

### 3.3 Anlagenunterhaltung und Life-Cycle-Management

#### Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke

Dipl.-Ing. Katrin Kühni

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

#### Einleitung

Die Bundesrepublik Deutschland ist mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) Eigentümer des Bundeswasserstraßennetzes und besitzt die Verantwortung für eine große Anzahl an Infrastrukturbauwerken wie z.B. Schleusen, Wehre, Düker, Kanalbrücken und Leuchttürme. Das gesamte Anlagenvermögen beträgt rund 38,2 Mrd. €.

Um solch einen großen Bauwerksbestand wirtschaftlich instand zu halten, wurden die Weichen für ein IT-gestütztes Erhaltungsmanagementsystem (EMS-WSV) gestellt.

Zustandsdaten, basierend auf regelmäßigen Bauwerksinspektionen, und verschiedene mathematische Modelle liefern den verschiedenen Ebenen des Managements wichtige Entscheidungsinformationen.

Die sich daraus ergebenden Vorteile sind:

- Überblick über den baulichen Zustand aller Anlagen
- verlässliche Informationen zu Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen
- Kostenreduktion, Transparenz und Planungssicherheit
- Nachhaltigkeit der Verkehrswasserbauwerke und Steigerung der Verkehrssicherheit

Das Erhaltungsmanagementsystem wird gegenwärtig von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Abteilung Bautechnik, entwickelt. Die einzelnen Elemente und Vorgehensweisen werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

#### 1. Bauwerksinspektion

Die Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2101 „Bauwerksinspektion“ regelt die bautechnische Inspektion von Bauwerken, die in der Unterhaltungslast der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) stehen. Die Bauwerksinspektion umfasst die Bauwerksprüfung, die Bauwerksüberwachung und die Bauwerksbesichtigung.

Bauwerksprüfungen werden alle sechs Jahre durchgeführt. Sie sind im Wesentlichen visuelle Untersuchungen mit Hilfe von einfachen Messgeräten, um die statischen, konstruktiven und hydromechanischen Verhältnisse beurteilen zu können. Bauwerksprüfungen werden durch sachkundiges Ingenieurpersonal handnah an allen Bauteilen des Bauwerks vorgenommen, auch der schwer zugänglichen.

Bauwerksüberwachungen erfolgen drei Jahre nach jeder Bauwerksprüfung. Die Ingenieure

nutzen die Ergebnisse der vorangegangenen Bauwerksprüfung als Basis. Sie sind eine erweiterte Sichtprüfung der Bauwerke durch sachkundiges Ingenieurpersonal.

Bauwerksbesichtigungen sind die jährliche Kontrolle der Bauwerke auf offensichtliche Schäden durch sachkundiges Personal.

Für das Erhaltungsmanagementsystem werden nur die Ergebnisse der Bauwerksprüfungen und Bauwerksüberwachungen verwendet.

Die Software WSVPruf wird als Unterstützung für die Bauwerksinspektion genutzt. Schäden, die während einer Prüfung oder Überwachung erkannt wurden, werden dort einheitlich erfasst. Es ist zusätzlich möglich, zu jedem Einzelschaden maximal zwei digitale Bilder sowie einen Schadenstext (als Freitextfeld) einzubinden.

Die Eingabe der Schäden wird in Abbildung 1 gezeigt.

Nach Eingabe und Bewertung der einzelnen Schäden können strukturierte Inspektionsberichte mit Schadensdokumentation einschließlich der eingebundenen Bilder erzeugt werden.

Alle in WSVPruf hinterlegten Bauteile sind Kategorien zugeordnet. Mehrere Kategorien zusammen bilden eine Meta-Kategorie. Aktuell existieren die Meta-Kategorien Konstruktion, Stahlbau und Ausrüstung.

