

Schleusen, Wehre, Schiffshebewerke (1.3)

Schlauchwehre – Perspektiven für den Einsatz der flexiblen Wehrverschlüsse

Dipl.-Ing. Michael Gebhardt

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Matthias Maisner

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Ulrike Gabrys

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Vorteile und Anwendungsgrenzen – Hydraulische und statische Bemessung – Werkstoffanforderungen – Erste Erfahrungen an Bundeswasserstraßen

1. Perspektiven für flexible Wehrverschlüsse

In der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) werden 280 Wehre betrieben, von denen die Hälfte älter als 50 Jahre ist. In den nächsten Jahren besteht daher ein hoher Sanierungsbedarf bei immer knapper werdenden Haushaltsmitteln. Stahlwasserbauverschlüsse haben zwar eine hohe Lebensdauer von bis zu 70 Jahren, müssen aber im Schnitt alle 15 bis 20 Jahre einer Instandsetzung unterzogen werden. Beispielsweise werden am Neckar mit seinen 27 Staustufen jedes Jahr 4 bis 6 Wehrverschlüsse instandgesetzt, wobei eine Instandsetzung im Schnitt ein halbes Jahr dauert. Neben dem Einsparungspotenzial bei Investition, Betrieb und Unterhaltung gewinnt auch die Umweltverträglichkeit eine zunehmende Bedeutung: Schmierstoffe und Anstriche dürfen heute keine wassergefährdenden Stoffe enthalten und die Erneuerung von bestehenden, teilweise asbesthaltigen Korrosionsschutzanstrichen erfolgt unter strengen Auflagen, oft unter vollständiger Einhausung eines Wehrverschlusses.

Vor diesem Hintergrund haben Schlauchwehre in den vergangenen beiden Jahrzehnten mehr und mehr an Bedeutung gewonnen: Der monetäre Vorteil der flexiblen Verschlüsse ist dabei nicht unerheblich, so dass sich immer häufiger private und öffentliche Betreiber für die vergleichsweise neue Technologie entscheiden. Beispielsweise konnten die Investitionskosten bei der Sanierung der Wasserkraftanlage Kiebingen am Neckar allein für die Wehrverschlüsse um 0,5 Mio. Euro gegenüber einer konventionellen Stahlwasserbaulösung gesenkt werden [4]. Bei den Ersatzneubauten Marklendorf an der Aller und Bahnitz an der Unteren Havel-Wasserstraße beträgt der Kostenvorteil gegenüber einem Klappenwehr bei den Investitions- und Unterhaltungskosten immerhin 20 % bis 25 %. Neben dem wirtschaftlichen Aspekt gibt es aber auch eine Reihe von Vorteilen, die Schlauchwehre gegenüber Stahlwasserbauverschlüssen besitzen [3]:

- Die Konstruktion ist einfach und ohne bewegliche Teile (Drehgelenke, Lager), ohne Korrosions- und Dichtungsprobleme und ohne umweltbelastenden Schmierstoffe. Schlauchwehre reagieren unempfindlich gegenüber Setzungen und Erdbeben.

- Die bei herkömmlichen Stahlwasserbauverschlüssen vorhandenen wartungsintensiven Antriebe wie Hydraulikzylinder, Elektrostellantriebe oder Ketten entfallen. Schlauchwehre werden allein durch das Ein- und Ausleiten von Luft oder Wasser in den Schlauchkörper gesteuert.
- Der Aufwand für Aussparungen und Bewehrungen ist gering und die Krafteinleitung in den Wehrkörper gleichmäßig verteilt. Die Grundinstandsetzung wird dadurch wesentlich erleichtert, insbesondere dann, wenn die alte Betonkonstruktion mit einbezogen werden muss.
- Der Betrieb im Hochwasserfall ist sicher, da ein Schlauch immer abgelegt werden kann. An einigen Anlagen wurde daher von den Genehmigungsbehörden auf die Einhaltung der (n-1)-Bedingung nach DIN 19700 verzichtet.
- Die Montage oder der Austausch der Schlauchmembranen erfolgt innerhalb von Wochen, so dass sich die Bauzeiten und die Zeiträume für Revision und Instandsetzung erheblich verkürzen.

