

Stand der Schlauchwehrtechnik, Anwendungsbeispiele und Betriebserfahrungen

DR.-ING. MICHAEL GEBHARDT, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, KARLSRUHE

1 Anlass und Motivation für das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

Die Staustufe Markendorf an der Aller musste altersbedingt grundinstand gesetzt bzw. erneuert werden. Das zuständige Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Verden entschied sich nach Voruntersuchungen für einen Neubau im Unterwasser der bestehenden Anlage und wählte ein zweifeldriges Schlauchwehr. Mit der Inbetriebnahme der neuen Wehranlage werden an einer Bundeswasserstraße zum ersten Mal elastische Wehrverschlüsse zur Abfluss- und Stauzielregelung eingesetzt. Parallel zu diesem Projekt erfolgt der Ersatzneubau für das Wehr Bahnitz an der Unteren Havel: Das wassergefüllte Schlauchwehr ist Bestandteil des Projekts 17, eines der „Verkehrsprojekte Deutsche Einheit“, welches den Ausbau der bestehenden Wasserstraßenverbindung Hannover-Magdeburg-Berlin zu einer leistungsfähigen europäischen Verbindung der Wasserstraßenklasse Vb vorsieht.

Zu Beginn der Planungen für die beiden Schlauchwehre lagen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) keine Kenntnisse oder Erfahrungen über diesen Verschlusstyp vor. Auch über eine Literaturrecherche konnten nicht in ausreichendem Maße Angaben über Hydraulik, Schwingungsanfälligkeit, Materialbeschaffenheit, Dauerhaftigkeit und Frostgefährdung von Schlauchwehren gewonnen werden. Hinweise und Empfehlungen zur Planung beschränkten sich zumeist auf die Angaben der Hersteller. Aus diesem Grund wurden in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) seit Sommer 2001 sehr umfangreiche Grundsatzzuntersuchungen über den für die WSV neuen Verschlusstyp durchgeführt. Ziel des interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsvorhabens (FuE) der Abteilungen Wasserbau und Bautechnik zum „Einsatz von Schlauchwehren an Bundeswasserstraßen“ war es, Vor- und Nachteile sowie Anwendungsgrenzen für wasser- und luftgefüllte Schlauchwehre aufzuzeigen. Darüber hinaus sollten die Grundlagen für Planung, Bemessung und Ausführung von Schlauchwehren an Bundeswasserstraßen formuliert, sowie Konstruktionshinweise und Materialanforderungen erarbeitet werden, um den WSV-Dienststellen in Zukunft die Prüfung der Anwendung von Schlauchwehren bei Wehersatz- oder -neubauten zu ermöglichen.

2 Wehranlagen an Bundeswasserstraßen

2.1 Investitions- und Unterhaltungsumfang

Zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs auf den Bundeswasserstraßen ist eine Vielzahl von Wasserbauwerken notwendig, die durch die Dienststellen der WSV errichtet, betrieben und unterhalten werden. Hierzu zählen neben Schleusen, Schiffshebewerken, Brücken, Sicherheitstoren und Pumpwerken auch etwa 280 Wehranlagen und acht Sperrwerke [Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, www.wsv.de]. Wasserbauwerke sind langlebige Wirtschaftsgüter und stellen einen Anteil von rund einem Drittel am Anlagevermögen des Verkehrswasserbaus in Deutschland dar (die Binnenwasserstraßen wiesen für 2003 ein Bruttoanlagevermögen von 39,8 Mrd. € aus [1]). Rund die Hälfte aller Schleusen- und Wehranlagen sind dabei älter als 60 Jahre, wie die Altersstruktur der Anlagen in Bild 1 deutlich macht. Für die nächsten Jahrzehnte ist daher ein großer Investitionsbedarf zu erwarten, wie zum Beispiel an der Bundeswasserstraße Neckar:

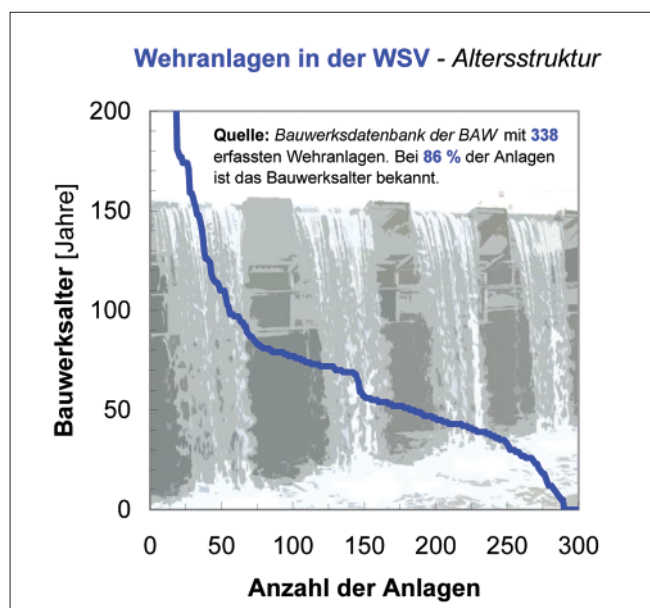


Bild 1: Altersstruktur der Wehranlagen an Bundeswasserstraßen

Hier bestehen seit den 60er Jahren Investitionsprogramme, mit denen gewährleistet werden soll, dass die heute bis zu 80 Jahre alten Anlagen auch weiterhin sicher betrieben werden können. Ein Schwerpunkt bei diesen Investitionsmaßnahmen ist die systematische Instandsetzung und Erneuerung des Stahlwasserbaus der Wehre. Der Unterhaltungsumfang wird deutlich an den 12 Wehranlagen des WSA Heidelberg, die Mitte der 20er Jahre erbaut wurden und zusammen 40 Wehrfelder mit Wehrverschlüssen besitzen. Da jeder Verschluss in der Regel in einem Intervall von 15 bis 20 Jahren einer Instandsetzung unterzogen werden muss, werden pro Jahr vier bis sechs Wehrverschlüsse instand gesetzt, was einem jährlichen Investitionsvolumen von rund 2,5 Mio. € entspricht. Eine Wehrverschluss-Instandsetzung dauert dabei mit allen Arbeiten in der Regel von April bis November [Wasserstraße – Unterhaltung – Instandsetzung der Wehre, WSA Heidelberg, www.wsa-heidelberg.wsv.de].

2.2 Verschlussstypen und Abmessungen der beweglichen Wehre

Als Verschlussysteme an den staugeregelten Bundeswasserstraßen werden am häufigsten Schütze eingesetzt. Unter diesem Oberbegriff werden hier alle Wehrverschlüsse wie Gleit-, Roll- oder Hakendoppelschütze zusammengefasst, die seitlich gelagert und in Nischen geführt werden (s. Bild 2). Die Wehrfeldbreiten reichen bis 66,80 m und die Fallhöhen bis zu 14,50 m. Statistisch betrachtet weist das durchschnittliche Wehrfeld eine mittlere Wehrfeldbreite von 19,60 m und eine mittlere Fallhöhe von 4,10 m auf. Im Hinblick auf die Fallhöhen und vor dem Hintergrund bereits realisierter Anlagen (s. Abschnitt 3), zeigt diese Auswertung ein sehr hohes Einsatzpotenzial von Schlauchwehren als neuer Verschlussstyp in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung.

3 Schlauchwehre als Wehrverschlüsse

3.1 Geschichtlicher Rückblick und Anfänge der Schlauchwehrtechnologie

Bereits Mitte der 50er Jahre entwickelte der Amerikaner Norman Imbertson gemeinsam mit der Firestone Tire and Rubber Company unter der Bezeichnung Fabridam einen elastischen, auffüllbaren Verschlussstyp aus einer gewebeverstärkten Gummimembran. Als leitender Ingenieur des Los Angeles Department of Water and Power nahm er schließlich am Los Angeles River ein wassergefülltes 1,83 m hohes und 40,0 m breites Schlauchwehr in Betrieb. Die Wasserstandsregulierung erfolgte schon damals automatisch [2]. Der japanische Hersteller Sumitomo Electric Industries Incorporated erwarb 1968 die Schlauchwehrtechnologie von Firestone und installierte 1977 das erste Schlauchwehr zu Bewässerungszwecken in Taiwan [3]. Nachdem die ersten Schlauchwehre fast ausschließlich mit Wasser-

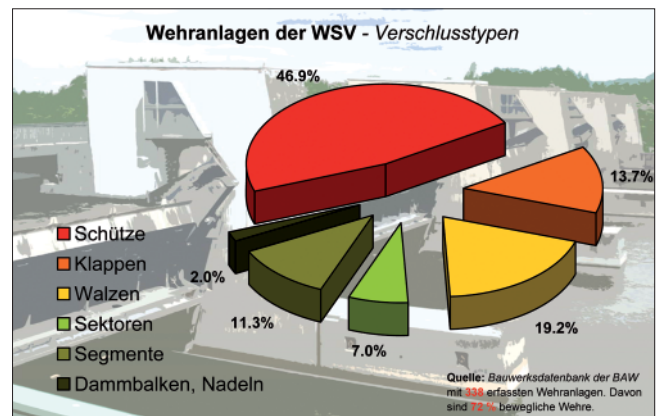
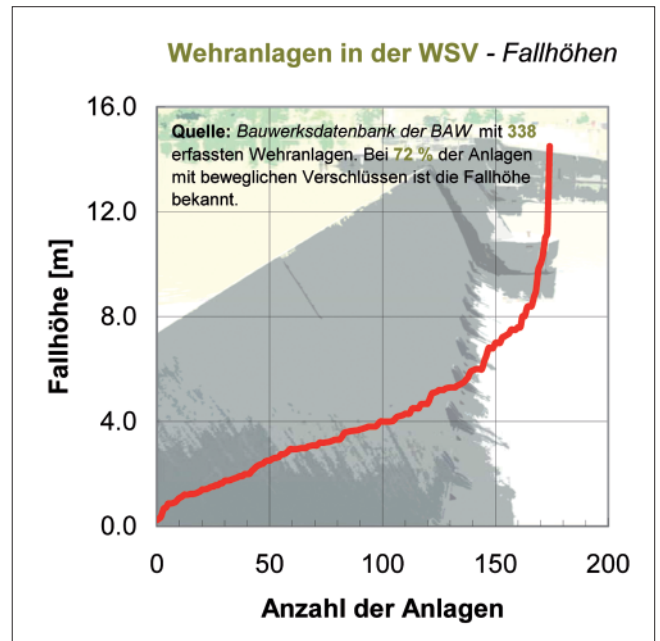


Bild 2: Fallhöhen und Verschlussstypen der Wehranlagen an Bundeswasserstraßen

füllung betrieben wurden, stellte Bridgestone Corporation 1978 in Japan und vier Jahre später auf dem internationalen Markt die ersten luftgefüllten Schlauchwehre vor.

