

Hydroabrasionsverschleiß bei wasserbaulichen Anlagen aus Beton

Michael Vogel
Harald S. Müller

Wasserbauliche Anlagen unterliegen vielfältigen last- und umweltbedingten Einwirkungen. Besonders die mechanische Einwirkung auf Betonoberflächen infolge der mit Feststoffen befrachteten Wasserströmung stellt eine maßgebende dauerhaftigkeitsrelevante Beanspruchung dar. Die Behandlung der Dauerhaftigkeit von Beton vor dem Hintergrund hydroabrasiver Beanspruchungen erfolgte bisher nur ansatzweise. So existierten u. a. Kenntnislücken beim Einsatz wirklichkeitsnaher Prüfverfahren zur Simulation des Hydroabrasionsverschleißes, bei der Erfassung verschleißbestimmender Festbetonkennwerte sowie bei der Schädigungsmodellierung. Am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurden diese Fragestellungen aufgegriffen und Lösungen erarbeitet. Eine komprimierte Darstellung der hierbei erzielten Ergebnisse ist Gegenstand des vorliegenden Beitrags.

Stichworte: Hydroabrasionsverschleiß, Beton, Prüftechnik, Schädigungsmodelle, Lebensdauer

1 Einführung

Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen wird durch strömendes, mit Feststoffen befrachtetes Wasser verursacht. Die Folge dieser mechanischen Einwirkung ist eine Kombination aus schleifender, rollender und stoßender Beanspruchung. Der hierdurch erzeugte Betonabtrag reicht von einigen Zentimetern bis zu mehreren Dezimetern, siehe z. B. im *ACI Committee 210 (1987)*. Hinsichtlich der Einwirkungsseite wird die Stärke des Angriffs von der Härte, Form und Größe des Verschleißstoffes sowie den Strömungsverhältnissen bestimmt. Der Betonwiderstand hängt im Wesentlichen von der Härte, Größe und Zusammensetzung der Gesteinskörnung, des Verbunds zwischen Korn und Zementsteinmatrix sowie von der Beschaffenheit der Matrix ab, siehe hierzu z. B. *Haroske (2000)*, *Helbig & Horlacher (2007)* sowie *Jacobs et al. (2001)*.

Bisher existiert kein standardisiertes Prüfverfahren, welches diese komplexe Beanspruchung wirklichkeitsnah abbilden kann. Beispielsweise kann mit den Verschleißprüfverfahren gemäß der *ASTM 799/C 779M (2000)* und der *ASTM C418 (1998)* entweder vorwiegend Schleifverschleiß oder aber hauptsächlich eine Stoßbeanspruchung simuliert werden. Lediglich die Verschleißprüfvorrichtung von Bania, siehe *Bania (1989)*, kann den an wasserbaulichen Anlagen auftretenden Hydroabrasionsverschleiß zufriedenstellend abbilden.

Des Weiteren konnten die wesentlichen Betonkennwerte, die den Verschleiß maßgeblich beeinflussen, bisher nicht eindeutig identifiziert werden. Neben der Druckfestigkeit werden in der einschlägigen Fachliteratur u. a. die Biegezug- und Spaltzugfestigkeit, der Elastizitätsmodul sowie die Porosität als verschleißbestimmende Kennwerte aufgeführt, siehe hierzu z. B. *Haroske (2000)*, *Jacobs et al. (2001)* und *Liu et al. (2006)*.

2 Simulation und Prüfung des Hydroabrasionsverschleißes

2.1 Karlsruher Verschleißprüfvorrichtung

Zur wirklichkeitsnahen Simulation der hydroabrasiven Beanspruchung bei wasserbaulichen Anlagen wurde in Anlehnung an *Bania (1989)* am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) eine Verschleißprüfvorrichtung entwickelt und hergestellt, siehe Abbildung 1.