Ungeachtet der Vorteile ist die Skepsis gegenüber dem Einsatz der flexiblen Verschlüsse nach wie vor groß, gerade an Stauanlagen, deren Betreiber ein hohes Maß an Sicherheit für die Anlieger und für deren Nutzer, wie z.B. für die Schifffahrt, verlangen. Dies liegt zum einen an den in der Vergangenheit aufgetretenen Schadensfällen und zum anderen an den fehlenden Bemessungsgrundlagen. Hinweise und Empfehlungen zur Planung beschränken sich zumeist auf die Angaben der Hersteller. Zwei Planungen in der WSV, Marklendorf an der Aller und Bahnitz an der Unteren Havel-Wasserstraße, bei denen im Rahmen einer Grundinstandsetzung Schlauchwehre eingesetzt werden sollen, waren Anlass für die BAW, ein gemeinsames Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE) der Abteilungen Wasserbau und Bautechnik zu initiieren und darin den aktuellen ingenieurwissenschaftlichen Kenntnisstand zusammenzufassen, Anwendungsgrenzen für wasser- und luftgefüllte Schlauchwehre aufzuzeigen sowie Grundlagen für Planung, Bemessung und Ausführung zu erarbeiten.

2. Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Wasserbau

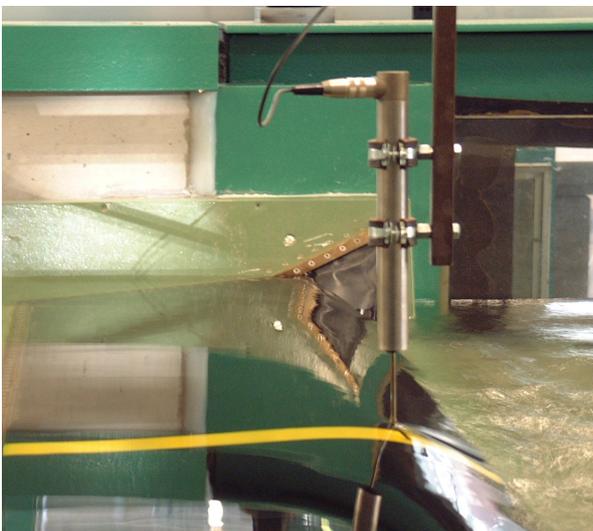
2.1 Schlauchgeometrie, Überströmungscharakteristik und Schwingungsempfindlichkeit

Zwei physikalische Modelle, ein Vollmodell im Maßstab 1:12,5 und ein Ausschnittsmodell im Maßstab 1:5 standen für die wasserbaulichen Fragestellungen zur Verfügung (s. Bild 1). Der Einfluss unterschiedlicher hydraulischer Randbedingungen, Innendrucke und Befestigungsarten auf das Abfuhrvermögen, die Schlauchgeometrie und die Schwingungsempfindlichkeit des Schlauchkörpers sowie die Wirkungsweise von Abhilfemaßnahmen wie das Anbringen von Deflektoren und Störkörpern waren Gegenstand zahlreicher Versuchsreihen.

Bei Schlauchwehren ist es naheliegend, den Innendruck als physikalische Stellgröße heranzuziehen und den Zusammenhang von Innendruck und Schlauchgeometrie zu beschreiben. Beim Bemessungsfall für die Bauteile, d.h. ohne Überströmung, zeigen die Berech-



a. Wassergefülltes Modell mit Deflektor



b. Messung der Schlauchhöhe mit einem induktiven Wegaufnehmer

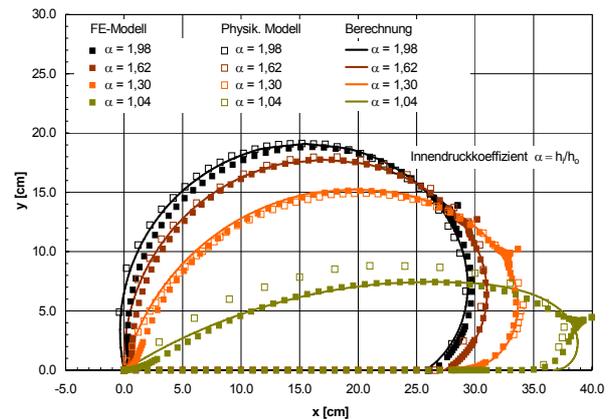


c. Videodokumentation der Schwingungen

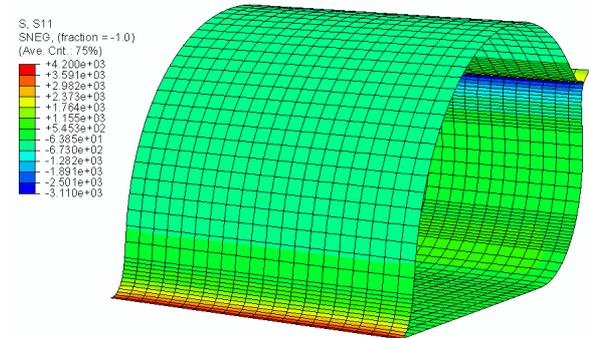
Bild 1

nungsergebnisse mit analytischen und numerischen Verfahren (Finite-Elemente-Modell mit ABAQUS) eine gute Übereinstimmung mit den im Modellversuch ge-