3.2 Stand der Technik

Schlauchwehre sind elastische Wehrverschlüsse, bei denen eine Gummimembran so auf dem massiven Wehrkörper befestigt wird, dass ein Staukörper mit dichtem Innenraum entsteht. Die Gummimembran besteht im Allgemeinen aus einer Elastomerbahn mit einer oder mehreren Gewebeeinlagen aus Polyester oder Polyamid, die als Festigkeitsträger dienen. In der Vergangenheit wurden Verschnitte aus Natur- und Synthetikgummi (NR und SBR), Chloroprenkautschuk (CR) oder Ethylen-Propylen-Dien-Polymere (EPDM) verwendet.

Charakteristisch für Schlauchwehre ist die ebene Lastabtragung über die Membran und die Befestigungskonstruktion in den massiven Wehrkörper. Da-

durch werden große Wehrfeldbreiten, eine einfache Ausführung des massiven Wehrkörpers, der Wehrpfeiler und der Wehrwangen sowie ein geringer Aufwand für Einbauten und Verwahrungen möglich. Die elastischen Verschlüsse sind in hohem Maße dicht und wenig empfindlich gegenüber Erschütterungen.

Die Gummimembran wird mit Klemmschienen auf der Wehrschwelle und an den Wehrpfeilern befestigt, wobei man zwischen der ein- oder zweireihigen Verankerung unterscheidet, die neben den hydraulischen Randbedingungen und dem Füllmedium auch vom Konstruktionsprinzip der Hersteller abhängt. Das häufigste Prinzip ist die zweireihige Verankerung, bei der die Schlauchmembran auf der Ober- und der Unterwasserseite am Wehrkörper fixiert wird. Bei der Montage wird die Schlauchmembran zunächst an der unterstromigen Seite angeklemt, wobei die Befestigungsschiene im Endzustand innerhalb oder außerhalb des Schlauchkörpers angeordnet sein kann. Anschließend wird die Membran umgeschlagen und auf der oberstromigen Seite fixiert (s. Bild 3). Bei der einreihigen Verankerung hingegen werden beide Enden mit einer Befestigungsschiene auf der Oberwasserseite an den Wehrkörper geklemmt. Für dieses Prinzip wird zwar bei gleicher Schlauchhöhe gegenüber der zweireihigen Verankerung mehr Material benötigt, dafür entfällt aber die zweite Befestigungsschiene. Der Hersteller Bridgestone hat sich für die einreihige Verankerung ein Prinzip patentieren lassen, bei dem die Schlauchmembran aus zwei Teilen besteht, die bereits werksseitig an der unterstromigen Seite durch Heißvulkanisation miteinander verbunden werden. Durch diese Verbindungsfläche entsteht im aufgestellten Zustand ein Deflektor, der zur Stabilisierung des meist mit Luftfüllung eingesetzten Schlauchkörpers im überströmten Zustand dient. Im abgelegten Zustand liegt die Schlauchmembran vollkommen eben auf dem Ablagetisch, ohne dass sich eine Falte am unterstromigen Ende bildet. Der Platzbedarf bei der Montage ist geringer als bei der zweireihigen Montage, weil die Membran auf einer Rol-

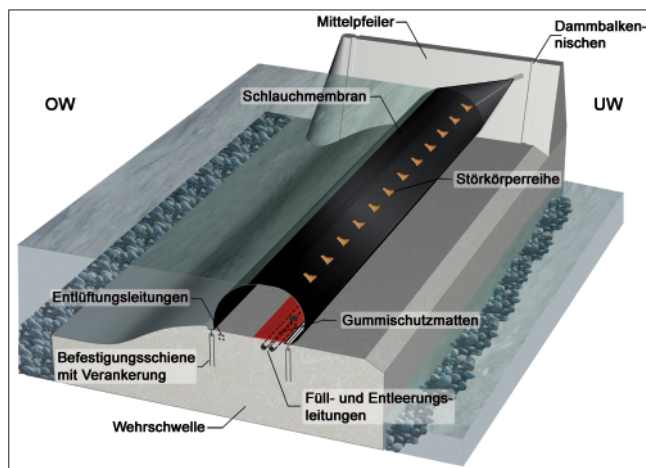


Bild 3: Systemskizze für eine zweireihige Verankerung wie beim Allerwehr Marklendorf

le angeliefert und in ihre endgültigen Lage abgewickelt werden kann.

Bei wassergefüllten Schlauchwehren erfolgt die Entnahme des Füllmediums in der Regel im Oberwasser der Stauanlage. Vom Steuerschacht gelangt das Wasser über eine oder mehrere Zulaufleitungen über Einlauföffnungen im Ablagetisch in den Schlauchkörper. Der Steuerschacht kann dabei aus mehreren Kammern bestehen, wie beispielsweise in Bild 4 dargestellt: Hier dient die erste Kammer als Pumpenschacht, in der sich auch Schwebstoffe und Sedimente ablagern können. Von dort aus wird das Wasser in den Füllschacht gefördert, dessen Wasserstand die Druckhöhe und damit die Durchflussmenge in den Zulaufleitungen bestimmt. Die Rücklaufleitungen münden in den Regulierschacht, in dem eine Überfallwand den maximalen Innendruck im Schlauch begrenzt. Für die Entleerung kann der Wasserstand im Regulierschacht und damit der Schlauchinnendruck über einen Schieber abgesenkt werden.