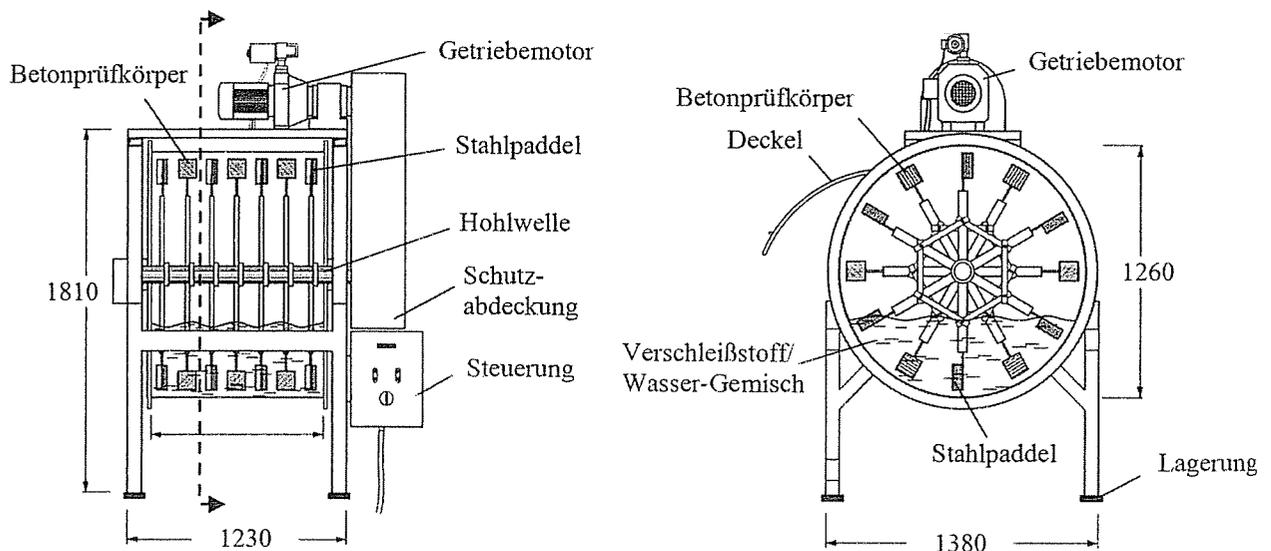


Abbildung 1: Karlsruher Verschleißprüfvorrichtung; Maßangaben in [mm]

Die Prüfvorrichtung besteht aus einem Stahlzylinder (Verschleißtrommel) mit innen liegender Hohlwelle, die mittels Getriebemotor angetrieben wird. Unter Verwendung einer Steuereinheit lässt sich die Umdrehungszahl der Welle stufenlos von 10 bis 70 Umdrehungen pro Minute einstellen. Somit kann eine Beanspruchungsenergie von 900 bis 6000 J/m³ realisiert werden. An der Hohlwelle sind 18 Haltevorrichtungen zur Fixierung der Prüfkörper sowie 24 Stahlpaddel zur optimalen Durchmischung des Verschleißstoff/Wasser-Gemischs angebracht. Das Massenverhältnis von Wasser zu Feststoff in der Verschleißtrommel wurde für die experimentellen Untersuchungen mit 1:1 gewählt. Der Füllgrad der Trommel mit dem Verschleißstoff/Wasser-Gemisch betrug ca. 14 %.

