

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Book Part, Author's Postprint

Fleischer, Helmut; Lutz, Matthias; Ehmann, Rainer Stand sicherheitsuntersuchungen und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau- Kanals

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106978>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Fleischer, Helmut; Lutz, Matthias; Ehmann, Rainer (2018): Standsicherheitsuntersuchungen und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals. In: Betonkolloquium TU Graz 2018 Graz: Verlag der TU Graz. S. 61-70.

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.



Erstveröffentlichung in Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuler, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, Graz, 20./21. September 2018, TU Graz, Österreich (2018), S. 61-70.

Für eine korrekte Zitierbarkeit ist die Seitennummerierung der Originalveröffentlichung für jede Seite kenntlich gemacht.

S. 61

Standsicherheitsuntersuchungen und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals

Dipl.-Ing. R. Ehmann, M. Lutz, H. Fleischer
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, Deutschland

Kurzfassung:

Seit mehreren Jahren wird in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe systematisch die Standsicherheit verschiedener Schifffahrtsschleusen aus Stahlbeton im Bereich der Bundeswasserstraßen untersucht. Anlass für diese teilweise sehr aufwändigen Untersuchungen sind Schadensfälle infolge Materialermüdung an einigen Bauwerken. Bei den statischen Berechnungen stellte sich bereits in einem frühen Stadium heraus, dass bei der Anwendung geläufiger Nachweismethoden und üblicher statischer Modelle erhebliche rechnerische Sicherheitsdefizite auftreten. Um das Tragwerksverhalten der Schleusenammern realitätsnäher abbilden zu können, waren Systemtraglastanalysen auf der Basis nichtlinearer Stoffgesetze notwendig. Als Grundlage hierfür wurde auf Basis der Eurocodes eine Nachweiskonzeption mit modifiziertem Sicherheitsformat entwickelt, mit der entsprechende rechnerische Sicherheitsreserven herausgearbeitet werden können. Mit der Anwendung dieser Konzeption war es möglich, drohende Betriebsstillegungen an betroffenen Schleusen des Main-Donau-Kanals weitgehend zu verhindern und erforderliche Tragwerksertüchtigungen effektiv zu planen. Die Anwendung der Nachweiskonzeption auf konkrete Bauwerke und daraus resultierende, zwischenzeitlich weitgehend ausgeführte Verstärkungsmaßnahmen werden im Beitrag vorgestellt und erläutert.

1 Einleitung

Zur Gewährleistung der Schifffahrt auf den Binnenwasserstraßen Deutschlands ist eine Vielzahl von technischen Anlagen erforderlich, wie Schleusen und Schiffshebewerke, Kanalbrücken, Durchlässe, Wehre usw. Von diesen Bauwerken nehmen die Schiffsschleusen aufgrund der besonderen Beanspruchungscharakteristik eine zentrale Rolle ein. Im Bereich der über 7000 km Bundeswasserstraßen befinden sich etwa 500 Schleusenammern. Der überwiegende Teil dieser Bauwerke wurde massiv ausgebildet; seit den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts dominiert die Stahlbetonbauweise. Besonders in den damals 1960er und 1970er Jahren sind für Wasserbauten sehr schlanke Tragwerke entstanden; typische Beispiele hierfür findet man am Main-Donau-Kanal (vgl. Abbildung 1). Der vollständig im Bundesland Bayern liegende Kanal verbindet den Main bei Bam-

berg mit der Donau bei Kelheim. Mit einer Länge von ca. 170 km überwindet er bergwärts eine Höhendifferenz von rund 175 m, um dann mit ca. 68 m Abstieg das Höhenniveau der Donau zu erreichen. Erbaut wurde der Kanal zwischen 1960 und 1992. Neben dem Gütertransport (ca. 4 Mio Gütertonnen an Schleuse Kelheim) und der Wasserüberleitung von der Donau ins Einzugsgebiet des Mains gewinnt er zunehmend Bedeutung für den Tourismus und die Fahrgastschifffahrt.

Zur Überwindung der Höhenunterschiede am Main-Donau-Kanal wurden insgesamt 16 Schleusen errichtet, die aufgrund des begrenzten Wasserdargebots im Bereich der Scheitelhaltung mittels seitlich angeordneter, terrassenförmiger Becken als Sparschleusen konzipiert wurden.

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuler, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.

