmörtel. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1962.
- [13] Vorläufiges Merkblatt für die Ausbesserung von Oberflächen- und Kantenschäden an Betonfahrbahnen mit Kunstharzmörtel. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1968.
- [14] Walz, K.: Die Beständigkeit von Beton unter Gebrauchsbeanspruchung; Bearbeitung eines Berichtes des ACI-Committee 201. *beton* 13 (1963) H. 6, S. 279/286, und H. 7, S. 331/338; ebenso *Betontechnische Berichte* 1963, Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 85/125.
- [15] Merkblatt für die Unterhaltung und Instandsetzung von Betonfahrbahnen. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1968.
- [16] Walz, K.: Rüttelbeton. 3. Auflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1960, Abschnitt 10 (Anbetonieren an erhärteten Beton).