2.2 Experimentelle Untersuchungen (Vorversuche)

Zur Ermittlung der optimalen Randbedingungen, die den standardmäßigen Betrieb der entwickelten Prüfmaschine gewährleisten sollen, wurden im Rahmen von Vorversuchen unterschiedliche Kombinationen aus Verschleißgut und Prüfkörpergeometrien untersucht, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1 Versuchsprogramm (Vorversuche)

Ver-such Nr.	Untersuchungsziel	Bezeichnung	Ver-schleiß-gut / Körnung	Prüfkörper-geometrie	Aus-richtung [°]	Prüfkörperan-zahl [Stück]
1	Variabilität der Messwerte prüfen	„Basalt 16“	Basalt 2-16 mm	Würfel	45	6
2				Zylinder	-	
3		„Quarz 16“	Quarz 2-16 mm	Würfel	45	
4				Zylinder	-	
5		„Quarz 32“	Quarz 2-32 mm	Würfel	45	
6				Zylinder	-	
7	Einfluss der Versuchswiederholung prüfen	„Quarz 16 W“	Quarz 2-16 mm	Würfel	45	18
8						
9						
10	Einfluss der Prüfkörperanordnung prüfen	„Quarz 16 L“		Zylinder	-	

Weiterhin war zu prüfen, ob mit der verwendeten Verschleißtrommel eine zufriedenstellende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse erzielt werden kann (Wiederholungsprüfung). Darüber hinaus wurde auch untersucht, ob die Prüfkörperanordnung innerhalb der Verschleißtrommel einen signifikanten Einfluss auf den gemessenen Betonverschleiß ausübt (Lageprüfung).

Für die Vorversuche wurden Proben aus Portlandzementbeton mit einem projektierten Wasserzementwert von etwa 0,6 hergestellt. Die Betonfestigkeit betrug ca. $f_{cm, cube} = 40 \text{ N/mm}^2$. Als Gesteinskörnung wurde Rheinsand und -kies entsprechend der Sieblinie A/B verwendet. Die Verschleißversuche wurden bei einem Probenalter von 28 Tagen durchgeführt. Die würfelförmigen Betonprüfkörper besaßen eine Kantenlänge von 100 mm, die zylinderförmigen Körper hatten einen Durchmesser und eine Höhe von jeweils 100 mm. Der an den Betonprüfkörpern erzeugte Hydroabrasionsverschleiß wurde als Masseverlust ermittelt. In Abbildung 2 sind exemplarisch die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen gemäß Tabelle 1 zu sehen.

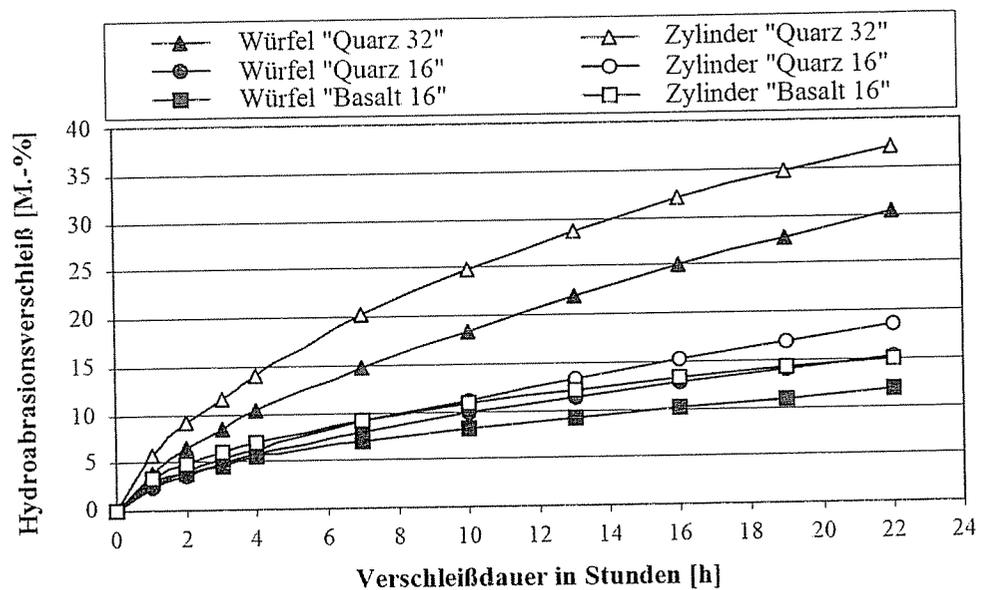


Abbildung 2: Experimentell ermittelte Verschleiß-Zeit-Verläufe (Versuche Nr. 1 bis Nr. 6 gemäß Tabelle 1)

