

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Müller, Harald; Kvitsel, V.

Innovative Betoninstandsetzung an russischen Wasserbauwerken

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102070>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

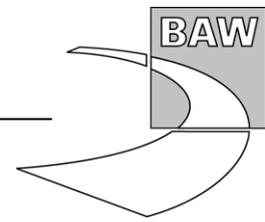
Müller, Harald; Kvitsel, V. (2009): Innovative Betoninstandsetzung an russischen Wasserbauwerken. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Baustoffe und Bauausführung im Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 47-55.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, Dipl.-Ing. V. Kvitsel, Dipl.-Ing. M. Vogel
Karlsruher Institut für Technologie KIT

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe

Innovative Betoninstandsetzung an russischen Wasserbauwerken

1 Einleitung

Wasserbauwerke aus Beton sind im Gegensatz zu üblichen Ingenieurbauwerken besonders starken Umweltbeanspruchungen ausgesetzt. Diese führen im Verlauf der Nutzungsphase unweigerlich zu wasserbauspezifischen Schäden an exponierten Bauteilen und beeinträchtigen maßgeblich die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks. Wegen den außergewöhnlichen Randbedingungen erfordert die Ertüchtigung von Wasserbauwerken aus Beton eine besonders umfassende Schadensanalyse zur zielsicheren Erarbeitung eines angepassten und dauerhaften Instandsetzungskonzeptes.

Vor diesem Hintergrund erfolgt im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten „Wolga-Rhein-Verbundprojektes zur Wassergüte- und Wassermengenbewirtschaftung an Wolga und Rhein“ [1] neben der Erarbeitung einer Methodik zur Lebensdauerprognose für Wasserbauwerke insbesondere die Entwicklung von dauerhaften Instandsetzungswerkstoffen sowie innovativen Betoninstandsetzungsverfahren. Dabei konnte im Zuge von umfangreichen Großversuchen am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie ein innovatives Verfahren zur Betoninstandsetzung entwickelt werden, welches eine Bauteilertüchtigung unter Wasser bzw. im Wasserwechselbereich, also ohne die übliche Absenkung des Wasserspiegels, erlaubt. Auch dieses Instandsetzungsverfahren wird im Folgenden näher betrachtet.

2 Bauwerksuntersuchungen

2.1 Konzeption und Wasserbauwerke

Vorrangiges Ziel einer systematischen Bauwerksinspektion ist das rechtzeitige Erkennen von sich ankündigenden Bauwerksschäden und eine bauwerksgerechte Instandhaltungsplanung. Eine aussagekräftige Bauwerks- bzw. Schadensanalyse an Wasserbauwerken erfordert umfangreiche Bauwerksuntersuchungen, wobei die Anwendung moderner Prüf- und Diagnoseverfahren für eine detaillierte Bestandsaufnahme unumgänglich ist. Darüber hinaus müssen zur Bestimmung wichtiger Materialeigenschaften Proben vor Ort entnommen und im Labor eingehenden Prüfungen unterzogen werden.

Im Rahmen des deutsch-russischen Verbundprojektes wurden in Zusammenarbeit mit russischen Projektpartnern die Wasserkraftanlagen „Wolzhskaja“ und „Saratov“ für eingehende technisch-wissenschaftliche Bauwerksuntersuchungen ausgewählt, siehe Abbildung 1.

Das im Jahr 1961 in Betrieb genommene Wasserkraftwerk „Wolzhskaja“ liegt nördlich der Stadt Wolgograd. Die insgesamt 4,9 km lange Anlage umfasst u. a. ein 664 m langes Kraftwerkhaus, das in 11 Sektoren mit je zwei Turbinen und Generatoren unterteilt ist. Zum Was-

serkraftkomplex gehören weiterhin eine 725 m lange Wehranlage mit 27 Überläufen sowie ein in drei Bereiche unterteilter Erddamm mit einer Länge von insgesamt 3250 m. Zwei Schleusen stellen den Schiffsverkehr auf der Wolga sicher. Über den Damm führen eine Straße und eine Eisenbahnlinie. Bei diesem Bauwerkskomplex handelt es sich um das größte Wasserkraftwerk Europas mit einer Leistung von 2500 MW.