S. 62

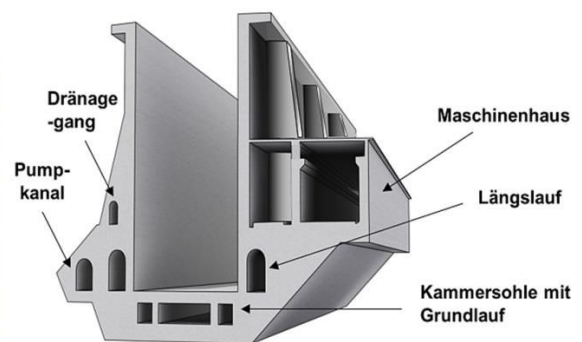


Abbildung 1: Typische Schleuse mit seitlichen Sparbecken am Main-Donau-Kanal

Im Frühjahr 2004 wurde an der östlichen Kammerwand der Schleuse Bamberg, der am weitesten nördlich liegenden Schleuse im Main-Donau-Kanal, ein Tragwerksschaden festgestellt. Das 1964 fertiggestellte Bauwerk besitzt eine 12 m breite Schleusenkammer mit einer Länge von 190 m bei einer Fallhöhe von ca. 11 m. Das Tragwerk wurde nach der Stahlbetonnorm DIN 1045 (Ausgabe 1959) statisch bemessen und mit geripptem Betonstahl III RK („Torstahl“) bewehrt. Der Schaden wurde zunächst durch starken Wasserandrang in der begehbaren Dränage der östlichen Kammerwand auffällig (Abbildung 2). Im Rahmen einer genaueren Inspektion wurde ein über mehrere Kammerblöcke verlaufender und stark klaffender Längsriß auf Höhe der Dränagegangsohle und nach Freilegung des hier angeordneten Bewehrungsstahls der komplette Bruch der Hauptbiegezugbewehrung festgestellt. Nur durch Lastumlagerungen zu weniger geschädigten Kammerblöcken hin und die vollständige Ausnutzung der relativ hohen Zugfestigkeit des Betons war es zu erklären, dass die östliche Kammerwand der Schleuse Bamberg nicht vollständig kollabierte. Bemerkenswert war die durchweg verformungsarme Ausbildung der Bruchenden, die im Gegensatz zum allgemein bekannten Bruchbild mit Querschnittseinschnürung bei statischem Versagen steht. Dies ließ frühzeitig den Verdacht aufkommen, dass der Schaden maßgeblich auf Materialermüdung (Schwin-

gungsrisskorrosion) des Betonstahls zurückzuführen war, was sich durch die genaueren Untersuchungen dann auch bestätigte (vgl. [1]).

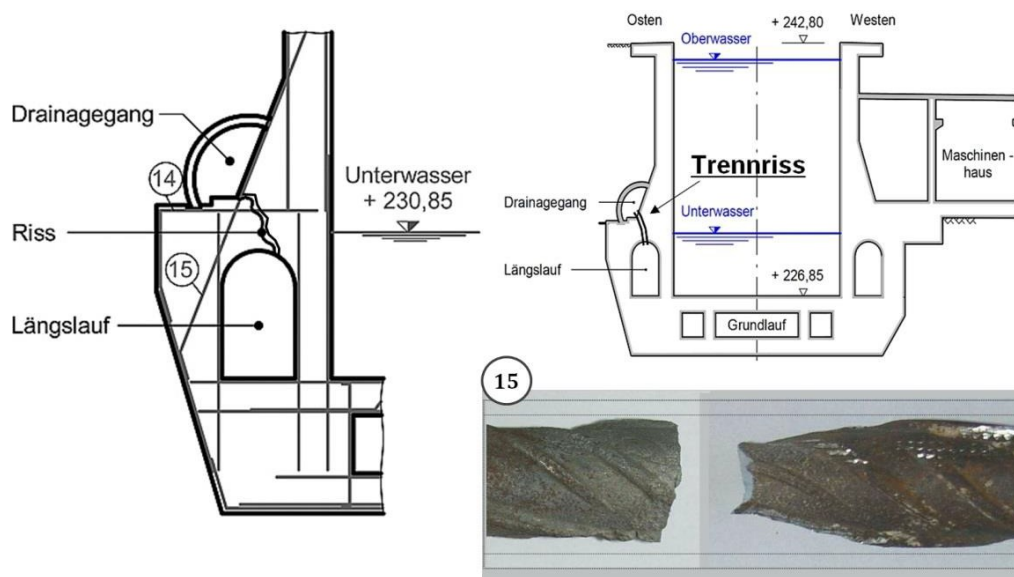


Abbildung 2: Schadensfall Bamberg: Kammerquerschnitt mit Trennriss an Ostwand und Fotos vom Ermüdungsbruch in situ (links) und nach Standard-Zugversuch im Labor mit ausgeprägter Fließzone

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuller, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.

S. 63

2 Untersuchungen und Berechnungskonzeption

Schäden infolge Materialermüdung treten an Stahlbetonbauwerken relativ selten und dann meist in Kombination mit weiteren Schadensmechanismen auf. Schadensfälle am Stahlbetontragwerk von Schleusen waren – ganz im Gegensatz zu den dortigen Stahlwasserbauausrüstungen - zur Zeit der Schadensfeststellung kaum bekannt. Ursache für die Materialermüdung ist die zyklische Belastung der Kammerquerschnitte durch den Schleusenbetrieb, der zu Lastspielzahlen bis 500.000 führen kann und somit als ermüdungsrelevante Beanspruchung betrachtet werden muss. Eine Bemessung auf Ermüdung erfolgte in der Vergangenheit bei der Planung der Schleusen meist nicht, da eine „vorwiegend ruhende“ Belastung unterstellt wurde. Die maßgebende Bemessungsnorm DIN 19702 forderte erst ab Ausgabe 1988 explizit einen Ermüdungsnachweis für den Betonstahl bei Lastspielzahlen größer 10^5 . Erfahrungen der letzten Jahre bei der Planung von Schleusenneubauten zeigen, dass diese Ermüdungsnachweise häufig bemessungsrelevant sind.

Die relativ schlanke Bauweise der Schleuse Bamberg wurde teilweise auf die anderen Schleusen am Main-Donau-Kanal übertragen. Es war deshalb nicht auszuschließen, dass an diesen Anlagen ebenfalls Ermüdungsprobleme auftreten. Da Materialermüdung zum plötzlichen Versagen ohne Vorankündigung führt und somit ein hohes Gefährdungspotential darstellt, war es besonders wichtig, auch diese Schleusen möglichst kurzfristig zu überprüfen. Hierfür wurde eine Konzeption erarbeitet, auf deren Basis eine Untersuchung des Standsicherheitsniveaus aller betroffenen Schleusen unter Wahrung von Wirtschaftlichkeitskriterien vorgenommen werden kann. Die Untersuchung war je nach Erfordernis in den drei Bearbeitungsstufen A bis C zu führen, an die sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Untersuchungsergebnis ggf. eine weitere Stufe D anschließt:

- Stufe A Zusammenstellung und Bewertung der Bestandsunterlagen und Inspektionsergebnisse sowie Ermittlung geometrischer Beanspruchungskennzahlen zwecks Priorisierung
- Stufe B Statische Nachrechnung der Schleusenammern an Stabwerksmodellen nach geltenden Normen
- Stufe C Vertiefte, nichtlineare Tragwerksanalyse
- Stufe D Erarbeitung von Sanierungskonzeptionen für Schleusen mit nicht akzeptierbaren Tragfähigkeitsdefiziten

Das Ziel des abgestuften Vorgehens bestand darin, schrittweise nicht betroffene Schleusen auszu-sondern, so dass sich mit fortschreitender Bearbeitungstiefe die Anzahl der zu untersuchenden Bauwerke reduziert. Damit konnten Zeit und Kosten eingespart werden. Für die Bearbeitung in den Untersuchungsstufen A und B sowie bei Bedarf D wurden kompetente Ingenieurbüros mit hinzugezogen; die Stufe C wurde von der BAW wahrgenommen.

