

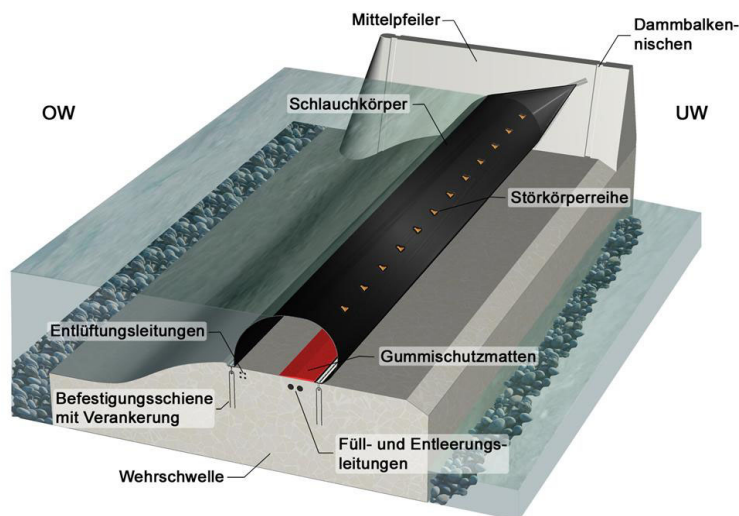
## **Schlauchwehre, Untersuchungen zum Widerstand der Schlauchmembran gegen Beschädigungen**

M. Maisner  
M. Gebhardt  
U. Gabrys  
A. Maurer  
K. Schweizerhof

Schlauchwehre werden immer häufiger als Verschlüsse an Stauanlagen eingesetzt. Der Vorteil gegenüber den konventionellen Anlagen besteht in den geringeren Investitions- und Unterhaltungskosten sowie der kürzeren Bauzeit. Bei den flexiblen Wehrverschlüssen müssen aber auch mögliche Risiken, die durch Beschädigungen entstehen können, hinterfragt werden. Beschädigungen können durch mechanischen Verschleiß oder auch durch singuläre Ereignisse wie z.B. dem Aufprall von Treibgut oder durch Vandalismus verursacht werden. Zur Ermittlung der Spannungskonzentrationen an der Kontaktstelle der Membran erfolgten Finite-Elemente-Analysen. An handelsüblichen Schlauchmembranen wurden Vandalismusuntersuchungen durchgeführt. Ein Untersuchungsschwerpunkt waren hier Beschädigungen, die durch Beschuss initiiert wurden. Die Einschussstellen wurden mikroskopisch und auf Wasserdurchlässigkeit untersucht. Aus den Betriebserfahrungen älterer, wassergefüllter Anlagen ist bekannt, dass bei kleineren Schnittverletzungen noch keine Leckagen resultieren, die die Betriebsfähigkeit der Anlage gefährden. Die Beschusstests haben gezeigt, dass durch die Einschussstellen nur geringe Wasserverluste entstehen. Der Beitrag gibt abschließend einen Überblick über vor Ort durchführbare Reparaturmöglichkeiten an Schlauchmembranen.

### **1 Einleitung**

Schlauchwehranlagen dienen im Wesentlichen der Stauregelung von Flüssen. Betriebserfahrungen mit Schlauchmembranen aus gewebeverstärkten Elastomer-Bahnen gibt es seit Ende der fünfziger Jahre. Die Schlauchmembran wird auf dem massiven Wehrkörper so befestigt, dass ein dichter und mit Luft oder Wasser befüllbarer Innenraum entsteht. Abbildung 1 zeigt die Systemdarstellung eines Schlauchwehres mit Wasserfüllung.