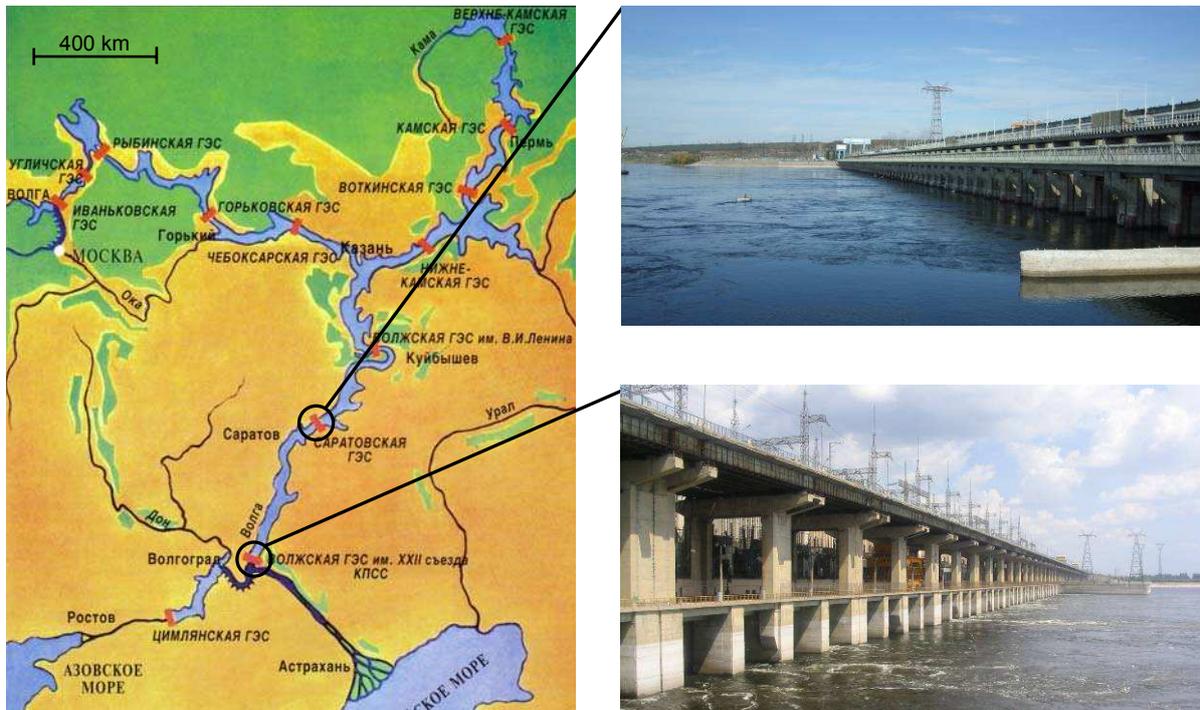
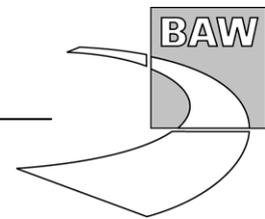


Abb. 1: Wolgaverlauf und Wasserkraftwerke; links: Übersicht über die Kraftwerke an der Wolga-Kama-Kaskade; rechts: Wasserkraftwerke „Saratov“ (oben) und „Wolzhszkaja“ (unten)

Die Wasserkraftanlage „Saratov“, die im Jahr 1968 in Betrieb genommen wurde, befindet sich nahe der Stadt Balakovo. Zum Wasserkraftkomplex gehören ein Stausee, der eine Gesamtfläche von etwa 2000 km² umfasst, zwei Schiffschleusen sowie ein Kraftwerk. In dem ca. 1,2 km langen Wasserkraftgebäude sind insgesamt 24 Turbinen mit einer Gesamtleistung von 1360 MW installiert, siehe Abbildung 1. Über den Damm führt eine einspurige Straße und eine Eisenbahnlinie.