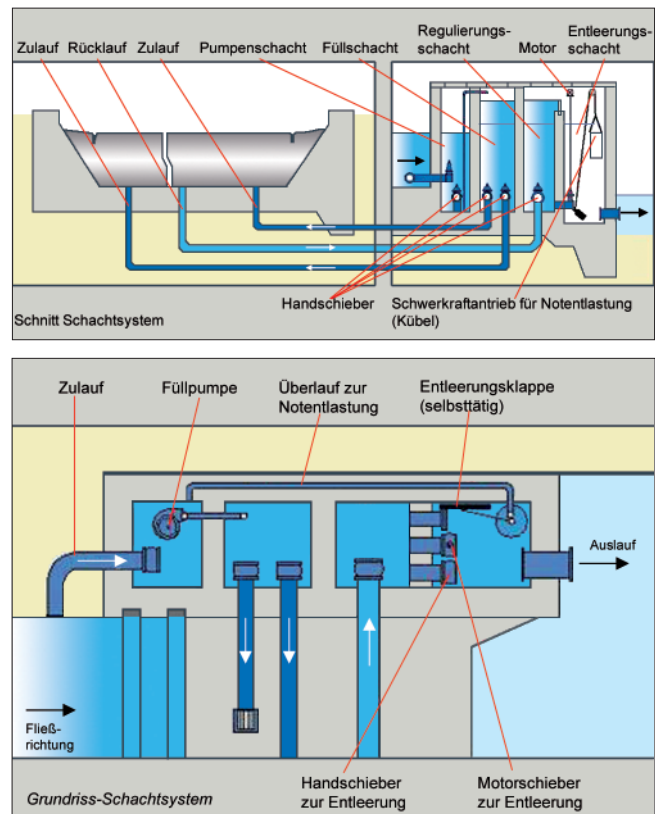


Bild 4: Prinzipskizze für einen mehrteiligen Steuerschacht nach Hydroconstruct

Ein zweites Steuerungsprinzip wurde bei den beiden Schlauchwehren an der Aller und an der Unteren-Havel-Wasserstraße (UHW) angewendet: Anstatt mehrerer Kammern befindet sich im Steuerschacht ein Behälter, in den das Wasser aus dem Pumpenschacht gefördert wird. Die Höhenlage des Behälters und der Wasserstand geben den Schlauchinnendruck vor. Bei einem Absenken des Behälters läuft das Wasser über den Behälterrand und der Schlauch entleert sich (siehe Beitrag Meine „Bundeswasserstraße Aller – Schlauch-

wehrverschlüsse für das Allerwehr Marklendorf“ in diesem Heft). Bei den meisten Anlagen liegt die Druckhöhe im Schlauchinneren zwischen 20 % und 60 % über dem Oberwasserstand (Innendruckkoeffizient $\alpha_0 = 1,20$ bis $1,60$).

Bei extrem tiefen Temperaturen kann vorbeugend eine Umwälzung mit vorgewärmten Wasser, z. B. durch eine Beheizung des Füllschachts oder durch eine Entnahme von Grundwasser, das Füllmedium vor dem Einfrieren schützen. (Bei den beschriebenen Möglichkeiten handelt sich aber um Vorsichtsmaßnahmen, da nach eigenen Recherchen keine Fälle bekannt sind, bei denen ein wassergefülltes Schlauchwehr vereist ist und damit nicht mehr bewegt werden konnte.) Ein weiterer Aspekt, der bei der Planung zu berücksichtigen ist, ist der, dass bei hohen Unterwasserständen das vorhandene Druckgefälle nicht ausreicht, um den Schlauch vollständig oder in einer angemessenen Zeit zu entleeren. In diesen Fällen kann eine Pumpe unterstützend zur Entleerung eingesetzt werden, sodass sich die Schlauchmembran vollständig ablegen kann. Entlüftungsventile an den Wehrwangen stellen dabei sicher, dass evtl. vorhandene Luft beim Ablegen entweichen kann.

Bei Luftfüllung sind die baulichen Aufwendungen etwas geringer: Der Steuerschacht entfällt hier, stattdessen erfolgt die Befüllung mit Hilfe eines Luftverdichters (Kompressor). Vom Luftverdichter führt eine Pendelleitung durch den Wehrkörper und mündet in mehreren Einlauföffnungen im Ablagetisch. Die Pendelleitung dient zum Befüllen und Entleeren des Schlauchs. Sie schließt außerdem an einen Kondensatschacht an, der das Sicker- oder Kondenswasser sammelt. Häufig verlaufen im Schlauchinneren in Querrichtung zusätzliche Entlüftungsleitungen (engl. spacer), die zu seitlichen Öffnungen in den Wehrwangen bzw. Wehrpfeilern führen. Sie stellen sicher, dass bei der Entleerung kein Restvolumen im Schlauch verbleibt. Alternativ dazu werden in Umfangsrichtung verlaufende profilierte Matten (engl. drain pads) verwendet, die die Luft zu den Einlauföffnungen führen, sodass der Schlauchkörper sich vollständig entleeren kann. Der Betriebsdruck ist im Vergleich zu wassergefüllten Schlauchwehren etwas niedriger und entspricht meistens der Druckhöhe im Oberwasser (Innendruckkoeffizient $\alpha_0 = 1,00$). Die Schlauchform ist eher kreisförmig, was zu einem geringeren Schlauchumfang und einer geringeren Ablagelänge der Membran führt. Durch den 30 % bis 40 % geringeren Materialverbrauch und den kürzeren Ablagetisch ergeben sich etwas geringere Kosten für das luftgefüllte Schlauchwehr. Außerdem sind die Stellzeiten durch das geringere Volumen und die höheren Förderleistungen kürzer als bei wassergefüllten Schlauchwehren [4].