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die ermittelten Kurven der Verschleiß-Zeit-Verläufe stetig sind. Der Betonverschleiß ist umso größer, je größer das Gesteinskorn des Verschleißstoffes ist. Des Weiteren ist der ermittelte Betonabtrag an den zylinderförmigen Prüfkörpern i. d. R. höher als bei den würfelförmigen Körpern.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch Fotos von würfelförmigen Prüfkörpern, die bis zu 22 Stunden einer hydroabrasiven Beanspruchung ausgesetzt waren. Es ist zu erkennen, dass nach der ersten Stunde der Verschleißbeanspruchung die randnahe Zementschicht abgetragen wurde und die Gesteinskörnung zum Vorschein kommt. Am Ende des Verschleißversuches (22. Stunde) war der Zementstein zwischen der Gesteinskörnung derart abgetragen, dass einzelne Körner aus dem Verbund herausgelöst wurden. Anhand dieser Ergebnisse konnte sicherge-

stellt werden, dass der beim Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen auftretende Schädigungsmechanismus mit der entwickelten Prüfvorrichtung wirklichkeitsnah abgebildet werden kann.

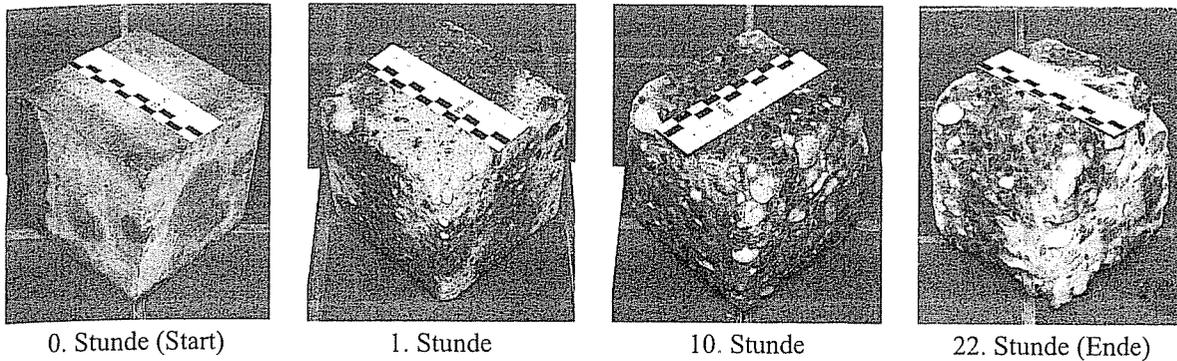


Abbildung 3: Betonabtrag an würfelförmigen Prüfkörpern (Versuch Nr. 3 gemäß Tabelle 1)

Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Wiederholungsversuche (3 identische Versuche) zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Hydroabrasionsverschleißes.