messenen Geometrien (s. Bild 2). Für viele Anwendungsfälle können damit Geometrie und Membrankraft in Abhängigkeit von Bemessungsinwendruck, Schlauchumfang, Ober- und Unterwasserstand und Befestigungsabstand berechnet werden. Bei der Berechnung überströmter Schlauchwehre treten dagegen mit zunehmender Überfallhöhe größere Unterschiede zu den Modellergebnissen auf. Dies ist auf die Abweichung von der hydrostatischen Druckverteilung zurückzuführen, die infolge der beschleunigten Strömung mit steigender Überfallhöhe zunimmt. Alternativ können die Wasserstands-Abflussbeziehungen (Wehrbezugskurven) - nach wie vor - mit Hilfe physikalischer Modelluntersuchungen bestimmt werden [3].



a. Vergleich der Schlauchgeometrien FE-Modell, Physikal. Modell und Analytischer Berechnung



b. Verlauf der Normalspannungen im FE-Modell

Bild 2

[3]

Luftgefüllte Schlauchwehre haben die Eigenschaft, dass sie mit abnehmendem Innendruck nicht mehr gleichmäßig überströmt werden, sondern an einer Stelle, zumeist im Bereich der Wehrwangen, einknicken (s. Bild 3a). Die Ursache hierfür ist die Druckdifferenz auf der Oberwasserseite, die nicht, wie beim wassergefüllten Schlauch, konstant ist, sondern sich über die Wassertiefe ändert. Da Membranen sehr dünne Flächenträgerwerke mit vergleichsweise geringer Biegesteifigkeit sind, tritt eine Instabilität des Systems auf und die Membran wird gefaltet bzw. gebeult. Durch diese V-förmige Eintiefung wird das Schlauchwehr einseitig beaufschlagt und die unterstromige Sohle lokal stärker beansprucht. Im Unterwasser können sich Walzensysteme ausbilden, die u.U. zu einer starken Beanspruchung der Uferböschungen führen. Nach praktischen Erfahrungen wird die Regelung des Oberwasserstands davon nicht beeinträchtigt [4]. Beim Einsatz von luftge-

füllten Schlauchwehren zur Wasserstandsregelung ist schon bei geringen Überfallhöhen ($h_u/h_o = 0,10$ bis $0,15$) mit einem Einknicken zu rechnen [3].



a. Einknicken bei Luftfüllung



b. Prototyp einer Störkörperreihe



c. Deflektor

Bild 3

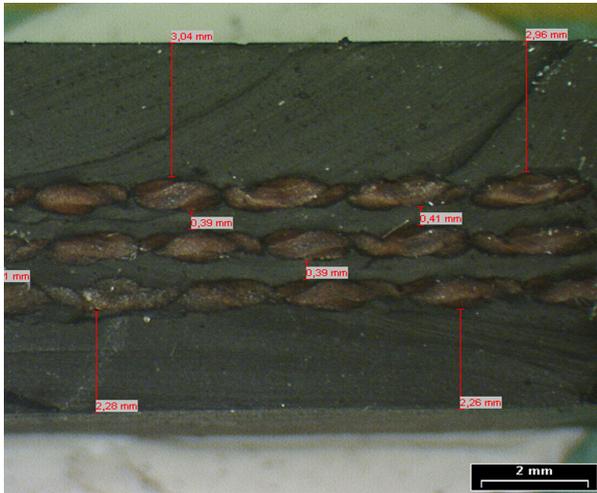
Durch Schwingungen kann sich die Schlauchmembran an der Betonoberfläche aufscheuern und zu Undichtigkeiten führen, wie einige Schadensfälle in der Vergangenheit zeigen. Daher gilt es, lang andauernde Schwingungen im Betrieb zu vermeiden. Aufgrund der geringeren Masse neigen luftgefüllte Schlauchwehre hier eher zu Schwingungen [3]. Die Untersuchungen zum Schwingungsverhalten wassergefüllter Schlauchwehre in Abhängigkeit von der Überfallhöhe, dem Unterwasserstand und dem Bemessungssinnendruck wurden mit Hilfe eines Triangulationslasers durchgeführt und anschließend mit einer Fast Fourier Transformation (FFT) ausgewertet. Dabei konnten zwei Frequenzbereiche festgestellt werden: eine niederfrequente Grundschiwingung und eine höherfrequente Oberschiwingung. Maßgeblichen Einfluss auf das Auftreten der Schwingungen hat dabei der Unterwasserstand. Die größten Amplituden treten erst bei Unterwasserständen auf, die ca. 70 % des Oberwasserstands betragen ($h_u/h_o = 0,70$). Schwingungen können aber durch Abhilfemaßnahmen, wie das Anbringen von Deflektoren und Störkörper (s. Bild 3b+c), vermieden oder erheblich reduziert werden. Dabei erwies sich eine Störkörperreihe, die erstmalig im Modellversuch systematisch untersucht wurde, als wirkungsvolle Alternative zu Deflektoren.