3.3 Erfahrungen mit der Schlauchwehrtechnologie in Deutschland

Erste Erfahrungen mit der Schlauchwehrtechnologie wurden Anfang der 70er Jahre an der Zwickauer Mulde in der Nähe von Chemnitz gemacht. Ein 0,85 m hohes und 46,0 m breites Schlauchwehr auf einer festen Wehrschwelle war das erste Anwendungsbeispiel in der damaligen DDR. Die Konstruktion bestand aus mehreren aneinandergereihten 8,0 m langen Schlauchkörpern, die selbst aus zwei vorgeformten halbkugelförmigen Böden und dem zylindrischen Mantelteil hergestellt wurden. Als Material für die Schlauchmembran wurde ein beidseitig mit Chloropren-Kautschuk (CR) beschichtetes Polyamidgewebe verwendet. Die Schlauchkörper waren über ein „Haltetuch“ am festen Wehrkörper befestigt und konnten über angeschlossene Leitungen mit Luft befüllt werden. Zusätzliche „Schutz- und Wehrwagentücher“ sollten Beschädigungen durch Eis oder Treibgut verhindern [5].

Eine ähnliche Lösung hatte das 1975 gebaute Schlauchwehr in Hollerich an der Lahn, allerdings wurde hier als Füllmedium Wasser verwendet und im Gegensatz zur Konstruktion am Muldewehr Penig waren die 4 – 5 mm dicken Schlauchmembrane der niederländischen Fa. Nederhorst B.V. zur Sohle hin offen. Die beiden 17,60 m langen und 2,05 m hohen Schlauchkörper waren als Revisionsverschluss für eine Versenkwalze vorgesehen, die sich in einem sehr schlechten Zustand befand. Sie sollten im Falle eines Wehrschadens den Stau wieder aufrichten. Nach wenigen Jahren, in denen die Schlauchkörper lediglich zu Inspektionszwecken befüllt wurden, war der rechte Schlauch so stark beschädigt, dass er wieder demontiert wurde.

Bis heute wurden in Deutschland annähernd 70 Schlauchwehre installiert, von denen rund zwei Drittel mit Wasser und ein Drittel mit Luft betrieben werden. Eine Übersicht der bestehenden Anlagen in Bild 5 zeigt neben den beiden im Bau befindlichen Wehren in Marklendorf und Bahnitz ausschließlich Schlauchwehre an nicht schiffbaren Gewässern. Darunter befinden sich aber auch Anlagen an Lech, Neckar, Wertach oder Regnitz, die im Hinblick auf ihre Wasserführung durchaus zu den größeren Flüssen in Deutschland zu rechnen sind. In Eschwege gibt es bereits ein Schlauchwehr an der Bundeswasserstraße Werra, allerdings nicht im Hauptschluss und nicht in einem Abschnitt, der dem allgemeinen, motorbetriebenen Verkehr dient. Die größten Anlagen in Bezug auf die Schlauchhöhe befinden sich gegenwärtig in Türkheim an der Wertach bei Kaufbeuren und in Kiebingen am Neckar bei Tübingen mit Schlauchhöhen von 3,70 m und 3,30 m. Die Anlage mit der größten Wehrbreite wurde im Herbst 2001 in Lechbruck am Lech in der Nähe von Füssen im Allgäu in Betrieb genommen. In Tabelle 1 finden sich weitere Angaben zur Nutzung und zu den Abmessungen.

Nr	Ort	Bundesland	Gewässer	Nutzung	Typ	Jahr	Kenndaten		
							<i>n</i>	<i>b</i>	<i>h</i>
1	Ainring	Bayern	Saalach	E	W		2	26,00	0,84
2	Arnsberg	NRW	Kläranlage	A	W		1	15,00	0,75
3	Augsburg	Bayern	Wertach	E	L		2	20,00	2,24
4	Augsburg	Bayern	Lech				1		
5	Chemnitz	Sachsen	Klaffenbach	WR	L		1	8,50	0,60
6	Connewitz	Sachsen	Weißer Elster	WR	L		1	32,00	1,40
7	Connewitz	Sachsen	Pleiße				2	4,50	
8	Dessau	Sachsen-Anhalt	Saale	E	L	1993	1	34,80	0,80
9	Ebenhofen	Bayern	Wertach	E	L	1953	1	25,00	2,90
10	Erlangen	Bayern	Regnitz	E	W	1981	1	22,40	1,20
11	Erl. -Baiersdorf	Bayern	Regnitz	E	W	1994	2	27,00	1,85
12	Eschwege	Hessen	Werra	E	W		2	21,00	1,20
13	Forst (Lausitz)	Brandenburg	Gewerbekanal	KW	W		1	10,00	1,20
14	Gorsdorf, HPP	Sachsen-Anhalt			L			22,43	0,80
15	Grainet	Bayern	Saußbach	E	L		1	11,00	1,30
16	Gronau	NRW	Dinkel	WR	L		2	6,00/8,00	1,40
17	Günzburg	Bayern	Günz					22,00	2,20
18	Günzburg	Bayern	Günz				1	6,60	
19	Hagen	NRW	Lenne	E	W	1984	2	20,90	1,20
20	Haltern	NRW	Stewer	WV	W		1	20,00	1,20
21	Hannover	Niedersachsen		A	L		1	1,40	1,30
22	Hegge	Bayern	Iller	E	L	2000	2	18,00	1,05
23	Ingolstadt	Bayern	Gerolsbach	WR	L		1	8,00	1,20
24	Jägersdorf	Thüringen	Saale	E	L		1	110,00	1,00
25	Jeßnitz	Sachsen-Anhalt	Mulde	E	L		2	18,50/19,41	1,40
26	Kalkreuth	Sachsen	Große Röder	WR	L		1	11,00	0,60
27	Kelbra	Sachsen-Anhalt	Helme/ Auslauf-Stausee	WR	W		1	16,00	0,70
28	Kiebingen	Baden-Württem.	Neckar	E	L	1998	2	23,00	3,40
29	Lechbruck	Bayern	Lech	E	W	2002	4	24,75/45,83	3,15/1,10
30	Leisnig	Sachsen	Freiberger Mulde	E	L	1997	3	51,00/42,00	0,80/0,60
31	Lunzenau	Sachsen	Zwickauer Mulde	E	L				
32	Marienberg (Rittersberg)	Sachsen	Schwarze Pockau		W		1		
33	Miesbach	Bayern	Leitzach	E	W	1986	1	30,00	0,80
34	München	Bayern	Lände	WR	L		1	5,00	0,70
35	Naichen	Bayern	Kemmelbach	E	W		1	7,60	1,30
36	Neuenbürg	Baden-Württem.	Enz	E	W		1	16,00	1,40
37	Neuenbürg	Baden-Württem.	Enz	E	W		1	16,00	1,20
38	Neuss-Selikum	NRW	Erft	WR	L		2	8,10	1,60
39	Ochtendung	Rheinland-Pfalz	Nette	E	W		1	5,00	0,85
40	Panke	Berlin	Berlin	WR	L		1	7,40	1,35