**Abbildung 1:** Systemdarstellung eines wassergefüllten Schlauchwehres

Die ersten Schlauchwehranlagen wurden an den Bundeswasserstraßen Aller und Untere Havel u.a. aufgrund der monetären Vorteile gebaut. Weitere Anlagen befinden sich derzeit in der Planung u.a. an Neckar und Müritz-Havel-Wasserstraße. Das größte bislang an Bundeswasserstraßen installierte Schlauchwehr hat eine Höhe von 2,45 m, eine Breite von 30,30 m und eine Membrandicke von 14 mm. Zu Beginn der ersten Planungen wurde die Frage aufgeworfen, ob eine Beschädigung der flexiblen Wehrverschlüsse durch mechanische Beanspruchung oder Vandalismus möglich ist und welche Folgen sich daraus ergeben. Unklar war auch, ob eine Beschädigung eine lokale Schadstelle oder ein Aufreißen der Schlauchmembran zur Folge hat. Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurde daher untersucht, ob durch mechanische Beschädigung oder durch Schuss- bzw. Stichwaffen eine Funktionsbeeinträchtigung von Schlauchwehren möglich ist. Die Vandalismusuntersuchungen wurden an handelsüblichen Schlauchmembranen durchgeführt.

## 2 Bisherige Beschädigungen durch Vandalismus

Aus der Literatur sind bislang nur wenige Beispiele für Beschädigungen durch Vandalismus bekannt. Genannt seien hier *Tam (1997)*, *U.S. Army Corps of Engineers (2001)* oder aus jüngerer Zeit *Kamuf (2007)*, der über Schadensfälle an wasser- und luftgefüllten Anlagen berichtet. Abbildung 2 zeigt die lokale Beschädigung eines wassergefüllten Schlauchwehres aufgrund eines Messerstiches. Nach Aussage des Betreibers wurde die Leckagewassermenge von etwa 2 m<sup>3</sup>/d über die Pumpe ausgeglichen und die Reparatur erst bei der nächsten Revision

der Anlage durchgeführt. Ein weiteres Beispiel ist eine luftgefüllte Anlage in den USA. Hier wurde die durchschossene Schlauchmembran mit einem handelsüblichen Reifenreparatur-Set wieder verschlossen. In keinem dieser Fälle wurde die Funktionsfähigkeit der Anlagen langfristig beeinträchtigt.



**Abbildung 2:** Lokaler Wasseraustritt aus einer Schlauchmembran

Bei einem kleineren wassergefüllten Schlauchwehr im Herzen eines Erholungsortes würde, so der Betreiber, die Anlage nach Volksfesten von Jugendlichen begangen und die Membran dabei zum Teil mutwillig beschädigt werden, so dass Reparaturen erforderlich sind.

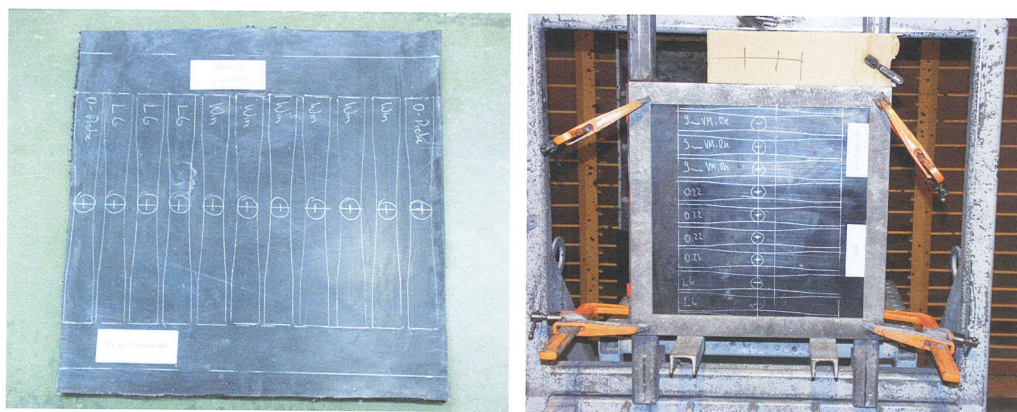
### **3 Untersuchungen zur Widerstandsfähigkeit gegenüber Beschuss**

Bei dem Aspekt der Dauerhaftigkeit von Schlauchwehren müssen auch die Risiken durch möglichen Vandalismus beachtet werden. Zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials „Vandalismus durch Beschuss“ wurden Membranproben verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Dicken und Gewebelagen ausgewählt. Aufgrund des Gefahrenpotentials beim Umgang mit Waffen wurde eine Staatliche Stelle für das Beschusswesen mit den Beschussprüfungen beauftragt. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der gewählten Waffenarten und Schussentfernungen. Für Worst-Case Betrachtungen wurden jeweils kurze Schussentfernungen gewählt.