Bereits nach Vorlage der Untersuchungsergebnisse der Stufe A wurde deutlich, dass die Mehrzahl der Schleusen Mängel bzw. Defizite aufweisen, die auf die Planung bzw. die damaligen Bemessungsvorgaben zurückzuführen waren [2]. Die statischen Berechnungen im Rahmen der Stufe B ergaben an 6 Bauwerken statische Auslastungsgrade weit außerhalb des zulässigen Bereichs, was eine erweiterte Tragwerksanalyse gemäß Stufe C erforderlich werden ließ. Ziel dieser Tragwerksanalyse war eine realitätsnähere statische Modellierung und damit der rechnerische Nachweis ausreichender Sicherheitsreserven, so dass eine weitere Nutzung der Bauwerke – ggf. mit entsprechenden Verstärkungen – ermöglicht würde. Zur Erfassung der Wechselwirkung zwischen Boden und Bauwerk, insbesondere des Einflusses der Steifigkeitsänderungen infolge Rissbildung im Beton, musste das System entsprechend leistungsfähig sein. Durch diese komplexe Modellierung wurden insbesondere folgende, in hohem Maß nichtlineare Effekte berücksichtigt:

- Rissbildung im Beton und Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen ("tension stiffening"),

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuster, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.

S. 64

- nichtlineare Arbeitslinie des Betons im Zug- und Druckbereich,
- veränderte Schubspannungsübertragung im Rissbereich,
- Fließen des Betonstahls nach Überschreitung der entsprechenden Grenzdehnung und
- Plastifizierung im Boden sowie Wandreibungseffekte und Ablösung von der Betonoberfläche.

Wegen der Vielzahl der vorzugebenden Parameter und deren meist großen Streuung war es erforderlich, Boden- und Betonproben zu entnehmen und labortechnisch zu untersuchen. Die unverzichtbare Kalibrierung der FEM-Modelle wurde anhand gemessener Verformungen der jeweiligen Kammerquerschnitte bei betriebsbedingten Wasserstandsänderungen sowie der Gegenüberstellung der berechneten und der in situ vorgefundenen Rissbildung im Beton vorgenommen.

Da eine nichtlineare Untersuchung am komplexen Tragwerk in Form einer solchen Systemtraglastanalyse gemäß Stahlbetonnorm (ehemalige DIN 1045-1, Ausgabe 2004, heute Eurocode 2, Abschnitt 5.7) einerseits zulässig, andererseits jedoch nur in groben Ansätzen geregelt war, musste in der BAW in Zusammenarbeit mit den Massivbauinstituten der Universitäten Aachen, Leipzig und Hannover eine praktikable Nachweiskonzeption mit eindeutigen Regelungen und Vorgaben entwickelt werden. Diese „Konzeption zum statischen Nachweis der Systemtraglast an Stahlbetonschleusen auf der Basis nichtlinearer Stoffgesetze - NiTra“ sieht vor, dass ein nachzuweisendes Stahlbetontragwerk mit definierten Einwirkungskombinationen anhand eines schrittweise zu erhöhenden Laststeigerungsfaktors λ bis zum Bruch oder zumindest bis zu einem vorgegebenen Zielwert belastet wird. Der Bruchzustand wird mittels lokaler Grenzkriterium auf Basis der plastischen Stahl- und Betondehnung bzw. ausreichender Konvergenz des numerischen Modells definiert.

Bei der üblichen Stahlbetonberechnung findet eine Trennung zwischen Schnittkraftermittlung und Querschnittsbemessung mit jeweils unterschiedlichen Stoffkennwerten statt. Im Gegensatz hierzu erfolgt bei einer nichtlinearen Systemtraglastermittlung eine durchgängige Berechnung des Tragwerks in einem Gang unter Berücksichtigung weitgehend wirklichkeitsnaher Baustoffeigenschaften. Die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite für Stahl γ_s und Beton γ_c werden dabei in modifizierter Form zu einem einheitlichen Wert γ_R zusammengefasst. Dieser wiederum kann aus der Widerstandsseite R herausgelöst und vor der maßgebenden Einwirkungskombination F angeordnet werden. Dadurch wird eine statische Modellierung auf Basis von Stoffmittelwerten („rechnerische“ Mittelwerte) praktiziert, was für eine nichtlineare Analyse mit Effekten aus der Boden-Bauwerks-Interaktion von wesentlicher Bedeutung ist. Diese realitätsnahe Modellierung der Tragwerkssteifigkeiten unter Berücksichtigung lokaler Plastifizierungen ermöglicht Lastumlagerungen

im System. Dadurch entsteht eine Vergleichmäßigung des Auslastungsniveaus am Tragwerk, woraus wiederum rechnerische Standsicherheitsreserven abgeleitet werden können. Es entspricht dem Wesen des Verfahrens, dass mit dem Wert γ_R auf der Einwirkungsseite nicht nur die ungünstig wirkenden, sondern auch die günstigen Einwirkungen in gleicher Weise vergrößert werden. Die Ableitung dieses als „Rechenwert- Konzept“ oder „ γ_R – Konzept“ bezeichneten Verfahrens ist in Abbildung 3 prinzipiell dargestellt; eine ausführliche Beschreibung enthält [3].