2.2 Vor-Ort-Untersuchungen

Aufgrund der Größe und Komplexität des Wasserkraftwerks „Wolzhszkaja“ war es notwendig, die Vor-Ort-Untersuchungen auf die maßgeblichen Problembereiche zu beschränken. Zu diesen Bereichen gehören insbesondere die Wehranlage sowie weitere Bauteile im Bereich der Wasserwechselzone (z. B. Stauwände und Kaianlagen). Hinsichtlich der Schadensanalyse am Wasserkraftwerk „Wolzhszkaja“ sind im besonderen Maß die durchgeführten Arbeiten an der Wehranlage hervorzuheben. Die untersuchten Bauteile der Anlage – insbesondere der Wehrüberlauf und der Wehrpfeiler – unterliegen einer starken und komplexen Beanspruchung, die u. a. Frostbeanspruchung und Erosion beinhaltet, siehe Abbildung 2.



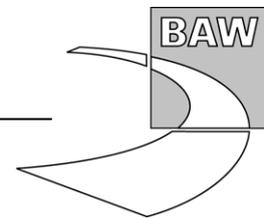
Tab. 1: Überblick über die Vor-Ort-Untersuchungen

Methoden/Verfahren der Vor-Ort-Untersuchungen
1. Erfassung der Konstruktion (Tragsystem, Fugenausbildungen und -verläufe, etc.)
2. Inaugenscheinnahme der Bauteile, Beurteilung der Zustände der Bauteiloberflächen
3. Vermessung der Erosions- und Ausbruchstellen der Bauteiloberflächen
4. Erfassung der Hohllagen durch Abklopfen der Bauteiloberflächen
5. Ultraschall-Messungen zur Beurteilung der Gefügequalität der Betonrandzonen
6. Rückprallhammerprüfungen zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften der Betonrandzone
7. Bestimmung der Ritzbreite/Härte der Betonrandzone
8. Bestimmung der Karbonatisierungstiefe
9. Ortung der Bewehrung und anderer Stahlteile (Betondeckungen, Stababstände, usw.)
10. Örtliches Freilegen der Bewehrung und Beurteilung des Korrosionsstandes der Bewehrung sowie des Verbundes zwischen Bewehrung und Beton
11. Entnahme von Proben (Bohrkerne u. a.)

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurden aus verschiedenen Bauteilen Betonbohrkerne entnommen und in den Laboratorien des Instituts bzw. der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA) in Karlsruhe zahlreichen Prüfungen unterzogen.

3 Entwicklung und Optimierung von Reparaturwerkstoffen

Die folgende Tabelle 2 zeigt exemplarisch die in den Bauwerksuntersuchungen am Wasserkraftwerk „Wolzhskaja“ ermittelte Bandbreite einiger Betonkennwerte, die für die Festlegung des an die Instandsetzungswerkstoffe zu stellenden Anforderungsprofils besonders wichtig sind.



Tab. 2: Mechanische und hygrische Kennwerte des Bauwerksbetons (Kraftwerk „Wolzskaja“)

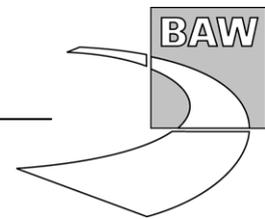
Betonkennwerte	Einheit	Kleinstwert	GrößtWert	Mittelwert
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	22	65	45
Oberflächenzugfestigkeit ¹⁾	[N/mm ²]	2,3	3,5	3,0
Dynamischer E-Modul (Dehnresonanzfrequenzmessung)	[N/mm ²]	20.000	37.000	27.000
Statischer E-Modul ²⁾	[N/mm ²]	8.000	32.000	17.500
Wasseraufnahmekoeffizient (W ₂₄)	[kg/(m ² h ^{0,5})]	0,03	1,7	0,79
¹⁾ Abgeschätzt aus der experimentell ermittelten Druckfestigkeit ²⁾ Abgeschätzt aus dem experimentell ermittelten dynamischen E-Modul				