WSVPruf berechnet über einen Algorithmus sowohl eine Prüf- bzw. Zustandsnote für das Gesamtbauwerk als auch eine separate Note für jede Meta-Kategorie und weist diese auf den Deckblättern der Berichte separat aus. Diese Noten drücken den Handlungsbedarf am Bauwerk aus (1:guter Bauwerkszustand; 4: Handlungsbedarf).

Abbildung 1: Eingabe der Schäden in WSVPruf

### 3. Nachhaltige Erneuerung

#### Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke

Um die Ergebnisse der Bauwerksinspektion (Bauwerksprüfung und Bauwerksüberwachung) als Basis für ein Erhaltungsmanagementsystem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung nutzen zu können, musste eine Grundlage geschaffen werden, Schäden in der WSV einheitlich zu erfassen und zu bewerten.

Hierfür gelten folgende Grundsätze:

- Bei der Bauwerksinspektion sollen nur Schäden erfasst und dokumentiert werden.
- Die Schäden sollen im Hinblick auf die Tragfähigkeit und/ oder Gebrauchstauglichkeit bewertet werden.
- Ausschlaggebend für die Bewertung der Schäden ist der aktuelle Zustand zum Zeitpunkt der Bauwerksinspektion.
- Bewertet wird ein Schaden in Bezug auf das betroffene Bauteil, nicht in Bezug auf die Gesamtanlage und nicht in Bezug auf das Schadensausmaß.
- Die erfassten Schäden sind einer Schadensklasse 1-4 zuzuordnen.

Um die Qualität und die Vereinheitlichung sicherzustellen, wurde ein umfangreiches Schulungsprogramm für das Ingenieurpersonal entwickelt.

Darüber hinaus wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ein Merkblatt „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)“ erstellt, BAW, 2009.

In diesem Merkblatt werden verschiedene Schadensarten hinsichtlich ihrer Ursache und Auswirkungen beschrieben. Zusätzlich existieren einfache Ablaufdiagramme, um die jeweilige Schadensklasse einheitlich festzulegen. Ein Beispiel für ein Ablaufdiagramm wird in Abbildung 2 gezeigt.

Mit den Informationen aus WSVPruf sind viele verschiedene Berichte, aber auch ein technisches Controlling möglich. Beispielsweise lässt sich ein Überblick über alle durchgeführten Inspektionen pro Jahr auflisten, aber auch ein Überblick und damit Vergleich über den Bauwerkszustand, der beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt wird.

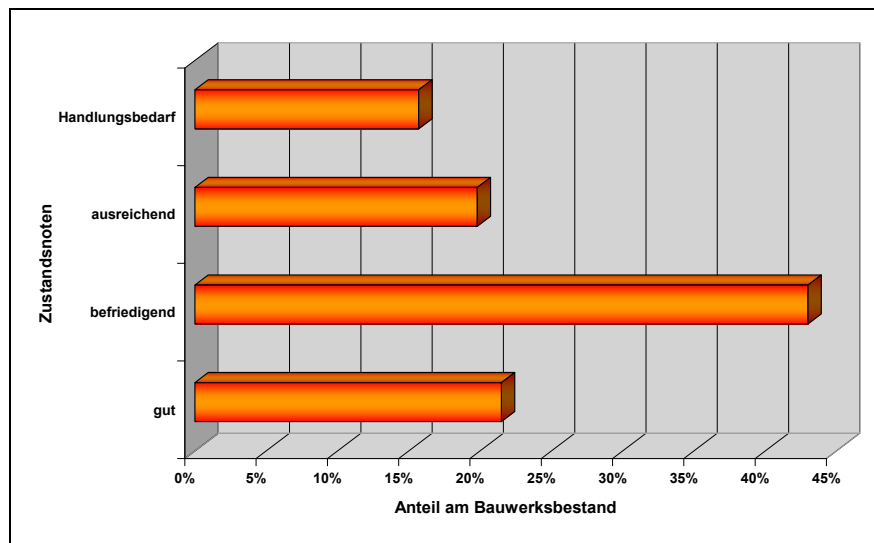


Abbildung 3: Überblick über den Bauwerkszustand (Beispiel)