Waffenart	Patrone	Kaliber		Schussentfernung
 Sportschützengewehr		.22 lr	long rifle, Bleigeschoss	10m
 Handfeuerwaffe		9 mm x 19	Vollmantel, Rundkopf- Geschoss	5 m
 Winchester		.308 Win.	7,62 x 51, Vollmantel- Spitz- Weichkern- Geschoss	10 m
 Luftdruckgewehr		4,5 mm	Diabolo	10 m

**Abbildung 3:** Ausgewählte Waffenarten, Kaliber und Schussentfernungen

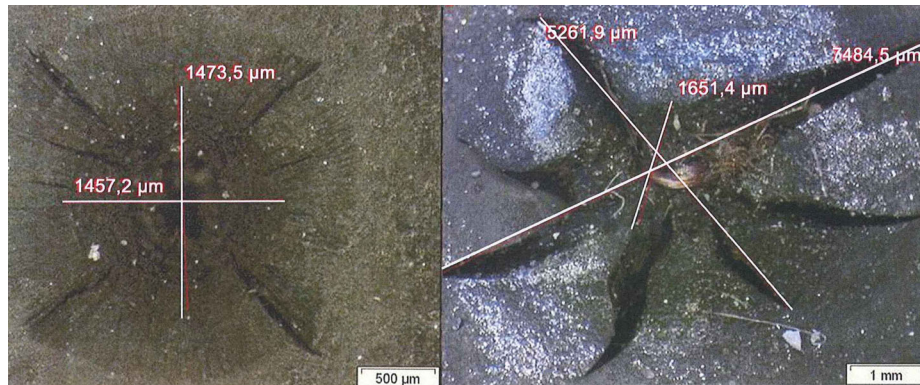
Auf den 45 x 50 cm großen und ca. 14 mm dicken Materialproben wurden, wie aus Abbildung 4 links ersichtlich, Schulterstäbe für spätere Zugversuche aufgebracht. Die vorgesehenen Einschussstellen wurden jeweils in der Mitte der Schulterstäbe festgelegt. Abbildung 4 rechts zeigt die in der Beschusskammer eingespannte Probe mit den markierten Beschussstellen.



**Abbildung 4:** Membranprobe mit Beschussstellenmarkierungen (links) und Einspannvorrichtung in der Beschusskammer (rechts)

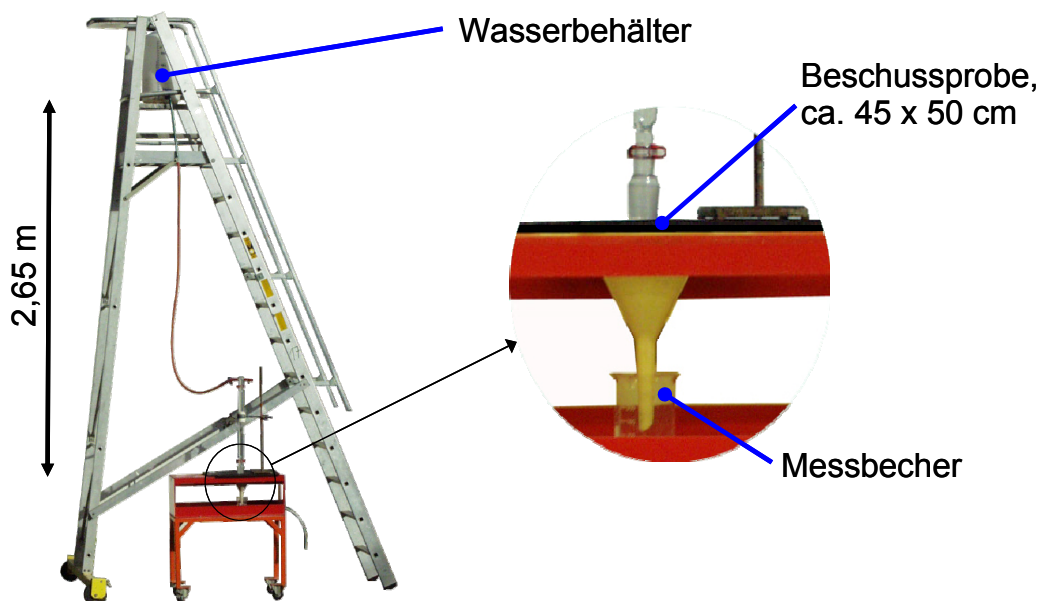
Mit Ausnahme der Handfeuerwaffe erfolgte der Beschuss aus einer fahrbaren Kabine. Die Geschossgeschwindigkeiten wurden mit einer Kamera gemessen. Danach erfolgte eine stereomikroskopische Untersuchung und bildanalytische Auswertung der Einschussstellen. Abbildung 5 zeigt eine stereomikroskopische Aufnahme für das Beschussresultat mit Kaliber 308 Winchester, 7,62 x 51,