$$\begin{array}{c} \boxed{\Sigma(\gamma_F \times F_k) \leq R_d(\gamma_s, \gamma_c)} \\ \downarrow \\ \boxed{\Sigma(\gamma_F \times F_k) \leq R_k / \gamma_R} \\ \downarrow \\ \boxed{\gamma_R \times \Sigma(\gamma_F \times F_k) \leq R_k} \end{array} \quad (1)$$

Grenzzustand: $\lambda_u \times \Sigma(\gamma_F \times F_k) = R_k$
 Laststeigerung: $\lambda_i \rightarrow \lambda_u$ mit $\lambda_u \geq \gamma_R = 1,3$

Abbildung 3: Modifiziertes Sicherheitsformat für die Systemtraglastermittlung auf Basis des Abschnitts 5.7 im Eurocode 2

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuller, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.

S. 65

3 Praktische Anwendung der Nachweiskonzeption NiTra am Beispiel der Schleuse Eibach

An der Schleuse Eibach ergaben sich aus den statischen Voruntersuchungen Stufe B große rechnerische Sicherheitsdefizite am gesamten Kammerquerschnitt, die weder einen sicheren Schleusenbetrieb noch eine Sanierung unter laufendem Betrieb erlaubt hätten (vgl. Abbildung 6, links). Die ermittelten Auslastungsgrade und Defizite standen im Widerspruch zum augenscheinlich guten Erhaltungszustand und zum unauffälligen Verformungsverhalten des Bauwerks. Es musste deshalb davon ausgegangen werden, dass die zugrunde gelegten Rechenmodelle das komplexe Tragverhalten der Konstruktion nur unzureichend beschreiben. Dementsprechend war es erforderlich, mit einer realitätsnahen Systemtraglastanalyse auf der Basis der Nachweiskonzeption NiTra in Stufe C genauere Untersuchungen durchzuführen.

Die in den Jahren 1972 bis 76 errichtete Schleuse Eibach besitzt bei einer nutzbaren Kammerlänge von 190 Metern eine lichte Kammerbreite von 12,0 und eine Fallhöhe von 19,5 Metern und ermöglicht damit die Passage von Schiffen bzw. Schubverbänden bis 3700 t Nutzlast. Der Baugrund besteht aus Keupersandstein, der in gebrochener Form auch als Hinterfüllungsmaterial verwendet wurde. Das statische System der Schleusenammer wurde als biegesteifer und unsymmetrisch be-

lasteter Trog ausgebildet (Abbildung 4). Auf der hinterfüllten Ostseite des Bauwerks befindet sich eine in die Kammerwand eingefügte und begehbare Drainage, die das Grundwasser entsprechend absenkt. Im Bereich der Westwand ist das durch Rippen verstärkte Maschinenhausdach mit der gleichzeitig als Sparbeckenbegrenzung dienenden Seitenwand Bestandteil des Tragwerks. Als Baustoffe kamen Beton B 250 und Baustahl BSt 42/50RK zum Einsatz. Mit knapp 53 kg Stahl pro m³ Beton weist das Bauwerk nach heutigen Maßstäben einen sehr geringen Bewehrungsgehalt auf.

Die Tragfähigkeitsnachweise bei statischer Biege- und Querkraftbeanspruchung wurden an dem im Vorfeld kalibrierten FE-Modell mit der dort konservierten Rissbildung aus dem Gebrauchszustand durch die Einbindung der entsprechenden Sicherheitselemente geführt.

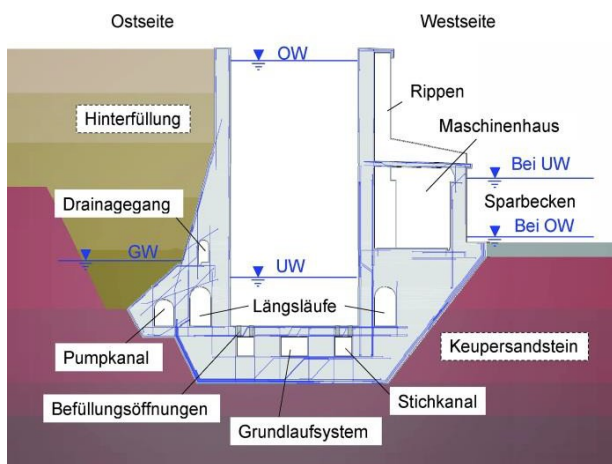


Abbildung 4: Querschnitt Schleusenkammer Eibach mit Baugrund und Bewehrung (Quelle: BAW)

Für die Beanspruchung der Ostwand waren die Unterwasser - Einwirkungskombinationen maßgebend. Diese führen zu einer markanten Schädigung im Bereich des Drainagegangs. Der am Modell berechnete Schädigungsverlauf ist auszugsweise in Abbildung 5 dargestellt. Bei einer mit $\Delta\lambda = 0,1$ durchgeführten Laststeigerung reißt zunächst der unterbemessene, erdseitige Stiel des rahmenartigen Drainagegangbereichs an mehreren Stellen auf. Es erfolgt eine Umlagerungen der Beanspruchungen zum wasserseitigen Stiel. Dadurch entsteht auch hier ein Riss, der sich aber wegen der fehlenden Horizontalbewehrung nach unten ausweitet und bis in den Druckstiel des Längslaufs fortschreitet. Gleichzeitig nehmen die rechnerischen Verformungen des Tragwerks stark zu. Versagenskriterium ist die ab $\lambda = 1,0$ fehlende Konvergenz am FE-System. Im restlichen Querschnittsbereich der Schleusenkammer tritt jedoch keine Überschreitung der Versagenskriterien ein. Dies gilt auch für die im Rahmen des Sicherheitskonzepts NiTra durchgeführten Berechnungen mit variierten Ansätzen für die Betonzugfestigkeit einschließlich der optionalen Berücksichtigung der Arbeitsfugen.