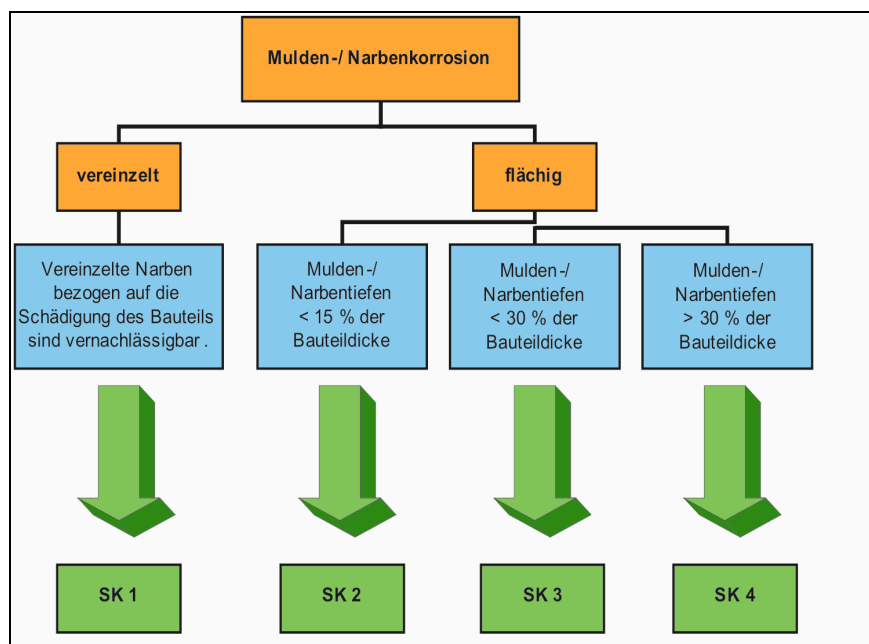


Abbildung 2: Ablaufdiagramm für den Schaden Mulden-/Narbenkorrosion

## 2. Prognosemodelle

Modelle, um den gegenwärtigen Zustand eines Bauwerks in die Zukunft zu prognostizieren, gehören zu den elementaren Bestandteilen eines Erhaltungsmanagementsystems.

Im Erhaltungsmanagementsystem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wird die zukünftige Zustandsentwicklung, basierend auf der Bauwerksinspektion, mit mathematischen Verfahren ermittelt. Diese Modelle basieren auf stochastischen Methoden: Markov-Ketten und Überlebensfunktionen.

Andrej Markov, ein russischer Mathematiker, entwickelte zu Beginn des letzten Jahrhunderts ein vergleichsweise einfaches mathematisches Modell, um Vorhersagen über zukünftige Entwicklungen zu treffen. Mit dem nach ihm benannten Markov-Ketten können bestimmte stochastische Prozesse über einen längeren Zeitraum ohne großen Aufwand betrachtet werden.

Markov-Ketten bestehen aus einer begrenzten Anzahl an Zuständen und einigen bekannten Übergangswahrscheinlichkeiten. Die Übergangswahrscheinlichkeit  $p_{ij}$  ist die Wahrscheinlichkeit für den Übergang aus dem Zustand  $i$  in den Zustand  $j$ . Die Wahrscheinlichkeit im Zustand  $i$  zu verbleiben, ist  $1-p_{ij}$ . Voraussetzung für diese Annahmen ist, dass Infrastrukturbauwerke keinen Zustand überspringen und sich ein Zustand nur verschlechtern kann, Kleiner, 2001.

Die Darstellung der Übergangswahrscheinlichkeiten erfolgt üblicherweise in Form einer Matrix. Diese wird Übergangsmatrix genannt.