Vollmantel-Spitz-Weichkern-Geschoss, bei einer Geschwindigkeit von 842 m/s. Die Mikroskopie zeigt, dass die Einschussstellen der dreilagigen Schlaumembranen die geringsten Abmessungen aufweisen.



**Abbildung 5:** Stereomikroskopische Aufnahme einer Einschussstelle von einer zweilagigen Schlauchmembran (Kaliber 308 Winchester, 7,62 x 51, Vollmantel-Spitz-Weichkern-Geschoss, Geschwindigkeit 842 m/s): Einschussstelle (links) und Rückseite (rechts)

An den Einschussstellen wurde die Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene untersucht. Hierzu wurde, wie aus Abbildung 6 ersichtlich, in 2,65 m Höhe über den Proben ein Wassercontainer platziert. Mittig über den Einschussstellen wurde das mit einem Schlauch verbundene gläserne Erweiterungsstück aufgesetzt. Die Kontaktfläche zum Gummi wurde mit einer Dichtungsmasse abgedichtet.



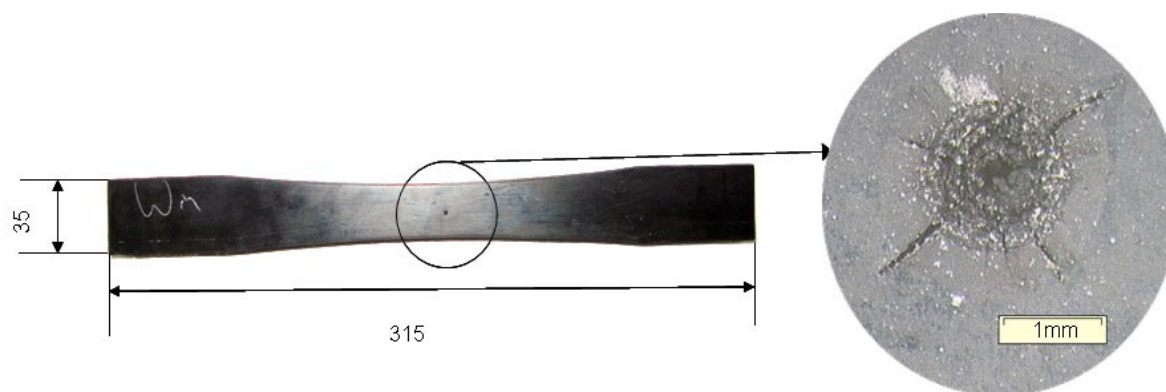
**Abbildung 6:** Messeinrichtung zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Einschussstellen

An jeder Einschussstelle erfolgte eine Dreifachbestimmung der Wasserdurchlässigkeit. Aus Tabelle 1 ist die jeweilige Waffenart, die Geschossgeschwindigkeit und die Spannweite der Wasserdurchlässigkeit zu ersehen.