Aufgrund der großen Schwankungen bezüglich der ermittelten Materialkennwerte war es zielführend, eine Palette von mindestens drei Reparaturwerkstoffen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zu entwickeln. Hierbei erschienen die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul des Bauwerksbetons sowie des Instandsetzungswerkstoffes als geeignete und maßgebliche Kennwerte, da sie u. a. auch von besonderer Bedeutung für die Erzielung eines dauerhaften Verbundes zwischen Bauteilbeton und Reparaturwerkstoff sind.

Sowohl im Hinblick auf die Sicherstellung einer Mitwirkung der Reparaturstelle an der Lastabtragung als auch im Hinblick auf die mechanische Verträglichkeit von Bauwerksbeton und Reparaturmaterial ist es wichtig, dass die Festigkeit und der Elastizitätsmodul des alten und des neuen Materials annähernd gleich sind. Vor diesem Hintergrund war die Entwicklung von Werkstoffen erforderlich, die aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften in die Gruppen „weich“, „normal“ und „steif“ eingeordnet werden können, siehe Tabelle 3.

Tab. 3: Richtwerte für die anzustrebenden mechanischen Eigenschaften des Reparaturwerkstoffes

Eigenschaften des Reparaturwerkstoffes	Einheit	Werkstoffgruppe (Kurzbezeichnung)		
		„weich“	„normal“	„steif“
Druckfestigkeit ¹⁾	[N/mm ²]	ca. 10	ca. 25	ca. 50
Zugfestigkeit ²⁾	[N/mm ²]	max. 2	max. 3	max. 5
Statischer E-Modul ³⁾	[kN/mm ²]	15 bis 25	25 bis 35	35 bis 40
Dynamischer E-Modul ⁴⁾	[kN/mm ²]	15 bis 30	30 bis 40	40 bis 45
¹⁾ Ermittelt an Würfeln der Kantenlänge 150 mm ²⁾ Ermittelt oder angegeben als zentrische Zugfestigkeit		³⁾ Ermittelt an Zylindern ⁴⁾ Ermittelt in Dehnresonanzfrequenzmessungen		



In Zusammenarbeit mit dem deutschen Industriepartner MC Bauchemie wurde auf der Grundlage von Ergebnissen der Vor-Ort- und Laboruntersuchungen – insbesondere auch unter Berücksichtigung der starken vorgefundenen Frostschäden am Konstruktionsbeton – dauerhafte Reparaturwerkstoffe entwickelt. Die Eignung dieser Werkstoffe für den Einsatz im Wasserbau konnte im Rahmen intensiver Vorversuche nachgewiesen werden.

Neben den dauerhaftigkeitsrelevanten Anforderungen an die Reparaturwerkstoffe musste auch den Anforderungen in Bezug auf die Verarbeitung, die Pumpfähigkeit und Verdichtungswilligkeit der Werkstoffe Rechnung getragen werden. Wie bereits erläutert war bei der Entwicklung des Reparaturwerkstoffs ein besonderes Augenmerk auf die Anpassung seiner Eigenschaften auf jene des vorliegenden Bauwerksbetons zu legen. Weiterhin musste die Werkstoffmischung robust sein, so dass sie auch mit den Betonausgangsstoffen vor Ort in Russland zielsicher hergestellt werden kann.

Nachdem der entwickelte Reparaturwerkstoff in einem ersten Großversuch erfolgreich eingesetzt werden konnte, erfolgte in einem zweiten Schritt die Werkstoffoptimierung. Dabei wurden umfangreiche Frischbetonuntersuchungen an Reparaturbetonen vorgenommen. Ziel dieser Optimierungsarbeiten war es, neben der exemplarischen Durchführung einer Instandsetzungsmaßnahme an großformatigen Betonbauteilen, die in der Materialprüfungsanstalt Karlsruhe erfolgte, auch die Anwendung der entwickelten Reparaturwerkstoffe in Verbindung mit der innovativen Instandsetzung unter Wasser an realen Bauteilen bei wasserbaulichen Anlagen in Russland und Deutschland zu ermöglichen.