2.2 Werkstoffuntersuchungen, Befestigung und Beschädigung durch Vandalismus

Für die Festlegung von Materialspezifikationen wurden zahlreiche Materialuntersuchungen an handelsüblichen Membranen durchgeführt (siehe Bild 4a). Die chemischen Analysen zeigten, dass die Hersteller Spezialkautschuke wie Chloroprenkautschuk (CR) und Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPDM) verwenden, daneben aber auch Polymerverschnitte aus Naturkautschuk (NR) und Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR). Als Festigkeitsträger werden in der Regel hochfeste Gewebe aus Polyamid oder Polyester eingesetzt. In Anlehnung an die im Bergbau für Textilfördergurte üblichen Prüfungen wurden für Bauteilversuche Zugproben hergestellt und die Bruchkraft in Längs- und Querrichtung bestimmt [5]. Auf Grundlage der Werkstoffuntersuchungen und der einschlägigen Normungen wurden Grenzwerte für das Elastomer, wie z.B. Shore-A-Härte, Zugfestigkeit, Reißdehnung oder Abrieb, festgelegt. Diese Anforderungen wurden erstmalig für die Ausschreibung der Schlauchwehre Markendorf und Bahnitz vorgegeben und bei der Produktion durch regelmäßige Kontrollprüfungen überwacht.

Für die Untersuchung des Langzeitverhaltens einer Schlauchmembran im eingebauten Zustand wurde in der BAW eine Prüfeinrichtung in Betrieb genommen (s. Bild 4b), um Aufschlüsse zur Retardation (Kriechen) der eingesetzten Materialien in der Befestigungs konstruktion zu erhalten. Hier zeigte sich, dass auch nach einem Beobachtungszeitraum von 2 Jahren kein signifikantes Kriechen festzustellen ist. Daneben wurden Finite-Elemente-Berechnungen für eine Schlauchwehrverankerung in Auftrag gegeben, bei der zwei Stahlschienen (S235JRG2) mit vorgespannten Schrauben im Beton verankert sind. Zwischen den beiden Stahlschienen wird die Schlauchmembran eingeklemmt. Die Nachrechnung erfolgte an einem Teilmodell unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen mit dem FE-Programm ANSYS. Als Belastung der Schlauchmembran wurde eine Streckenlast von 85 kN/m angesetzt

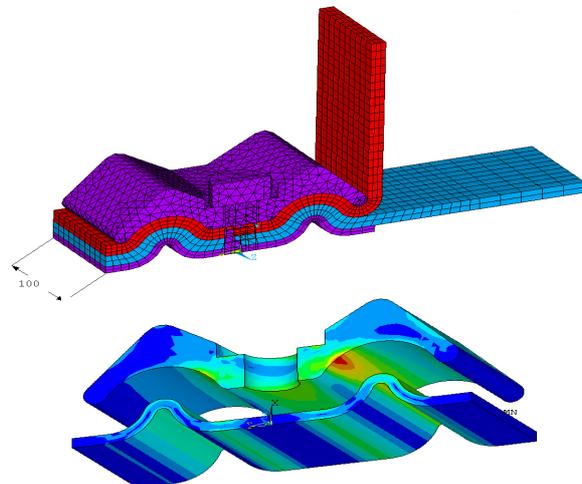
und die Schrauben mit 75 kN vorgespannt. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse zeigte, dass in den Stahlschienen zwar eine maximale Vergleichsspannung von 226 N/mm² erreicht wird, die nur geringfügig unter der Fließspannung des Stahls liegt, diese aber nur lokal durch die in diesem Bereich ungünstige Bauteilgeometrie hervorgerufen wird (s. Bild 4c).