Der Nachweis bezüglich Betonstahlermüdung erfolgt anhand der auftretenden Spannungsschwingbreiten infolge der betriebsbedingten Wasserstandswechsel in der Schleusenkammer. In weitgehend gerissenen Querschnittsbereichen kann dieser

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuler, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.

S. 66

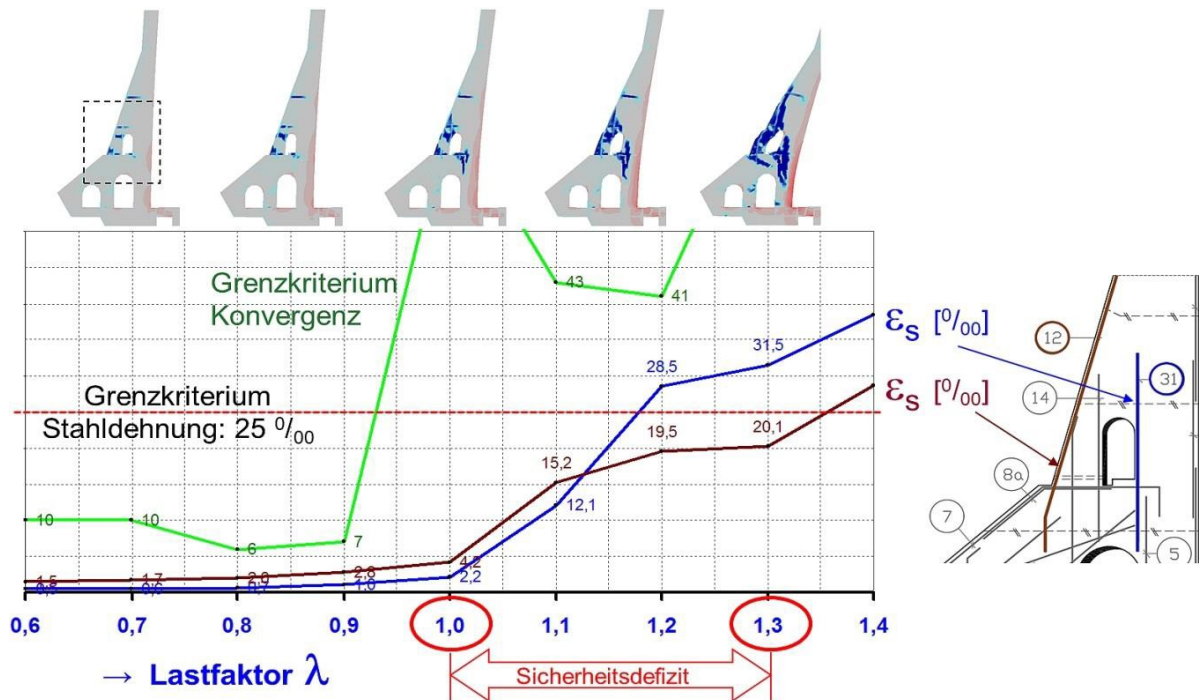


Abbildung 5: Schleuse Eibach, Ostwand: Entwicklung der Rissbereiche (oben, Zug blau) und der Stahldehnung an ausgewählten Bewehrungsstäben bei Unterwasserstand mit anwachsendem Laststeigerungsfaktoren λ (Quelle: BAW)

Wert direkt am Modell abgelesen und mit den zulässigen Werten der WÖHLER-Linie nach DIN 1045-1 (Ausgabe 2001) verglichen werden. Dabei war festzustellen, dass im gesamten Tragwerksbereich hohe Auslastungsgrade vorliegen, eine Überbeanspruchung jedoch nur am erdseitigen Stiel des Drainagegangbereichs gegeben ist. Für ein geschätztes Verkehrsaufkommen mit knapp 500.000 Schleusungsvorgängen bis zum Jahr 2078 (angestrebte Nutzungsdauer) beträgt die zulässige Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{Rsd} = 198 \text{ N/mm}^2$ für Stabstahl und 140 N/mm^2 bei Schweißstößen. Der letzte Wert wird im Drainagegang mit 160 N/mm^2 merklich überschritten.

In Abbildung 6 sind die berechneten Sicherheitsdefizite am Kammerquerschnitt aus den Untersuchungsstufen B (Stabwerksmodell) und C (NiTra) gegenübergestellt. Während gemäß der Ergebnisse der Stufe B ein Ersatzneubau der Schleuse unabdingbar wäre, ergeben sich mit der genaueren Modellierung nach Stufe C lediglich im Bereich der Ostwand größere Defizite. Dementsprechend war im Weiteren zu überprüfen, in welcher Form eine entsprechende Tragwerksverstärkung möglich war.

4 Erforderliche Tragwerksverstärkungen

4.1 Schleuse Eibach

Bei der Planung erforderlicher Tragwerksverstärkungen war zu beachten, dass der Schleusenbetrieb jeweils nur für wenige Stunden in der nächtlichen Betriebspause unterbrochen werden konnte. Entsprechend den Vorgaben des Betreibers waren ferner ausgreifende horizontale Verankerungen der Kammerwand im seitlichen Baugrund nicht zulässig. Unter diesen Einschränkungen wurde die in Abbildung 7 skizzierte Verstärkungsmaßnahme konzipiert. Zur Begrenzung der vertikalen Rissausbreitung konnte mit verhältnismäßig geringem Aufwand der Einbau zusätzlicher Bewehrung („Vernadelung“) von der Kammerseite aus erfolgen. Schräg angeordnet, verläuft diese Bewehrung in Richtung der Hauptzugspannung, gewährleistet die Ausbildung der Rahmentragwirkung im Drainagegangbereich und sichert die Anbindung des kammerseitigen Stiels an das Gesamttragwerk. Am erdseitigen Stiel des Drainagegangs hingegen kann die Gewährleistung des erforderlichen Sicherheitsniveaus nur durch eine Reduzierung bzw. Umlagerung der äußeren Belastung erfolgen.