Tabelle 1: Wichtigste Daten der bestehenden Schlauchwehre in Deutschland

Nr	Ort	Bundesland	Gewässer	Nutzung	Typ	Jahr	Kenndaten		
							n	b	h
41	Plauen	Sachsen	Weißer Elster	KW	W		1	26,00	1,70
42	Plauen	Sachsen	Weißer Elster	E	W	1993	2	6,48	2,65
43	Regen	Bayern	Regen	E	W		1	11,00	1,10
44	Schiltach	Baden-Württem.	Kinzig	E	W		1	18,00	1,66
45	Selikum	NRW		WR	L		2	8,10	1,60
46	Sinsheim	Baden-Württem.	Elsenz	HW	L	2004	1		
47	Stadtroda	Thüringen	Roda	E	L		1	10,00	1,10
48	Staudachmühle	Baden-Württem.	Argen	E	W	1984	1	26,60	0,70
49	Thierbach	Sachsen	Zwickauer Mulde	E	W/L		2	11,60	1,98
50	Trattendorf	Sachsen	Spree	E	L		1	29,50	1,55
51	Truchtlaching	Bayern	Alz	E	W	1997	1	30,00	1,00
52	Tullau	Baden-Württem.	Kocher	E	W		1	30,00	1,30
53	Türkheim	Bayern	Wertach	E	L	1998	2	16,00	3,70
54	Tzschelln	Brandenburg	Spree	E	L		1	5,10/14,80	1,30
55	Uhingen	Baden-Württem.	Fils	E	W	1999	2	15,00	1,20
56	Weingarten	Baden-Württem.	Scherzach	E	L		1	4,50	1,30
57	Weisflog	Sachsen	Zschopau	E	W	1995	1	25,00	2,60
58	Weißwasser	Brandenburg	Spree	E	L		2	5,10/14,80	1,30
59	Weitnau/Klausen	Bayern	Obere Argen	E	W	1990	1	27,50	0,60
60	Wertheim	Baden-Württem.	Tauber	E	W		1	11,00	1,20
61	Wildbad	Baden-Württem.	Große Enz	E	W	1989	1	12,00	2,50
62	Wolfach	Baden-Württem.	Kinzig	E	W		1	22,00	0,80
63	Wolkenstein	Sachsen	Zschopau	E	L		2	5,50	0,90
64	Zell	Baden-Württem.	Wiese	E	W		1	25,00	1,40
65	Zittenhofen	Bayern	Weißer Regen	E	L		1	20,70	1,30
66	Zöblitz	Sachsen	Pockau	E	W		1	12,00	1,30
67	Zwiesel	Bayern	Großer Regen	E	W	1991	1	11,20	1,10
68	Marklendorf	NRW	Aller	S	W	2006	2	23,60	2,20
69	Bahnitz	Brandenburg	Untere Havel	S	W	2007	2	30,30	2,40

E – Energieerzeugung, WV – Wasserversorgung, WR – Wasserstandsregelung, A – Abwasserentsorgung, KW – Kühlwasserentnahme, L – Luftfüllung, W – Wasserfüllung, HW – Hochwasserrückhalt, S – Schifffahrt

Tabelle 1: Wichtigste Daten der bestehenden Schlauchwehre in Deutschland (Fortsetzung)

3.4 Ausführungsbeispiele

3.4.1 Wasserkraftanlage Türkheim an der Wertach

Die Wehranlage Türkheim an der Wertach wurde von einem privaten Kraftwerksbetreiber 1996 umgebaut und um eine Wasserkraftanlage erweitert. Dabei wurde das Streichwehr durch ein 3,70 m hohes und 16,0 m breites luftgefülltes Schlauchwehr ersetzt. Die

dafür verwendete 8 mm dicke und zweilagig verstärkte Schlauchmembran aus EPDM des japanischen Herstellers Sumitomo ist über zwei Klemmschienen an der Wehrsohle befestigt. Die Zu- und Abfuhr von Luft erfolgt über eine Leitung mit drei Anschlüssen an der Sohle des Schlauchkörpers. Um die Entleerung bei abgelegtem Schlauch immer sicherzustellen, sind sogenannte „drain pads“ über den Anschlüssen angeordnet. Durch die Profilierung der „drain pads“ kann die Luft auch im teilabgelegten Zustand den Auslassöff-