**Tabelle 1** Ergebnisse Wasserdurchlässigkeit

Material	Waffenart	Probenanzahl	Geschossgeschwindigkeit MW [m/s]	Spannweite Wasserdurchlässigkeit [l/h]
SBR 2-lagig	Luftgewehr	4	151	0
	Winchester	6	838	0,01 / 0,15
	Handfeuerwaffe	4	387	0,02 / 0,30
	Sportschützengewehr	4	360	0,10 / 1,33
SBR 3-lagig	Luftgewehr	4	152	0
	Winchester	6	835	0,01 / 0,41
	Handfeuerwaffe	4	388	0,10 / 0,37
	Sportschützengewehr	4	359	0,31 / 1,28
EPDM 2-lagig	Luftgewehr	4	149	0
	Winchester	4	841	0,01 / 0,06
	Handfeuerwaffe	3	388	0,03 / 0,04
	Sportschützengewehr	4	360	0,01 / 0,17

Der Beschuss mit dem Luftgewehr ergab keine Schadstelle. Mit dem Sportschützengewehr wurden jeweils die größten Wasserdurchlässigkeiten verursacht. Das zweilagige Material SBR (Styrol Butadien Rubber) zeigt eine größere Wasserdurchlässigkeit als das zweilagige EPDM (Ethylen Propylen Dien Kautschuk). Hinsichtlich der Anzahl der Gewebelagen konnte beim SBR kein signifikanter Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit festgestellt werden. Die größte Wasserdurchlässigkeit mit 1,33 l/ Stunde wurde bei dem zweilagigen Material SBR festgestellt. Als Resümee bleibt festzuhalten, dass die Leckagewassermengen infolge eines Einschusses äußerst gering sind und dadurch keine Funktionsbeeinträchtigungen zu erwarten sind.



**Abbildung 7:** Schulterstab für Zugversuche mit mittiger Einschussstelle

Für Zugversuche nach *DIN EN ISO 283* wurden Schulterstäbe mit mittiger Beschussstelle, wie aus Abbildung 7 ersichtlich, in den vollen Probendicken ausgestanzt. An den 315 mm langen und 35 mm breiten Proben wurde in Herstellrichtung der Schlauchmembran Bruchfestigkeit [BF] und Bruchdehnung [BD] bestimmt. Als Referenz wurden zusätzliche Zugversuche an ungeschädigten Proben durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche.

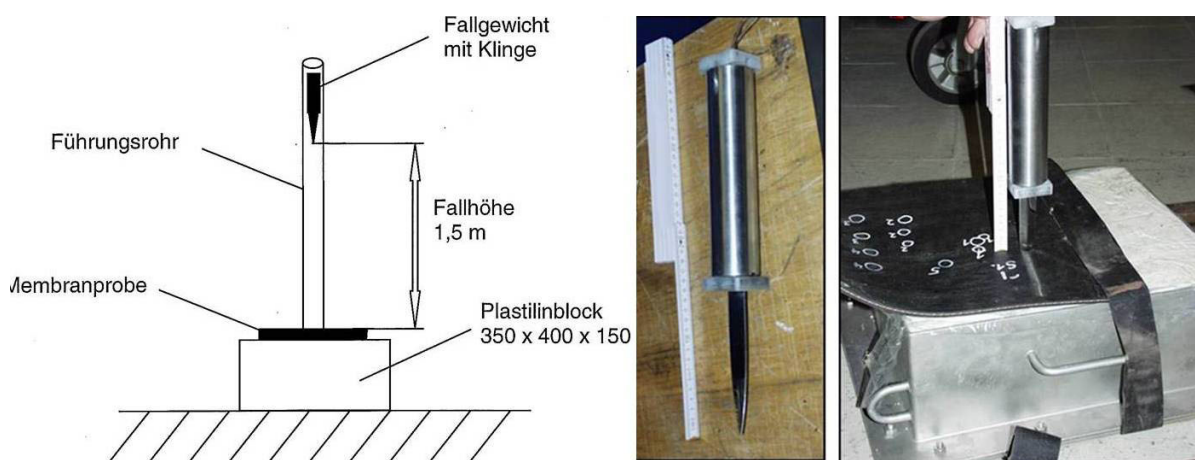
**Tabelle 2** Ergebnisse der Zugversuche nach DIN EN ISO 283