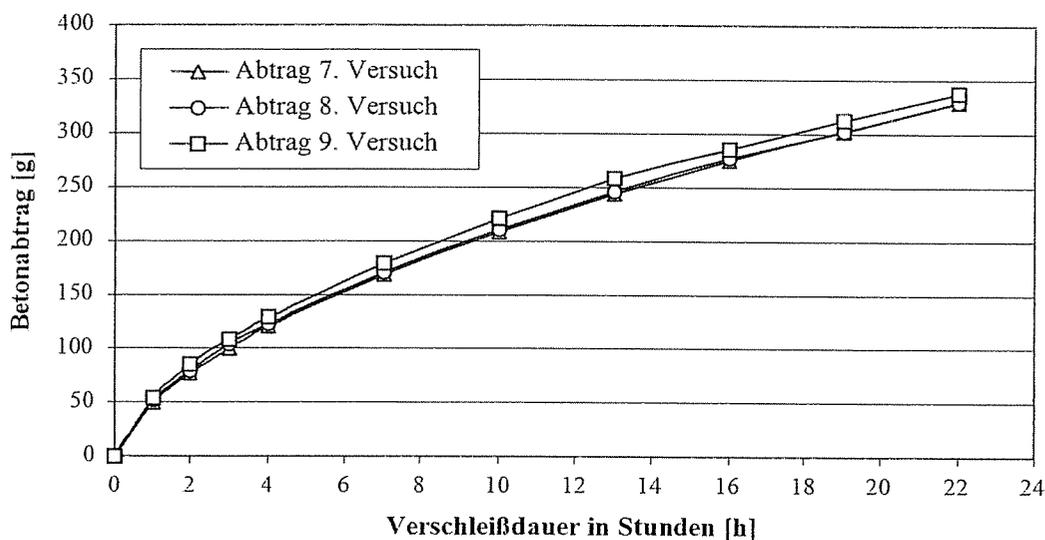


Abbildung 4: Verschleiß-Zeit-Verläufe der Versuche Nr. 7 bis Nr. 9 gemäß Tabelle 1 (Wiederholungsversuche)

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, sind drei nahezu identische Verschleiß-Zeit-Verläufe zu verzeichnen, so dass die vorliegenden geringen Unterschiede hinsichtlich des gemessenen Betonabtrags lediglich auf natürliche Streuungen zurückzuführen sind. Diese Hypothese wurde mittels geeigneten statistischen Testmethoden bestätigt, u. a. mittels Varianzanalyse, siehe dazu *Sachs & Hedderich (2006)*. Eine Analoge Vorgehensweise wurde bei den Versuchen zur Lageprüfung durchgeführt (Versuch Nr. 10).

2.3 Schlussfolgerungen aus den Voruntersuchungen

Im Ergebnis der Vorversuche kann festgehalten werden, dass die Verschleißversuche mit den zylindrischen Prüfkörpern in Verbindung mit dem Verschleißstoff aus Quarz, bestehend aus den Fraktionen 2/4 mm, 4/8 mm und 8/16 mm, die geringsten Streuungen hinsichtlich des zu ermittelten Betonabtrags aufwiesen. Des Weiteren hat die statistische Überprüfung der einzelnen Versuchsergebnisse gezeigt, dass die aufgetretenen Unterschiede bezüglich des gemessenen Betonabtrags lediglich auf natürliche Streuungen zurückzuführen sind und keine statistische Signifikanz aufweisen.

3 Identifizierung verschleißrelevanter Betonkennwerte

Zur Identifizierung der verschleißrelevanten Betonkennwerte wurden an typischen Wasserbaubetonen unter Verwendung der entwickelten Prüfvorrichtung umfangreiche Verschleißversuche durchgeführt. Parallel dazu wurden entsprechende Festbetonuntersuchungen an den hergestellten Betonen vorgenommen. Mittels multivariater statistischer Analysemethoden wurden diejenigen Betonkennwerte ermittelt, die mit dem gemessenen Betonabtrag am besten korrelierten.

3.1 Betonzusammensetzung

Für die Ermittlung der maßgebenden Kennwerte wurden Proben aus Portlandzementbeton (CEM I 32,5 R) und Hochofenzementbeton (CEM III/B 32,5 R) verwendet. Die Betone wurden mit Wasserzementwerten von 0,35 bis 0,65 hergestellt. Des Weiteren wurden fünf unterschiedliche Sieblinien A16, A16SP (SP: mit gebrochenem Korn), A32, B16 und U16 eingesetzt. Darüber hinaus wurde bei der Betonherstellung einerseits das Leimvolumen konstant gehalten, andererseits wurde es variiert. Die Herstellung umfasste schließlich 36 ausgewählte Betone für die durchzuführenden Verschleiß- und Festbetonuntersuchungen.