Markov-Ketten sind auf Grund ihrer Flexibilität sehr gut geeignet, das Fortschreiten von begonnenen Schadensprozessen zu beschreiben. Unterschiedlichste Verfallsprozesse können einfach und flexibel abgebildet werden und das Verfahren ist bei Erkenntnisgewinn und Erfahrungszuwachs verbesser- und erweiterbar.

Für die im Rahmen der Bauwerksinspektion erfassten Schäden werden Markov-Ketten für die Prognose genutzt.

Als alleinige Grundlage reichen die Ergebnisse der Bauwerksinspektion für eine vollständige Prognose nicht aus, da nur für Bauteile, für die aktuell ein Schaden erfasst wurde, eine Prognose erstellt werden kann. Bei einer Prognose über 30 Jahre werden aber voraussichtlich auch Anlagenteile eine Verfall erfahren, die heute noch keine Schäden aufweisen.

Für ungeschädigte Bauteile wird die Prognose mit Überlebensfunktionen verwendet. Dieses Verfahren eignet sich dazu, auf aggregierter Ebene (Meta-Kategorien) den Lebenszyklus von ungeschädigten Bauteilgruppen zu erfassen.

Die zentrale Funktion ist die Überlebensfunktion

$$R(t) = P(T > t)$$

Dabei ist  $t$  eine beliebige Zeit,  $T$  ist die Zeit bis zum Ausfall (Tod), und  $P$  bezeichnet die Überlebenswahrscheinlichkeiten. Diese Funktion beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauwerk zum Zeitpunkt  $t$  noch nicht ausgefallen ist.

Die Verteilungsfunktion der Lebensdauer  $F(t)$  ist die komplementäre Funktion zur Überlebensfunktion:  $F(t) = 1 - R(t)$ . Damit kann die Wahrscheinlichkeit errechnet werden, dass ein Bauwerk vor dem Zeitpunkt  $t$  ausfällt.

Die erste Ableitung der Verteilungsfunktion der Lebensdauer ist die Wahrscheinlichkeitsdichte der Lebensdauer  $f(t)$ . Diese Funktion beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Element genau ein bestimmtes Alter erreicht.

Wird die Wahrscheinlichkeitsdichte der Lebensdauer auf die Überlebensfunktion bezogen, ergibt sich die Ausfallrate (Hazard-Funktion). Sie ist damit das Verhältnis der Ausfälle bezogen auf den noch vorhandenen Bestand.

Für Infrastrukturbauwerke ist die Herz-Verteilung sehr gut geeignet, da sie eine optimale Anpassung an die vorhandenen Zustandsdaten ermöglicht und das Verfahren zu einer konstanten Ausfallrate führt, womit einzelne Bauwerke eine sehr lange Lebensdauer erfahren können, Herz 1994.