Material	Waffenart	Probenanzahl	Geschwindigkeit MW [m/s]	Zugversuche			
				MW BF [N/mm]	MW BD [%]	BF min [N/mm]	BF max [N/mm]
SBR 2-lagig	O-Probe	4	0	352	29,8	378	404
	Luftgewehr	4	151	370	31,2	358	384
	Winchester	6	838	299	29,5	248	334
	Handfeuerwaffe	4	387	251	26,4	230	274
	Sportschützengewehr	4	360	245	26,8	226	261
SBR 3-lagig	O-Probe	4	0	415	32,0	405	426
	Luftgewehr	4	152	368	31,0	350	404
	Winchester	6	835	382	28,0	345	403
	Handfeuerwaffe	4	388	323	29,0	290	281
	Sportschützengewehr	4	359	289	27,0	274	309
EPDM 2-lagig	O-Probe	3	0	392	13,7	387	397
	Luftgewehr	4	149	391	13,4	377	401
	Winchester	4	841	291	12,5	276	314

Aufgrund der geringeren Probenfläche war bei dem EPDM-Material nur ein Beschuss mit Winchester und Luftgewehr möglich. Es fällt auf, dass die Ergebnisse teilweise eine große Streuung aufweisen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Fadendichte aufgrund der Probengeometrie sehr unterschiedlich ist und damit einen großen Einfluss hat. Im Vergleich mit den Referenzproben (0-Proben) wird mit dem Luftgewehr keine signifikante Beschädigung erreicht. Bei dem SBR-Material zeigt die Handfeuerwaffe und das Sportschützengewehr die größte Schädigung. Bei dem zweilagigen SBR wurde im Vergleich der Minimalwerte BF min von der 0-Probe (378 N/mm) und der beschossenen Probe mit dem Sportschützengewehr (226 N/mm) mit etwa 40% die größte Abnahme der Bruchfestigkeit festgestellt. Zum Vergleich: Geht man von einer Gesamtsicherheit von  $\gamma = 8$  aus, würde sich der Sicherheitsbeiwert auf 4,8 reduzieren (Anmerkung: Die Sicherheitsbeiwerte sind bei Schlauchwehren im Vergleich zu anderen Werkstoffen hoch und liegen im Bereich von etwa 6 bis 10).

## 4 Untersuchungen zur Widerstandsfähigkeit gegenüber Stichwaffen

An handelsüblichen Schlauchmembranen wurde ferner die Widerstandsfähigkeit gegenüber Stichwaffen durch Einstich- und Weiterschneidversuche untersucht. Bei den im freien Fall durchgeführten Einstichprüfungen lagen die Proben wie aus Abbildung 8 ersichtlich auf Plastilin.