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuller, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.

S. 67

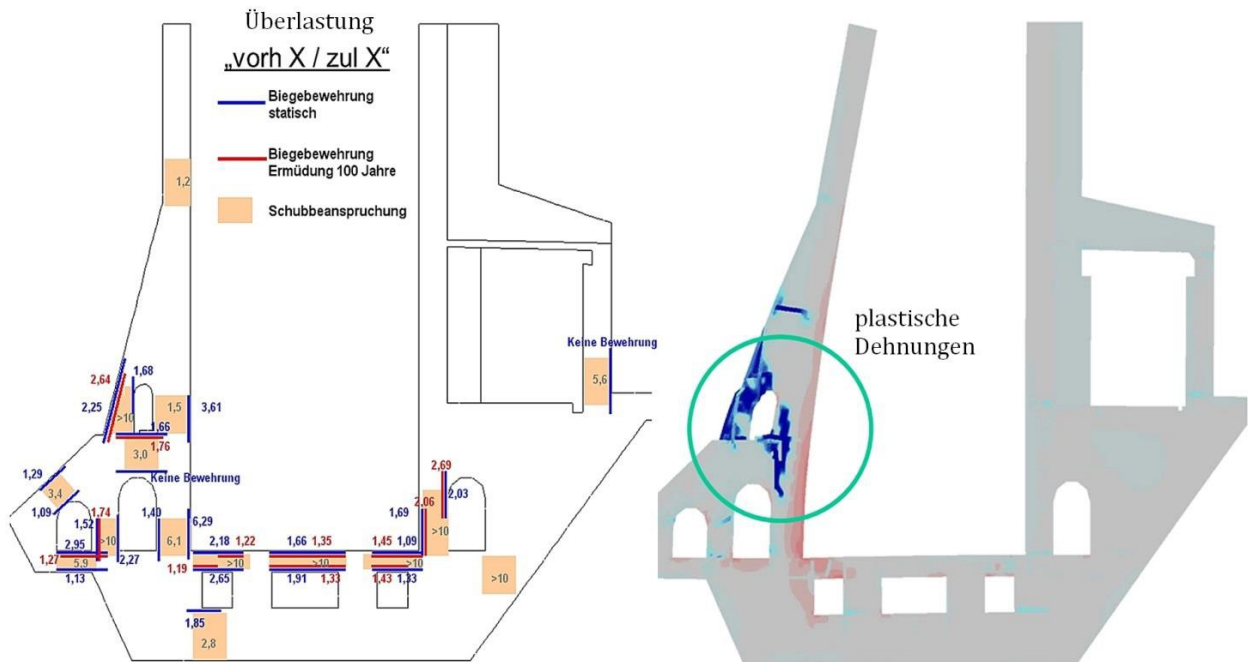


Abbildung 6 Schleuse Eibach: Gegenüberstellung der Überlastungsbereiche des Kammerquerschnitts im Stabwerksmodell der Untersuchungsstufe B (links, Auslastungsgrade) und im Kontinuumsmodell der Stufe C

Das wird im Wesentlichen durch einen partiellen Austausch der seitlichen Bodenanschüttung durch 6500 m³ Leichtbeton erreicht. Ferner ist eine konzentrierte Einleitung der vertikalen Erdlasten des darüber liegenden Bodens in die Kammerwand über eine Rahmenkonstruktion sichergestellt. Eine zusätzliche vertikale Vorspannung der Kammerwand im oberen Bereich verbessert das Tragverhalten, insbesondere bei Zugbeanspruchungen auf der Kammerseite infolge Eis- und Schiffsstoßbelastung bei gefüllter Kammer. Die Verstärkungsmaßnahmen gemäß Abbildungen 7 und 8 konnten bis zum Jahr 2009 abgeschlossen werden; die stattfindende messtechnische Überwachung der Anlage bestätigt deutlich die angestrebte statische Wirkung der Ertüchtigung.

4.2 Verstärkungen an anderen Schleusen

Von den 7 in Stufe C untersuchten Bauwerken am Main-Donau-Kanal konnte bei 5 Anlagen die im Vorfeld ermittelten Standsicherheitsdefizite so weit reduziert werden, dass die Bauwerke mit einer angepassten Tragwerksverstärkung weiter in Betrieb bleiben konnten. Für die Schleusen Erlangen und Kriegenbrunn musste jedoch ein Neubau empfohlen werden. Diese beiden nicht mehr dauerhaft sanierbaren Anlagen mussten temporär gesichert werden; z.Z. erfolgt die Neubauplanung.

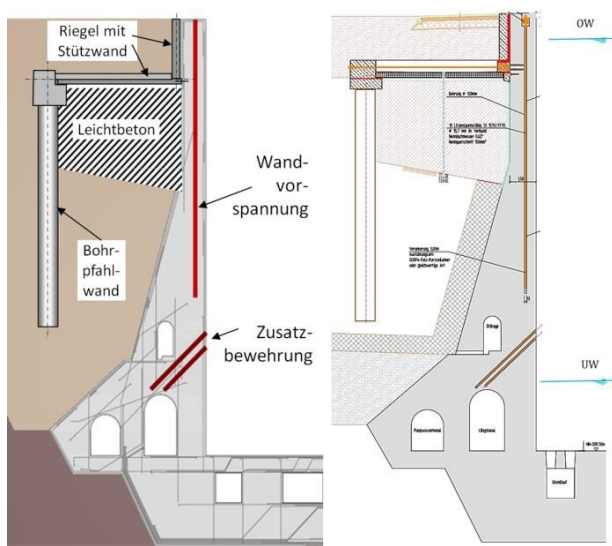


Abbildung 7 Schleuse Eibach: Prinzipdarstellung der Tragwerksverstärkung an der östlichen Kammerwand (links) mit Planauszug [6]

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuler, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.