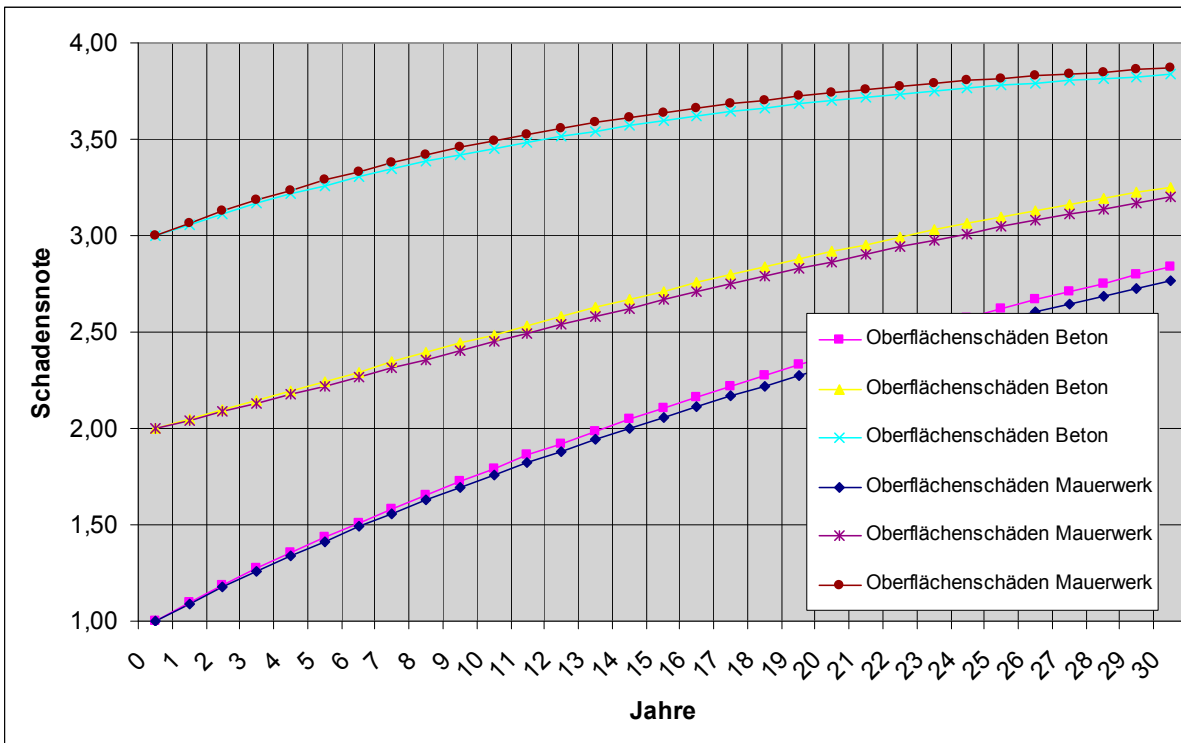
Für beide beschriebenen mathematischen Modelle sind Eingangsparameter erforderlich.

Die beste Lösung wäre die Bestimmung der Parameter aus vorhandenem Datenmaterial. Da diese jedoch nicht in umfassender Form vorhanden sind, wurde eine Expertenbefragung nach den Grundsätzen der Delphi-Methode durchgeführt, Häder 2002.

Insgesamt haben 28 Personen aus der BAW und der WSV an dieser Delphi-Befragung teilgenommen, um 14 Markov-Ketten und drei Überlebensfunktionen zu entwickeln. In einigen Fällen konnte die Anzahl der Markov-Ketten reduziert werden, da die Unterschiede in der Prognose kleiner waren als die dem Verfahren innewohnenden Unschärfe. Ein Beispiel ist in Abbildung 4 dargestellt. Ausgehend von den jeweiligen Start-Schadensnoten 1, 2 und 3 sind die Verläufe der Verfallsprozesse simuliert.