a. Mikroskopische Aufnahme einer 3-lagigen, 12 mm dicken Schlauchmembran



b. Langzeitversuchsstand



c. FE-Modell und Spannungsverlauf in Befestigungsschienen
Bild 4

Im Hinblick auf die immer wieder geäußerten Befürchtungen vor Vandalismus wurden beim Beschussamt Ulm entfernungsabhängige Beschusstests mit mehreren handelsüblichen Kalibern an verschiedenen Membranproben durchgeführt. Zusätzlich erfolgten Stichtests mit einem standardisierten Fallprüfgerät, wie es für die „Technische Richtlinie Schutzwesten“ verwendet wird. Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die untersuchten Membranproben dem Beschuss der gängigen Kaliber, wie sie auch in Schützenvereinen eingesetzt werden - wie zu erwarten - nicht standhalten. Allerdings reicht die Widerstandsfähigkeit für die sehr weit verbreiteten Luftgewehre (Kaliber 4,5 mm) aus. Auch mit Bleischrot kann der Membran bei Entfernungen über 15 m keine ernsthafte Verletzung zugefügt werden.

Die Einschusslöcher, die bei größeren Kalibern entstehen, verschließen sich durch die Elastizität des Elastomers wieder, so dass nur sehr geringe Leckagen zu erwarten sind. Ein weiteres Einreißen ließ sich außerdem nicht feststellen [5]. Bei wassergefüllten Schlauchwehren wird die Geschossenergie so reduziert, dass ein zweites Durchdringen auf der Rückseite praktisch ausgeschlossen werden kann.

3. Erfahrungen bei Planung, Bau und Betrieb

Obwohl die Schlauchwehr-Technologie auf eine fast 50-jährige Geschichte zurückblickt, wurde ein Großteil der Anlagen in Deutschland erst in den beiden letzten Jahrzehnten errichtet. Daher umfassen die Erfahrungen mit Schlauchwehren als Wehrverschlüsse einen relativ kurzen Zeitraum. Unter den besichtigten Anlagen ist das Wasserkraftwerk in Erlangen an der Regnitz die Anlage mit der längsten Betriebsdauer (s. Bild 5a). Das wassergefüllte Schlauchwehr mit einer Höhe von 1,20 m und einer Breite von 22,40 m ist bereits seit 1981 mit der Originalmembran in Betrieb. Die Betriebserfahrungen in Erlangen, aber auch an den anderen Anlagen sind sehr positiv: Die Wasserstandsregelung erfolgt bei allen Anlagen sowohl mit Wasser- als auch mit Luftfüllung automatisch innerhalb einer Stauzieltoleranz von wenigen Zentimetern. Obwohl schon extreme Hochwasserabflüsse abgeführt wurden, sind die Membranen insgesamt in einem sehr guten Zustand und weisen keine größeren Beschädigungen auf, die den Betrieb beeinträchtigen. Kleinere Beschädigungen der Membran wurden im wesentlichen durch Scherben, Nägel - in Ausnahmen auch durch mutwillige Beschädigung verursacht. Sie konnten auf einfachem Weg durch Kaltvulkanisation mit Reparaturflecken behoben werden. Auch an Flussabschnitten mit Geschiebetrieb, wie z.B. bei der Wasserkraftanlage Tullau am Kocher (s. Bild 5b), sind keine größeren Schäden und kein Abrieb festzustellen. An der Wasserkraftanlage Lechbruck am Lech (s. Bild 5c) wird sogar ein Wehrfeld zur planmäßigen Geschiebeabfuhr aus dem Stauraum herangezogen [3].

Im Oktober 2005 wurde die erste Schlauchmembran am Wehr Marklendorf/Aller montiert (s. Bild 6), die Inbetriebnahme der Wehranlage durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Verden ist für das Jahresende 2006 geplant. Gleichzeitig erfolgt der Ersatzneubau für das Wehr Bahnitz an der Unteren Havel-Wasserstraße: Das Wasserstraßen-Neubauamt Berlin hat vor, die erste Schlauchmembran im Mai 2006 zu montieren. Das wassergefüllte Schlauchwehr ist Bestandteil des Pro-

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)
Schlauchwehre – Perspektiven für den Einsatz der flexiblen Wehrverschlüsse