Bild 6: Schlauchwehr Türkheim an der Wertach: oben links) Druckschleuse an der rechten Wehrwange, oben rechts) seitlicher Anschluss, unten links) Sickermatten (engl. drain pads), unten Mitte) Ein- bzw. Auslassöffnung, unten rechts) Blick vom linken Ufer

nungen zuströmen und aus dem Schlauchinneren entweichen. Eine weitere Besonderheit dieser Anlage ist, dass das Schlauchinnere zu Inspektionzwecken vom rechten Ufer aus über eine Luftschleuse begangen werden kann (s. Bild 6). Die für luftgefüllte Schlauchwehre typische V-Kerbe (s. Bild 15 oben rechts) nutzt der Kraftwerksbetreiber um Geschwemmsel, das sich im Oberwasser angesammelt hat, gezielt in das Unterwasser abzuführen. Um die V-Kerbe in der Lage zu fixieren, wurde der Schlauchumfang in diesem Bereich um ca. 2 cm reduziert. Rückblickend auf die ersten 10 Betriebsjahre ist die Bilanz des Betreibers sehr positiv: Nennenswerte Schäden traten bisher nicht auf, auch nicht bei dem Pfingsthochwasser 1999, bei dem ein 100-jährliches Hochwasser von 390 m³/s über die Wehranlage abgeführt wurde.

3.4.2 Wasserkraftanlage Kiebingen am Neckar

Ein weiteres Beispiel für ein luftgefülltes Schlauchwehr ist die Wasserkraftanlage Kiebingen der EnBW AG in der Nähe von Tübingen. Hier, im nicht schiffbaren Bereich des Neckars, wurde 1998 ein zweifeldriges

Schlauchwehr in Betrieb genommen mit einer Wehrfeldbreite von je 23,0 m und einer Verschlusshöhe von 3,30 m. Gegenüber einer konventionellen Stahlwasserbaulösung ergab sich bei der Gegenüberstellung der Investitionskosten allein für das Wehr ohne Baukostenanteil ein Preisvorteil von etwa 0,5 Mio. € Ein Luftverdichter mit einer Leistung von 135 m³/h hält die Schlauchkörper im nicht überströmten Zustand auf einem Absolutdruck von 1320 mbar [6].

Bei dem in Kiebingen eingesetzten Schlauchtyp handelt es sich um ein Patent der Firma Bridgestone, bei dem die Schlauchmembran aus zwei Teilen besteht, die bereits werksseitig an der unterstromigen Seite durch Heißvulkanisation miteinander verbunden werden. Durch diese Verbindungsfläche entsteht im aufgestellten Zustand ein Deflektor (engl. fin) und verhindert eine instabile Ablösung auf der Unterwasserseite und dadurch entstehende Druckschwankungen. Im abgelegten Zustand liegt die 13,8 mm dicke Schlauchmembran aus EPDM vollkommen eben auf dem Ablagetisch, ohne dass sich eine Falte am unterstromigen Ende ausbildet (s. Bilder 7, 8 und 9).



Bild 7: Schlauchwehr Kiebingen am Neckar: links) Krafthaus mit Wehranlage, rechts) Blick vom rechten Ufer



Bild 8: Schlauchwehr Kiebingen am Neckar: Klemmschiene an rechter Wehrwange

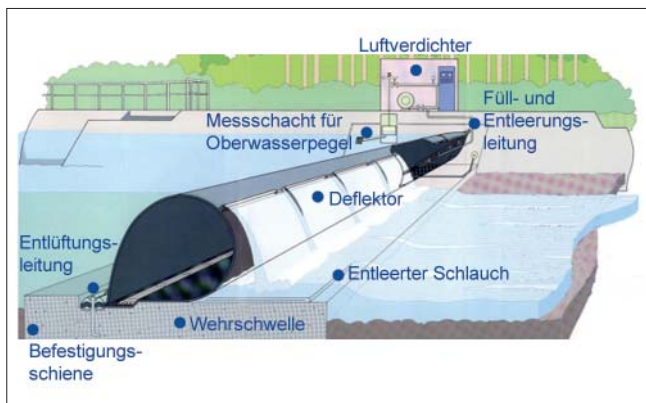


Bild 9: Schlauchwehr Kiebingen am Neckar: Systemskizze nach Bridgestone

Nach Aussage des Betreibers arbeitet die Anlage seit der Inbetriebnahme ohne Probleme und regelt den Oberwasserstand automatisch mit einer Genauigkeit von ± 2 cm.