3.2 Experimentelle Untersuchungen (Hauptuntersuchungen)

Die Verschleißversuche wurden unter den im Punkt 2.1 genannten Randbedingungen durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug wiederum 22 Stunden. Die Beanspruchungsenergie ergab sich zu etwa 3900 J/m^3 . Bei den zylinderförmigen Verschleißprüfkörpern wurde der Masseverlust in Gramm ermittelt. Zu den un-

tersuchten Betonkennwerten gehörten u. a. Druck-, Biegezug-, Spaltzug- und Haftzugfestigkeit, Schmidt-Hammer-Kennwert, statischer und dynamischer Elastizitätsmodul, Bruchenergie sowie diverse Porenstrukturkennwerte.

3.3 Statistische Untersuchungen

Abbildung 5 zeigt exemplarisch ein Ergebnis der multivariaten Analysen hinsichtlich der untersuchten Betone, siehe hierzu *R Development Core Team (2007)* sowie *Sachs & Hedderich (2006)*. Hierbei wurde u. a. die Methode der Kovarianzanalyse angewandt, um den Einfluss metrischer (z. B. Druckfestigkeit) und kategorialer (z. B. Zusammensetzung der Gesteinskörnung oder Zementart) Kovariablen zu berücksichtigen.

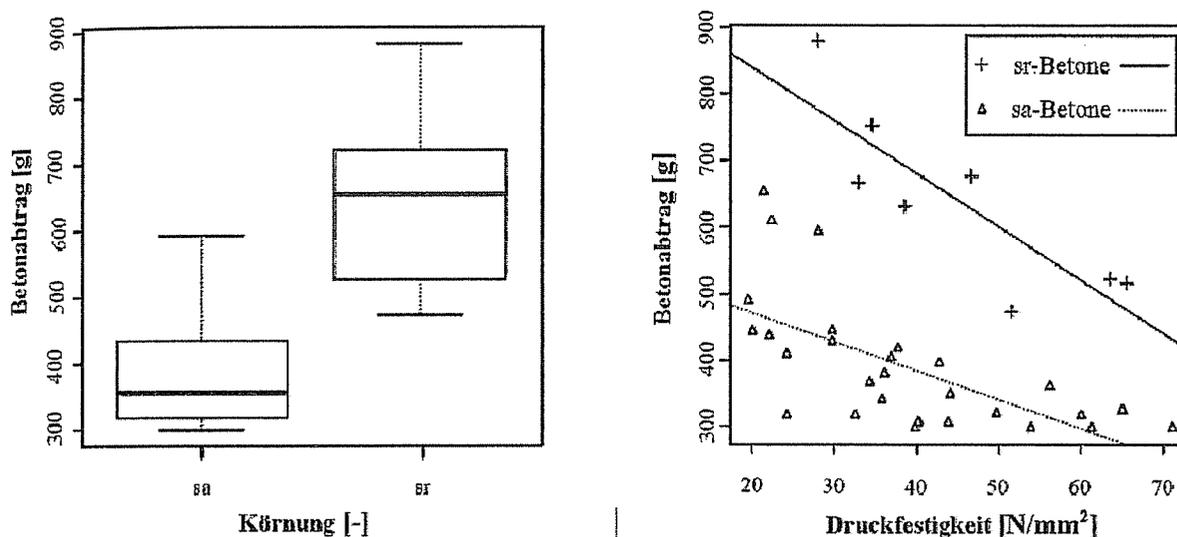


Abbildung 5: Betonabtrag in Anhängigkeit von der Gesteinskörnung (siehe Boxplot links); Betonabtrag in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit und von der Gesteinskörnung (siehe lineare Regression rechts; sr: sandreich, sa: sandarm)