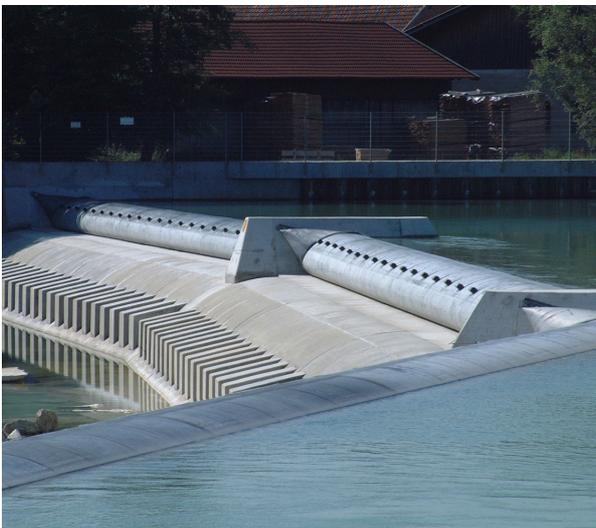
jekts 17, eines der "Verkehrsprojekte Deutsche Einheit", welches den Ausbau der bestehenden Wasserstraßenverbindung Hannover-Magdeburg-Berlin zu einer leistungsfähigen europäischen Wasserstraße vorsieht.



a. Erlangen/Regnitz (Bayern)



b. Tullau am Kocher (Baden-Württemberg)



c. Lechbruck am Lech (Bayern)

Bild 5

Die beiden Wehre bestehen aus je zwei Wehrfeldern von 23,60 m (Marklendorf) bzw. 36,50 m (Bahnitz) Breite und einer Höhe von ca. 2,20 m bzw. 2,40 m. Die Wehrfeldbreite sowie die Geometrie der Wehrschwelle und -pfeiler wurden von der BAW anhand von Modellversuchen optimiert. Die Verschlusshöhe konnte in beiden Fällen durch eine hydraulisch günstig ausgeformte Schwelle um rund 1,00 m reduziert werden [1,2]. Aufgrund der gleichmäßigeren Überströmung wird bei



a. Membran nach der Kalandrierung



b. Fertigung der Stöße

Bild 6: Wehr Marklendorf an der Aller (Teil 1)

beiden Schlauchwehren Wasser als Füllmedium verwendet, da hiermit das Stauziel über das gesamte Abflussspektrum, auch bei Unterwasserständen, die über dem Ablagetisch liegen, gehalten werden kann.

Die Druckhöhe im Schlauchinneren liegt im Bemessungsfall um das 0,6-fache über dem Oberwasserstand. Für die 12 mm dicke Schlauchmembran aus Chloroprenkautschuk (CR) wurden zwei Gewebeeinlagen aus Polyester vorgeschrieben. Erstmals kommt bei

den beiden Schlauchwehren eine Reihe von Störkörpern aus Polyurethan zum Einsatz, die nachträglich auf den Schlauchkörper aufgeklebt werden.



c. bis e. Montage der Schlauchmembran im Oktober 2005

Bild 6: Wehr Marklendorf an der Aller (Teil 2)



f. Druckprüfung

Literatur

- [1] BAW: Staustufe Bahnitz/Untere Havel, Gutachten über den Ersatz der Wehranlage durch ein Schlauchwehr, unveröffentlicht (2003)
- [2] BAW: Staustufe Marklendorf/Aller, Gutachten über den Ersatz der Wehranlage durch ein Schlauchwehr, unveröffentlicht (2003)
- [3] GEBHARDT, M.: Hydraulische und Statische Bemessung von Schlauchwehren, Dissertation (Veröffentlichung in Vorbereitung), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (2006)
- [4] ITTEL, G.; HEIMERL, ST.: Innovative Sanierung der Wasserkraftanlage Kiebingen am Neckar, Wasserwirtschaft 91, Heft 9 (2001), S.434-442.
- [5] MAISNER, M. ; GEBHARDT, M.; GABRYS, U.: Schlauchwehre aus Elastomerbahnen für den Verkehrswasserbau, KGK – Kautschuk Gummi Kunststoffe (12/2003)

Verfasser

Dipl.-Ing. Michael Gebhardt
Referat Wasserbauwerke, Stauhaltungen und Kanäle
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 3410
E-Mail: michael.gebhardt@baw.de

Dipl.-Ing. Matthias Maisner
Referat Baustoffe
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 4860
E-Mail: matthias.maisner@baw.de

Dipl.-Ing. Ulrike Gabrys
Referat Stahlbau, Korrosionsschutz
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 4560
E-Mail: ulrike.gabrys@baw.de