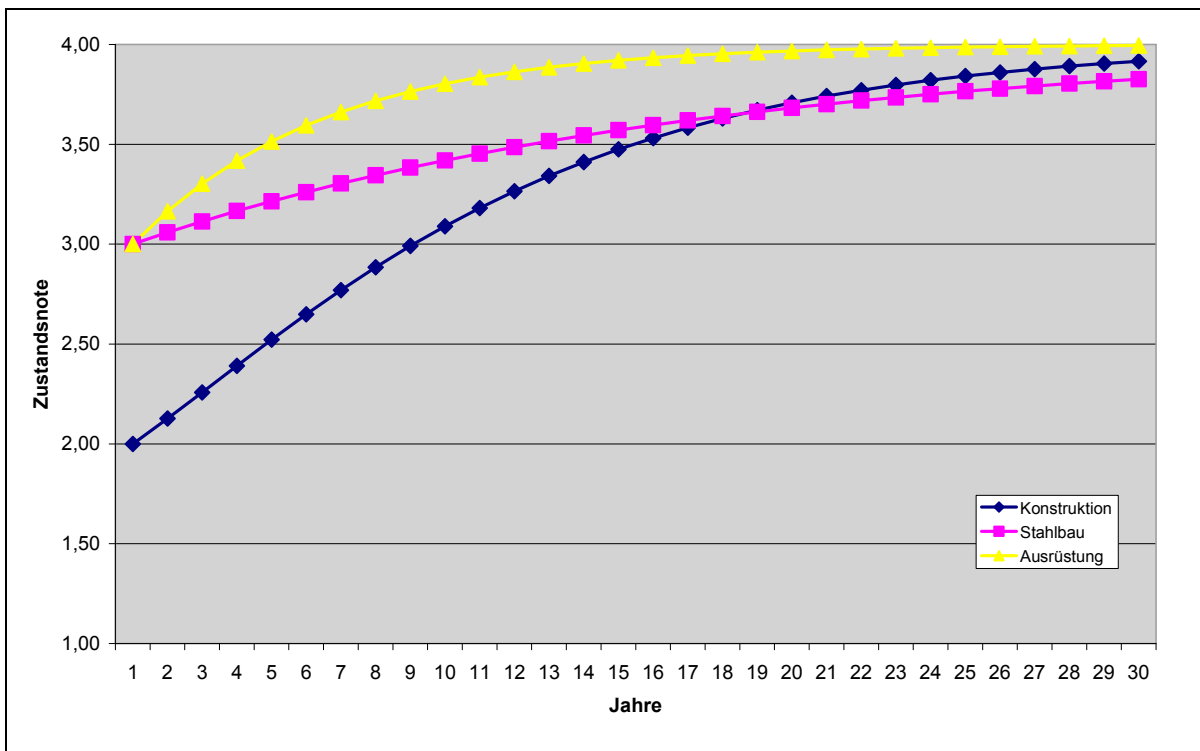
### 3. Nachhaltige Erneuerung

Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke



**Abbildung 4:** Verfallsprozesse Oberflächenschäden Beton und Mauerwerk

Aktuell besteht das Erhaltungsmanagementsystem der WSV aus zehn verschiedenen Markov-Ketten und drei Überlebensfunktionen, um die Zustandsentwicklung der Bauwerke zu prognostizieren.



**Abbildung 5:** Zustandsprognose auf Basis der Meta-Kategorien einer Beispielschleuse

### 3. Nachhaltige Erneuerung

Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke

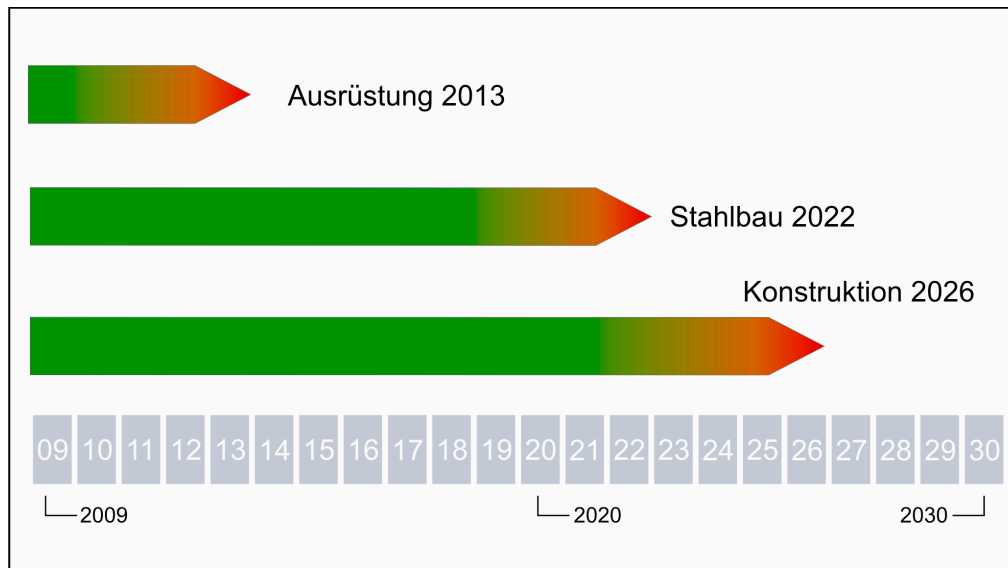


Abbildung 6: Eingreifzeitpunkte auf Basis der Meta-Kategorien einer Beispielschleuse

Das Ende der Nutzungsdauer ist aktuell durch einen Grenzwert der Zustandsnote (3,5) definiert. Risikobasierte Grenzwerte, wirtschaftliche Betrachtungen oder sonstige weitere Faktoren sind Bestandteile zukünftiger Entwicklungen.