Abbildung 8 Schleuse Eibach: Baustellenfoto mit oberer Rahmenkonstruktion und Kopf der Bohrpfahlwand

Die durchgeführten Verstärkungsmaßnahmen bestanden vorrangig aus:

- zusätzlich in Bohrlöcher eingebaute Bewehrung (Betonstahl, GEWI),
- partielle Vorspannung mittels Spannglieder oder Injektionsanker,
- Querschnittsergänzung durch Beton oder Spritzbeton, teilweise stahlfaserbewehrt,
- Entlastungen durch Geländeabgrabungen oder Leichterungen durch Bodenaustausch (Blähton, Leichtbeton),
- Abfangungen oder Abstützungen mittels Rahmenkonstruktionen, ggf. in Kombination mit Bohrpfählen.

Verbleibende rechnerische Defizite geringeren Umfangs wurden teilweise – soweit zulässig - durch eine permanente messtechnische Überwachung (Monitoring) kompensiert [4].

Die erforderlichen Tragwerksverstärkungen waren überwiegend an den östlichen, erddruckbelasteten Wänden der Schleusenammern erforderlich. Die rechnerischen Standsicherheitsdefizite ergaben sich einerseits aus der fehlender Sicherheit hinsichtlich Materialermüdung infolge der zyklischen Belastung unter Betrieb, aber auch aufgrund der Unterschreitung der statisch erforderlichen Bewehrungsquerschnitte bzw. fehlender Querrkraftbewehrung. So musste beispielsweise an der Schleuse Nürnberg der Wandbereich des Drainagegangs durch zusätzlich eingebaute und mit Spritzbeton gesicherte Bewehrung verstärkt werden (Abbildung 9). Ferner waren im westlichen Längslauf mangelhaft konzipierte Bewehrungsanschlüsse ebenfalls durch Zusatzbewehrung zu sichern. Die Arbeiten mussten während des Schleusenbetriebs oder innerhalb kurzer Sperrungen unter sehr beengten Verhältnissen ausgeführt werden und stellten damit hohe Anforderungen an Bautechnologie und Logistik.

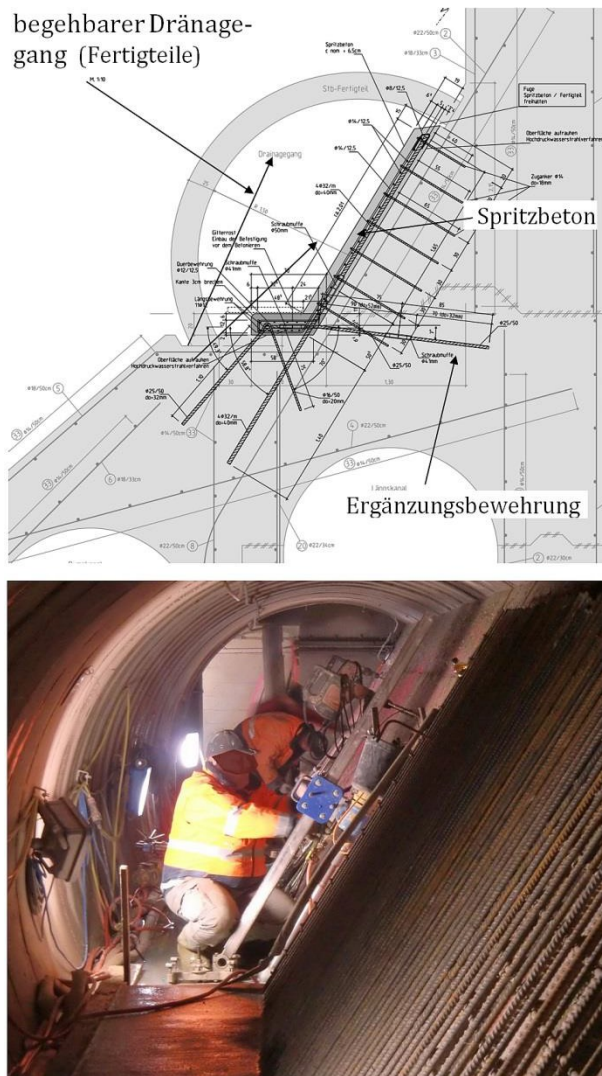


Abbildung 9 Schleuse Nürnberg: Plandarstellung der Verstärkung im Bereich des begehbaren Drainagegangs an der östlichen Kammerwand und Foto von der Bauausführung [6]

Mehrmals mussten an den untersuchten Bauwerken auch Defizite beim Querkraftwiderstand festgestellt werden, die entsprechende Verstärkungen notwendig werden ließen. So erfolgte z.B. an der Schleuse Hausen im Bereich der unteren Kammerwand zwischen Pumpkanal und Längslauf eine Ertüchtigung mittels eingebauter und vorgespannter

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuller, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.

S. 69

Querkraftbewehrung (Abbildung 10), bei der besonders die erhöhte Korrosionsgefährdung und die zusätzliche Beanspruchung durch schnell strömendes Wasser zu beachten waren.