4 Entwicklung des innovativen Instandsetzungskonzepts

4.1 Versuchskonzeption und Durchführung

Ziel war die Entwicklung eines Verfahrens zur Betoninstandsetzung im Wasserbau, welches eine Betonertüchtigung unter Wasser bzw. im Wasserwechselbereich erlaubt. Für die hier vorgesehenen Großversuche wurden Betonprobekörper mit Aussparungen zur Nachahmung der geschädigten Bauwerksbereiche hergestellt, siehe Abbildung 4 (links). Der Aufbau und die betontechnische Zusammensetzung der Probekörper erfolgten in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie [2].

Zunächst wurden Probekörper mit einer Länge von 1,25 m und einer Höhe von 1,35 m hergestellt, die hinsichtlich der Ausbruchtiefe, des Ausbruchwinkels sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Ausbruchsbereichs variierten, siehe Abbildung 4 (links). Mit Hilfe einer speziellen Schalung (Abbildung 4, Mitte) wurde die Aussparung des Probekörpers, der sich während des Versuches mit ca. 2/3 seiner Höhe unter Wasser befand, mittels einer Betonpumpe von unten nach oben mit Beton verfüllt, siehe Abbildung 4 (Mitte).



Abb. 4: Probekörper für Großversuche; Probekörper mit Aussparung – Simulation einer Ausbruchsstelle – (links); eingeschalter Probekörper mit spezieller Schalung, die Öffnungen aufweist (Mitte); ausgeschalter Probekörper mit Kernbohrungen für weitere Untersuchungen (rechts)

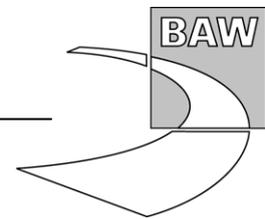
Die nachstehende Abbildung 5 zeigt die Durchführung der Großversuche unter Verwendung der genannten Probekörper. Dargestellt sind vier mit Aussparungen versehene Betonkörper, welche in einem Wasserbecken – zur Simulation der Bedingungen in der Wasserwechselzone sowie im Unterwasserbereich – instand zu setzen waren.

Beim Betoniervorgang wird der Reparaturbeton nach dem Anbringen und Abdichten der speziellen Schalung durch einen Einfüllstutzen im unteren Bereich der Schalung (unter Wasser) eingepumpt, wobei der im Sanierungsbereich aufsteigende Beton das dort befindliche Wasser verdrängt.



Abb. 5: Durchführung der Großversuche in den Hallen der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe

Das mit zunehmender Verfüllung verdrängte Wasser fließt durch die Entlüftungsöffnungen, die in der Schalung oberhalb der Aussparung angebracht sind, nach außen ab. Das Herausfließen des Reparaturbetons durch diese Öffnungen zeigt an, dass der Beton den instand zu set-



zenden Bereich vollständig ausgefüllt hat. Damit sollten einerseits ein guter Verbund zwischen Probekörper bzw. Alt- und Reparaturbeton gewährleistet und andererseits Fehlstellen innerhalb des Reparaturbetons minimiert werden. Zur Sicherstellung dieser Anforderungen, muss der verwendete Reparaturbeton im Wesentlichen drei Eigenschaften aufweisen: Er muss sich selbst verdichten, fließfähig sein und eine hohe Kohäsion besitzen.