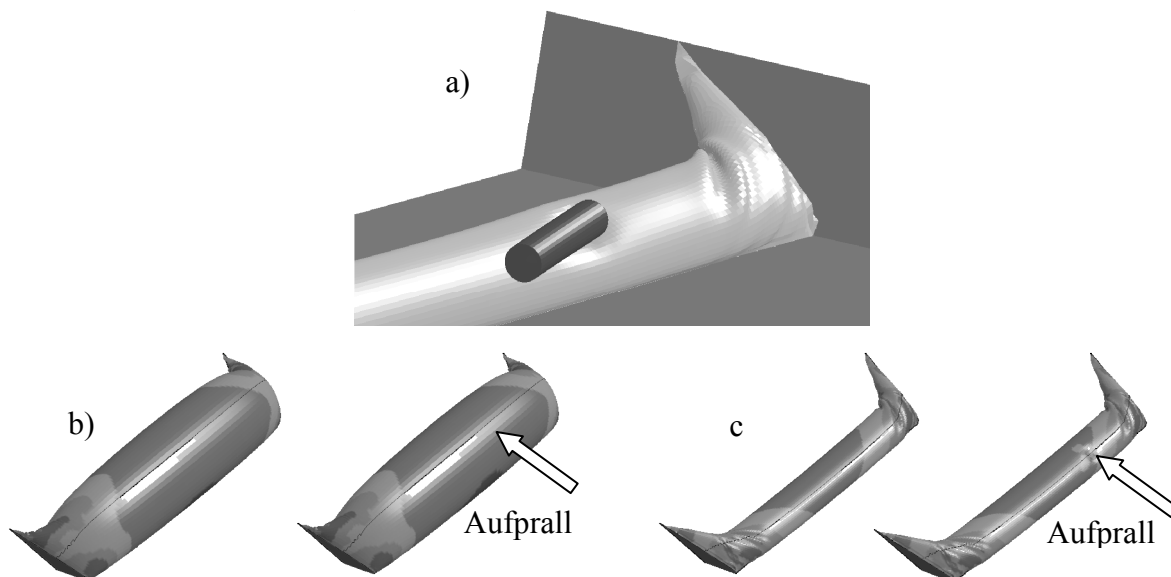


**Abbildung 8:** Prüfmethodik (links), Klinge (Mitte) und Probe auf Plastilinblock (rechts)

Das Messer, bestehend aus Fallgewicht und Klinge, hatte eine Masse von 2,60 kg. Daraus ergibt sich nach *Kamuf (2007)* eine Einstichenergie von 38 Nm, die von einer erwachsenen Person aufgebracht werden kann. Alle untersuchten Proben wurden im Versuch durchstoßen, wobei die Eindringtiefe mit der Membrandicke und der Gewebeanzahl abnimmt. Zur Bestimmung der Schnittresistenz bei einer bereits mit einer Klinge durchdrungenen Schlauchmembran wurden Weiterschneidversuche durchgeführt. Die 300 x 500 mm großen Proben wurden in Längs- und Querrichtung mit einer Klinge durchdrungen und anschließend die Kräfte gemessen, die für eine Schneidgeschwindigkeit von 1 mm/s erforderlich sind. Die Mittelwerte der Schneidkräfte lagen zwischen 98 N, bei der zweilagigen Membran in Längsrichtung, und 204 N, bei der dreilagigen Membran in Querrichtung. Allerdings muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass der Hersteller der dreilagigen Membran eine höhere Fadendichte des Gewebes verwendete. Somit ist die Schnittresistenz einer Schlauchmembran abhängig von der Schneidrichtung, von der Dicke und vom verwendeten Gewebe.

## 5 Untersuchungen zum Aufprall von Treibgut

Die Untersuchungen zum Aufprall von Treibgut erfolgten mit dem Finite-Elemente-Programm *LS-DYNA*. Die Membran wurde dabei mit 74.000 Schalenelementen und einem elasto-plastischen Materialverhalten modelliert. Der Baumstamm wurde als Zylinder bzw. als Zylinder mit aufgesetzten Kegeln abgebildet und war nicht-deformierbar. Die Oberwassertiefe betrug 2,0 m und als Füllmedium wurde Luft und Wasser betrachtet. Einzelheiten zur Modellbildung und Simulation sind in *Maurer et al. (2012)* zu finden. Der Aufprall eines Baumstammes auf ein Schlauchwehr ist in Abbildung 9a) dargestellt. Dabei trifft der Baumstamm in einem bewusst ungünstigen Winkel, mit der Zylinderkante, auf das Schlauchwehr auf.



**Abbildung 9:** a) Aufprall eines Zylinders auf ein luftgefülltes Schlauchwehr; Anprallgeschwindigkeit 4 m/s; b) Von-Mises-Spannungen (Luftfüllung, 2 bar) vor und während des Aufpralls; c) Von-Mises-Spannungen (Luftfüllung, 0,2 bar) vor und während des Aufpralls

Bei einem hohen Innendruck von 2 bar prallt der Baumstamm ab und verursacht keine sichtbaren Deformationen. Die Von-Mises Spannungen im Aufprallbereich sind nur unwesentlich erhöht (s. Abbildung 9b). Im Falle eines geringeren Innendrucks oder bei Wasserfüllung sind sowohl die Deformation als auch die Von-Mises Spannungen im Aufprallbereich größer. Im Vergleich zu den Maximalspannungen, die im Bereich der Wehrwangen auftreten, sind die Spannungen infolge des Aufpralls jedoch sehr viel geringer (s. Abbildung 9c). Auch bei einer Erhöhung der Anfangsgeschwindigkeit des Baumstammes auf 4 m/s und einer

relativ geringen Gasfüllung von 0,2 bar bleiben die Spannungen in einem akzeptablen Bereich. Das Auftreten einer V-förmigen Einkerbung („V-Notch“) wurde in keinem Fall beobachtet. Letzteres ist auch die Folge der praxisrelevanten Innendrucke im Schlauchwehr.