Eine zentrale Einflussgröße auf den Verschleißwiderstand von Beton ist die Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs, siehe Bild 5 (links). Im Gegensatz zu sandarmen Betonen (sa) weisen sandreiche Betone (sr) bei gleicher Druckfestigkeit einen höheren Betonabtrag auf, siehe Abbildung 5 (rechts). Anhand der Kovarianzanalyse wurde deutlich, dass die untersuchten kategorialen Kovariablen einen signifikanten Einfluss auf den Betonverschleiß ausüben, der entsprechend bei der statistischen Modellierung berücksichtigt werden musste. Im Rahmen der statistischen Analysen wurden daher vorhandene Interaktionen zwischen metrischen und kategorialen Variablen in Form von Interaktionstermen berücksichtigt.

3.4 Schlussfolgerungen aus den Hauptuntersuchungen

Das Produkt aus Betondruckfestigkeit und dynamischem Elastizitätsmodul bildet einen neuen Materialkennwert M_k , siehe Gleichung (1).

$$M_k = f_{cm} \cdot \text{dyn } E_L \quad (1)$$

Die Spannweite des Materialkennwertes M_k reicht von $0,7 \cdot 10^6 \cdot \text{N}^2/\text{mm}^4$ bis $2,6 \cdot 10^6 \cdot \text{N}^2/\text{mm}^4$. Unter Verwendung des identifizierten Materialkennwertes M_k kann eine wirklichkeitsnahe Beurteilung bezüglich der Verschleißwiderstandsfähigkeit von Beton durchgeführt werden. Weiterhin wurde mit diesem Kennwert eine solide Grundlage für eine wirklichkeitsnahe Schädigungsmodellierung geschaffen.

4 Schädigungsmodell zur Beschreibung des Hydroabrasionsverschleißes

Im Nachfolgenden wird das entwickelte Modell zur Beschreibung des zeitabhängigen Schädigungsfortschritts für verschleißbeanspruchte Betonoberflächen aufgezeigt. Die Grundlagen zur Modellbildung lieferten die im vorangegangenen Kapitel 3 dargestellten Ergebnisse der experimentellen und theoretischen Untersuchungen. Unter Verwendung dieser Versuchsdaten konnte ein empirisches Schädigungsmodell hergeleitet werden, das die maßgebenden Parameter aus Beanspruchungsdauer und -energie sowie Materialwiderstand beinhaltet, siehe Gleichung (2).

$$S_m(t_{\text{eff}}) = \frac{1}{\rho_B} \cdot \frac{A}{M_k^{|\Gamma|}} \cdot t_{\text{eff}}^\Gamma \cdot \tau \quad (2)$$

$S_m(t_{\text{eff}})$	effektiver tiefenbezogener zeitabhängiger Betonabtrag [dm]
ρ_B	Betonrohddichte [g/dm^3]
M_k	Materialkennwert $10^6[\text{N}^2/\text{mm}^4]$
Γ	Regressionskoeffizient [-]; (hier: 0,42)
$A, \Gamma $	Regressionskoeffizienten [-] in Anhängigkeit von der Energie E
t_{eff}	effektive Beanspruchungsdauer pro Jahr [h]
τ	Faktor [-] zur Berücksichtigung des Anprallwinkels α

Mit Hilfe des Modells gemäß Gl. (2) kann der bei Hydroabrasionsverschleiß auftretende Schädigungsfortschritt an Betonoberflächen im Wasserbau rechnerisch ermittelt werden. Somit kann in Erweiterung zum deskriptiven Bemes-

sungskonzept, wie es u. a. in der *DIN EN 206-1 (2001)* und in der *DIN 1045-2 (2008)* verankert ist, ein Performancekonzept zur Quantifizierung der Dauerhaftigkeit verschleißbeanspruchter Betonbauteile im Wasserbau realisiert werden.