Abb. 6: Großversuche mit großen Probekörpern; vor (links) und nach der Instandsetzung (rechts)

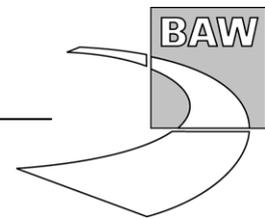
Um erste Rückschlüsse auf realisierbare Betonierabschnitte für zukünftige Instandsetzungsmaßnahmen an Wasserbauwerken ziehen zu können, wurde auch ein Großversuch mit drei in Reihe angeordneten Probekörpern mit einer Gesamtlänge von 3,75 m erfolgreich durchgeführt, siehe Abbildung 6.

4.2 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die bisher durchgeführten Großversuche zeigen zunächst, dass eine Instandsetzungsmaßnahme im Bereich von Wasserwechselzonen in der beschriebenen Weise, also unter Wasser ohne Absenkung des Wasserspiegels, bei Wasserbauwerken fertigungstechnisch gut bewerkstelligt werden kann. Somit ist es möglich, Staumauern oder Uferbefestigungen effektiv und wirtschaftlich zu reparieren, weil auf teure Begleitmaßnahmen, wie die Einschränkung des Schiffsverkehrs oder die Drosselung der Energiegewinnung, verzichtet werden kann.

Die Untersuchung der Bohrkerne ergab, dass der Reparaturwerkstoff einen guten Verbund zum Probekörperbeton aufwies. Ebenso konnte ein nahezu fehlerstellenfreier Reparaturbereich realisiert werden, siehe Abbildung 4 (rechts). Noch verbliebene kleine Fehlstellen können durch die Optimierung des Pumpvorgangs vermieden werden. Die Durchführung umfangreicher Festbetonuntersuchungen bestätigte für den Reparaturwerkstoff sehr gute mechanische und dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche als sehr viel versprechend einzustufen. Es verbleibt ein nur kleiner Optimierungsbedarf, der im Zuge weiterer Untersuchungen erarbeitet werden kann, was zur Praxisreife des entwickelten Instandsetzungsverfahrens führt.



5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen eines deutsch-russischen Verbundprojektes konnte ein innovatives Instandsetzungsverfahren erarbeitet werden, das eine Ertüchtigung von geschädigtem Stahlbeton im Bereich der Wasserwechselzone erlaubt, ohne den Wasserspiegel im Staubebereich absenken zu müssen. Damit wurde die Möglichkeit der Instandsetzung von Wasserbauwerken „unter Betrieb“, d. h. ohne größere Beeinträchtigung des Schiffsverkehrs oder der Energiegewinnung und den damit verbundenen wirtschaftlichen Einbußen, geschaffen. Im Rahmen von umfangreichen Großversuchen an der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe wurde dieses Instandsetzungsverfahren in Verbindung mit dem entwickelten Reparaturbeton erfolgreich erprobt. Der noch verbliebene Optimierungsbedarf kann als geringfügig eingestuft werden.

Eine erste Anwendung dieser innovativen Instandsetzungsmethode in der Praxis, sowohl in Russland als auch in Deutschland, steht unmittelbar bevor. Hierbei wird empfohlen, eine technisch-wissenschaftliche Begleitung der Maßnahmen vorzusehen.

Im Hinblick auf zukünftige Forschungsarbeit soll das entwickelte, ebenso innovative wie wirtschaftliche Verfahren an realen Bauteilen wasserbaulicher Anlagen in Russland und Deutschland für entsprechende Instandsetzungsmaßnahmen angewendet werden.

6 Literatur

- [1] Müller, H. S., Vogel, M.: Sanierungskonzepte für Wasserbauwerke zur Verbesserung der Betriebssicherheit (Teilprojekt IV/4). Schlussbericht zum Verbundprojekt: Wolga-Rhein-Projekt: Deutsch-russisches Kooperationsprojekt zur Wassergüte- und Wassermengenbewirtschaftung an Wolga und Rhein. Auftraggeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen 02WT0096. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [2] DAfStb Betonbauteile, Schutz/Instandsetzung, Ausgabe: 2001-10. DAfStb-Richtlinie – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie) – Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze; Teil 2: Bauprodukte und Anwendung; Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung; Teil 4: Prüfverfahren