## 6 Reparaturmöglichkeiten

Bei der Reparatur einer Schlauchmembran sind grundsätzlich die beiden Verfahren Heiß- und Kaltvulkanisation zu unterscheiden. Die Heißvulkanisation muss unter Druck und Zugabe von Kautschuk bei Temperaturen von mehr als 130°C erfolgen. Das Verfahren ist in der Regel nur im Falle einer Revision und beim Ausbau der Schlauchmembran einsetzbar. Bei der Kaltvulkanisation handelt es sich um ein Klebeverfahren mit handelsüblichem Reparaturmaterial, Klebelösung und Flickmaterial, aus den Bereichen Fördergurt- oder Reifenreparatur. Kleinere Schäden ohne sichtbares Gewebe können wie bei einem Fahrradreifen repariert werden: Schadstelle trocknen, säubern, aufrauen, mit Kleber einstreichen, Flicker auflegen, andrücken, aushärten lassen und fertig. Bei Schadstellen mit offenliegendem Gewebe sollten Fachfirmen hinzugezogen werden.

## 7 Zusammenfassung

Aus der Vergangenheit sind nur wenige Fälle von Vandalismus bekannt. Bei den bekannten Fällen war keine dauerhafte Funktionsbeeinträchtigung gegeben und die Schadstellen konnten mit geringem Aufwand repariert werden. Hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Beschädigung, z.B. durch Treibgut oder durch Vandalismus sind wassergefüllte Schlauchwehrranlagen im Vorteil. Das Füllmedium Wasser entweicht im Falle einer Beschädigung der Schlauchmembran langsamer als Luft. Zur Quantifizierung wurden nach umfangreichen Beschuss- und Stichtests die Schäden und Folgen analysiert. Hierbei zeigte sich, dass sich die Einschussstellen aufgrund der Elastizität des Elastomers wieder schließen. Die Widerstandsfähigkeit gegen Beschädigung wird maßgeblich beeinflusst durch die Anzahl der Gewebelagen, der Membrandicke und dem Gewebe. Abschließend bleibt festzustellen, dass die durchgeführten Vandalismusuntersuchungen keinen Hinweis auf eine plötzliche Funktionsbeeinträchtigung der Schlauchmembrane geben. Ferner zeigen die Finite-Elemente-Analysen zum Anprall von Treibgut geringe Spannungskonzentrationen, so dass hierbei von einer geringen Gefährdung auszugehen ist.

## 8 Literatur

- DIN EN ISO 283 Textilfördergurte - Zugfestigkeit bei voller Gurtdicke, Bruchdehnung und Dehnung bei breitenbezogener Bruchkraft – Prüfverfahren, Ausgabe 2008-02
- Kamuf, I. (2007): Untersuchungen zur Beschädigung durch Vandalismus, BAW-Mitteilungsblatt Nr. 91, Karlsruhe, S. 77 - 86
- Maisner, M.; Gebhardt, M.; Gabrys, U.;(2009), Anforderungen an Werkstoffe für Schlauchmembrane, KGK, Verlag Hüthig, S. 537 – 539
- Maurer, A., Gebhardt M. und Schweizerhof, K. (2012): Finite-Elemente-Analysen zur Optimierung der Geometrie und der Spannungsverteilung in der Membran von Schlauchwehren, 35. Dresdner Wasserbaukolloquium 2012.
- Tam, P.W.M. (1997): Use of rubber dams for flood mitigation in Hong Kong, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, S.73-78.
- U.S. Army Corps of Engineers (2001): Ice Engineering, Performance survey of inflatable dams in ice-affected waters, U.S. Army Research and Engineering Laboratory, Ice Engineering Information Exchange Bulletins, Hanover, New Hampshire, S.1-5.

Autoren:

Matthias Maisner  
Dr.-Ing. Michael Gebhardt  
Ulrike Gabrys

Bundesanstalt für Wasserbau  
Kussmaulstr. 17  
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726-4860  
Fax: +49 721 9726-2110  
E-Mail: matthias.maisner@baw.de  
michael.gebhardt@baw.de  
ulrike.gabrys@baw.de

Anne Maurer,  
Prof. Dr.-Ing. Karl. Schweizerhof

Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Mechanik  
Otto-Ammann-Platz 9  
76131 Karlsruhe

Tel.: +49 608 42070  
Fax: +49 351 01234 56  
E-Mail: anne.maurer@kit.edu