Wird dieses Schädigungsmodell in ein Wahrscheinlichkeitstheoretisches Konzept eingebettet, ist die Voraussetzung zur Durchführung probabilistischer Lebensdauerprognosen gegeben, siehe hierzu *fib Bulletin 34 (2006)*. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist, dass sämtliche Modellparameter in Gl. (2) hinsichtlich ihrer statistischen Kennwerte (u. a. Mittelwert, Variationskoeffizient, Art der Verteilungsfunktion) bekannt sind. Systematische Untersuchungen an wasserbaulichen Anlagen zur Kennwertermittlung (u. a. Feststoffgehalt, Anprallwinkel) im Hinblick auf die Hydroabrasionsbeanspruchung wurden bislang nur unzureichend durchgeführt, siehe z. B. *Jacobs et al. (2001)*.

5 Schlussbemerkungen

In diesem Beitrag wurden experimentelle und analytische Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Betonoberflächen wasserbaulicher Anlagen unter hydroabrasiver Beanspruchung vorgestellt. Sie dienten der Entwicklung einer neuen Verschleißprüfvorrichtung (Karlsruher Verschleißtrommel) zur wirklichkeitsnahen Simulation des Hydroabrasionsverschleißes und zur Identifizierung der verschleißrelevanten Materialkennwerte.

Auf der Basis der Ergebnisse der experimentellen und analytischen Untersuchungen wurde ein Schädigungsmodell zur Beschreibung des zeitabhängigen Schädigungsfortschritts für verschleißbeanspruchte Betonoberflächen erarbeitet. Unter Anwendung dieses Modells sowie der Kenntnis der (statistisch aufbereiteten) Modellparameter können probabilistische Lebensdauerprognosen unter Angabe von grenzzustandsbezogenen Versagenswahrscheinlichkeiten für verschleißbeanspruchte Betonoberflächen im Wasserbau durchgeführt werden.

Weiterführende Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet des Hydroabrasionsverschleißes von Betonoberflächen im Wasserbau sind aufgrund der vorgestellten Komplexität dieser Thematik unerlässlich.

6 Literatur

- ACI Committee 210 (1987): Erosion of Concrete in Hydraulic Structures – ACI 210R-87. ACI Materials Journal, March – April 1987
- ASTM 799/C 779M-00 (2000): Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces
- ASTM C 418-98 (1998): Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting
- Bania, A. (1989): Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinsstoff-Wassergemisches. Wismar, Dissertation
- DIN EN 206-1 (2001): Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften und Konformität, Deutsche Fassung EN 206-1: 2000, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 1045-2 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- fib* Bulletin 34 (2006): Model Code for Service Life Design. ISBN 2-88394-074-6
- Haroske, G. (2000): Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 511, Beuth Verlag
- Helbig, U., Horlacher, H.-B. (2007): Ein Approximationsverfahren zur rechnerischen Bestimmung des Hydroabrasionsverschleißes an überströmten Betonoberflächen. Bautechnik 84, Heft 12, S. 854-861
- Jacobs, F., Winkler, K., Hunkeler, F., Volkart, P. (2001): Betonabration im Wasserbau – Grundlagen/Feldversuche/Empfehlungen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Hochschule Zürich
- Liu, Y.-W., Yen, T., Hsu, T.-H. (2006): Abrasion erosion of concrete by water-borne sand. Cement and Concrete Research 36, S. 1814-1820
- R Development Core Team (2007): R, A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Sachs, L., Hedderich, J. (2006): Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R. 12. Auflage, Springer Verlag

Autoren:

Dipl.-Ing. Michael Vogel

Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller

Institut für Massivbau und
Baustofftechnologie (IMB)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe

Institut für Massivbau und
Baustofftechnologie (IMB)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 608 47695
Fax: +49 721 608 47796
E-Mail: michael.vogel@mpa-karlsruhe.de

Tel.: +49 721 608 43890
Fax: +49 721 608 48400
E-Mail: hsm@mpa.kit.edu