Mit den Bestandteilen Bauwerksinspektion, Zustandsprognose und Ende der Nutzungsgrenze lässt sich der Zeitpunkt errechnen, an dem spätestens mit einer Instandhaltungsmaßnahme zu beginnen ist.

#### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Die WSV will zukünftig ein Erhaltungsmanagementsystem einsetzen, um für den wichtigen Bereich der Instandhaltung der Ingenieurbauwerke ein Werkzeug zu besitzen, das den gesamten Prozess transparenter, objektiver, übersichtlicher und effizienter gestalten lässt.

Wichtige Hilfsmittel für die Vereinheitlichung der Abläufe sowie zur Verbesserung der Qualität der Bauwerksinspektion, das Programmsystem WSVPruf, das Merkblatt „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)“ sowie das Schulungskonzept, sind bereits erarbeitet und umgesetzt worden. Das Prognosemodell für Schadensentwicklungen wurde entwickelt und die nötigen Parameter bestimmt. Auf Grund der bisher rein technischen Ausrichtung des Systems wurde zunächst eine Zustandsgrenze von 3,5 festgelegt. Für die WSV steht damit ein Prognose-Service für die Zustandsentwicklung ihrer Bauwerke zur Verfügung.

Die Bearbeitung zeichnet sich durch eine interdisziplinäre und WSV-weite Arbeitsweise aus. Durch den ständigen Kontakt mit der WSV ist gewährleistet, dass das Projekt nicht an der Praxis „vorbei entwickelt“ wird. Ergebnisse werden mit Realdaten kalibriert und verifiziert. Koordiniert wird diese Arbeit durch die Fachgruppe Erhaltungsmanagementsystem der Abteilung Bau-technik in der BAW.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Finanzmittelpassung. In einem nächsten, zukünftigen Schritt, soll durch die Verknüpfung von Schäden mit Maßnahmen und Kosten die bisher rein technische Betrachtungsweise durch eine wirtschaftliche Komponente erweitert werden.

Entwickelte Module werden dabei sukzessive in die Anwendung gehen, um möglichst früh Praxiserfahrungen zu gewinnen und die Erfahrungen in die Weiterentwicklung einfließen lassen zu können.

#### Literatur

BAW-Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2010  
[www.baw.de/vip/publikationen/merkblaetter.php.html](http://www.baw.de/vip/publikationen/merkblaetter.php.html)

Kleiner, Y.: Scheduling inspections and renewal of large infrastructure assets. Journal of infrastructure systems, Volume 7 (2001)

Herz, R.: Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen - ein Kohortenüberlebensmodell, Jahrbuch für Regionalwissenschaften, 14. Jahrgang, 1993/1994

Häder, M.: Delphi-Befragung - ein Arbeitsbuch, Westdeutscher Verlag, Wiesbaden, 2002

Kühni, Bödefeld, Kunz: EMS-WSV - Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke, Bau-technik 85, Heft 8, Ernst & Sohn Verlag, 2008

Bödefeld, Kunz: From Inspection To An Asset Managementsystem For Waterway Structures, OnCourse, PIANC Magazine n° 128

#### Verfasser

Dipl.-Ing. Katrin Kühni  
Bundesanstalt für Wasserbau  
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe  
Telefon: 0721/9726-3280  
E-Mail: [katrin.kuehni@baw.de](mailto:katrin.kuehni@baw.de)