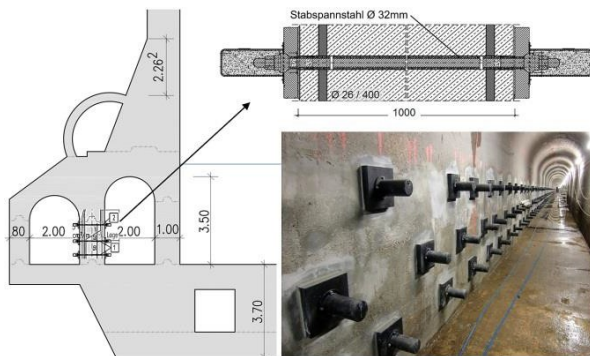


Abbildung 10 Schleuse Hausen: Querkraftverstärkung im Bereich der Trennwand zwischen östlichen Längslauf und Pumpkanal [6]

4.3 Sonstiger Sicherungsbedarf

Im Rahmen der Untersuchungen an den Schleusen am Main-Donau-Kanal und der begleitenden vertieften Bauwerksinspektionen musste immer wieder die Frage nach dem Erhaltungszustand der meist sehr sparsam bemessenen Bewehrung beantwortet werden. Teilweise war es erforderlich, Bewehrung in kritischen Rissbereichen freizulegen und den Zustand zu prüfen (Abbildung 11). Dabei musste festgestellt werden, dass teilweise nicht mehr zu vernachlässigende Schädigungen



Abbildung 11 Bewehrungsfreilegung im Bereich des Maschinenhauses einer Schleuse mit Fotos der Bewehrung sowie Querschliff-Darstellungen von ungeschädigten und korrodierten Querschnitten

vorhanden sind, die weitere Sicherungsmaßnahmen erforderlich werden lassen. Bemerkenswert ist, dass auch permanent unter Wasser liegende Bewehrung nicht immer frei von Korrosion ist, was durch neuere Untersuchungen an anderen Bauwerken in der Fachliteratur bestätigt wird [5]. Dieses neuartige Phänomen ist Gegenstand eines z.Z. laufenden Forschungsprojektes in der BAW Karlsruhe. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich auch hieraus die Notwendigkeit ergänzender Verstärkungsmaßnahmen ergeben wird.

5 Zusammenfassung

Die vorgestellte Nachweiskonzeption NiTra ist ein leistungsfähiges, das Gesamttragwerk erfassendes und unter ingenieurpraktischen Bedingungen anwendbares Nachweisverfahren zur Ermittlung der Systemtraglast an massiven Wasserbauwerken auf der Basis nichtlinearer Stoffgesetze. Grundlage für die Nachweiskonzeption ist das geltende Regelwerk, insbesondere die Stahlbetonnorm Eurocode 2. Die dortigen Angaben haben grundlegenden Charakter, mit denen das prinzipielle Vorgehen und die Anordnung der Sicherheitselemente an üblichen Bauteilgruppen (Balken, Platten, Stützen) vorgegeben werden. Für eine konkrete Anwendung auf komplexe Tragwerke, wie die hier behandelten Schleusen in Interaktion mit dem Baugrund, mussten ergänzende Vorgaben formuliert werden.

Grundlegende Voraussetzung zur Anwendung des Verfahrens ist die Verfügbarkeit von Ausgangsdaten zu den Stoffeigenschaften und von Messwerten für die Kalibrierung der FEM-Modelle. In jedem Fall sind deshalb im Vorfeld qualifizierte Boden- und Betongutachten aufzustellen und ausreichend genaue Verformungsmessungen durchzuführen. Zusätzlich ist im Rahmen einer Plausibilitätskontrolle der Vergleich mit realen, am Stahlbetontragwerk tatsächlich vorhandenen Rissbildern vorgesehen, der die Verfügbarkeit entsprechender Schadensdokumentationen aus der Bauwerksprüfung voraussetzt.

Die Konzeption wurde infolge aufgetretener Tragwerksschäden für die Untersuchung von Schleusen aus Stahlbeton am Main-Donau-Kanal entwickelt. An diesen Bauwerken war mit den bisher üblichen statischen Methoden keine befriedigende rechnerische Tragfähigkeit nachweisbar. Durch die Anwendung der angepassten Nachweiskonzeption war es möglich, Stilllegungen bzw. Betriebs-

Ehmann, Lutz, Fleischer: Standsicherheitsuntersuchung und Tragwerksverstärkungen an Schleusen des Main-Donau-Kanals.

In: Viet Tue, N.; Krüger, M.; Freytag, B.; Baldermann, C.; Schuler, D. (Hrsg.): 4. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 20./21. September 2018, S. 61-70.

S. 70

unterberechnungen im größeren Umfang zu vermeiden. Erforderliche Tragwerksverstärkungen konnten zielführend und statisch effektiv konzipiert werden. Die Verstärkungsmaßnahmen sind unter laufendem Betrieb zwischenzeitlich weitgehend umgesetzt. Noch nicht vollständig geklärt sind Frage nach der Dauerhaftigkeit, insbesondere zum Erhaltungszustand der Bewehrung und deren Schwächung durch Korrosion.

6 Literatur

- [1] Fleischer, H., Lutz, M., Deutscher, M., Ehmann, R.: *Materialermüdung an einer Schiffsschleuse aus Stahlbeton*, Bautechnik 83 (2006), Vol.6, 2006

- [2] Fleischer, H.: *Zur Begutachtung der Standsicherheit alter, massiver Verkehrswasserbauten*, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 81, 2000
- [3] Fleischer, H., Lutz, M., Ehmann, R.: *Aufstellung und Anwendung einer Nachweiskonzeption zur realitätsnahen Ermittlung der Systemtraglast an Stahlbetonschleusen*; Beton- und Stahlbeton
- [4] S. Eisel: *Monitoring an Schleusen zur Kompensation von Tragfähigkeitsdefiziten*, Tagungsband, BAW-Kolloquium „Erhalten und Ertüchtigen von Bauwerken“ am 4. und 5. November 2013 in Karlsruhe (www.baw.de)
- [5] Raupach, M., Wolff, L.: *Korrosion der Bewehrung durch Auslaugung des Betons im Bereich wasserführender Risse*; Bautechnik 93, Vol. 4, 2016
- [6] Wasserstraßenneubauamt Aschaffenburg: *Entwurfsunterlagen AU zur Tragwerksverstärkung der Schleusen Eibach, Nürnberg und Hausen*, unveröffentlicht, 2007 ff.