3.4.3 Wasserkraftanlage Lechbruck am Lech

Die Allgäuer Überlandwerk (AÜW) GmbH ist neben der E.ON das einzige selbstständige Energieversorgungsunternehmen in der Kraftwerkskette am Lech. Die Energieerzeugung erfolgt hier im Schwellbetrieb, wobei der Forggensee als Kopfspeicher fungiert. Dadurch betragen die betriebsbedingten Abflussschwankungen im Tagesverlauf zwischen 20 und 120 m³/s. Im Herbst 2001 wurde von der AÜW in Lechbruck in der Nähe von Füssen ein wassergefülltes Schlauchwehr in Betrieb genommen, das mit seinen vier Wehrfelder und Schlauchhöhen von 1,35 m bis 3,35 m im Hinblick auf die Gesamtbreite der Wehranlage von 180,0 m die größte Schlauchwehranlage in Deutschland ist (s. Bild 10). Die Membran hat eine Dicke von 12 mm und ist mit zwei Befestigungsschienen an der Wehrsohle befestigt. Auf den Schlauchkörpern sind Störkörper aufgebracht, die aus einem runden Vollgummiprofil bestehen und über Gummilaschen an der Oberfläche befestigt sind. Über die Wirkungsweise ist nichts bekannt, sie wird allerdings eher als gering eingestuft. Für die Optimierung der festen Wehrgeometrie wurden an der Versuchsanstalt Oberrach Modelluntersuchungen durchgeführt. Der Normalbetrieb sieht vor, dass alle Wehrfelder gleichzeitig abgesenkt werden, wobei der größte Schlauch auch zur planmäßigen Geschiebeabfuhr aus dem Stauraum herangezogen wird. Die Anlage ist seit fünf Jahren ohne Störungen in Betrieb.

3.4.4 Wasserkraftwerk Werker und Wasserkraftwerk Baiersdorf an der Regnitz

Unter den besichtigten Anlagen ist das Schlauchwehr am Wasserkraftwerk Werker der Stadt Erlangen die Anlage mit der längsten Betriebsdauer in Deutschland. Das wassergefüllte Schlauchwehr mit einer Höhe von 1,20 m und einer Breite von 22,40 m ist bereits seit 1981 in Betrieb, ohne dass Schäden aufgetreten sind



Bild 10: Schlauchwehr Lechbruck am Lech: oben links) Blick auf die 1,35 m hohen Schlauchkörper, oben Mitte) Hauptverschluss mit einer Höhe von 3,35 m, oben rechts) Störkörper, unten links) Hauptverschluss mit Entleerung, unten rechts) überströmte Verschlüsse

und ohne dass die Membran ausgewechselt werden musste (Membrandicke 5 bis 6 mm, eine Gewebeeinlage). Kleinere Beschädigungen sind mit Elastomerfliegen repariert worden (s. Bild 11).

Auf Grund der positiven Betriebserfahrungen und des geringen Unterhaltungsaufwands entschied sich ein weiterer kommunaler Kraftwerksbetreiber stromabwärts an der Regnitz ebenfalls für ein wassergefülltes Schlauchwehr (s. Bild 12). Die Anlage in Baiersdorf mit zwei 27,0 m breiten Wehrfeldern und einer Schlauchhöhe von 1,85 m wurde 1995 fertig gestellt und ersetzte ein abgängiges Dachwehr. Die Membran hat eine Dicke von 8 mm und besitzt zwei Gewebeeinlagen in Feldmitte und drei Gewebeeinlagen im Randbereich. Der Betreiber ist sehr zufrieden mit dem Betrieb der Anlage und gibt als Genauigkeit für die Regulierung des Oberwasserstandes ± 1 cm an. Im Jahr 2003 wurde die rechte Schlauchmembran durch einen Messerstich beschädigt, worauf der Betreiber als Vorsichtsmaßnahme einen Stacheldrahtzaun angebracht hat, um weiterem Vandalismus vorzubeugen.

3.5 Verbreitung der Schlauchwehrtechnologie in der Welt

Im internationalen Vergleich ist sowohl in Deutschland als auch in anderen europäischen Ländern die Akzeptanz gegenüber den elastischen Verschlussstypen vergleichsweise gering. Etwas überraschend ist daher das Ergebnis eigener Recherchen, nach denen heute weltweit bereits mehr als 2.500 Anlagen realisiert wurden. Insbesondere in Japan ist dabei die Technologie weit verbreitet, was nicht zuletzt darauf zurückzuführen ist, dass das Land in einer seismisch sehr aktiven Region liegt und Schlauchwehre eine sehr geringe Empfindlichkeit gegenüber Erschütterungen und Setzungen aufweisen. Schätzungsweise 2.000 Anlagen gibt es bislang in Japan mit Verschlusshöhen von bis zu 6,0 m, wie beispielsweise das luftgefüllte Schlauchwehr am Kurotani Dam in der Provinz Fukushima (Bild 13). Zahlreiche Entwicklungen führten zu einer Verbesserung der Technologie, wie z. B. der Fin, der Membranverstärkung mit Stahlgewebe oder Keramiksplittern, oder dem „cushion concept“, bei dem Polster im Schlauchinneren die Elastizität der abgelegten Membran erhöhen und damit das Risiko der Beschädigung



Bild 11: Schlauchwehr Erlangen an der Regnitz: oben links) seitliche Befestigung und Entlüftungsventil, oben rechts) Wehr mit Krafthaus, unten links) Membranoberfläche im Bereich der Knickstelle, unten Mitte) Reparaturflecken, unten rechts) Faltenausbildung an der Wehrwange

durch Geschiebe verringern sollen. Auf Grund der Bedeutung wird vom japanischen Verkehrsministerium seit 1978 eine Richtlinie für die Planung und Ausführung von Schlauchwehren veröffentlicht [7].

Von den 2.500 Anlagen weltweit werden ca. 89,4 % mit Luft, 10,4 % mit Wasser und 0,2 % mit einer kombinierten Luft/Wasserfüllung betrieben.

Im Hinblick auf die Gesamtwehrbreite befindet sich die größte Schlauchwehranlage am Susquehanna River in Pennsylvania, USA. Durch den Bau des Sunbury Dam entstand hier der ca. 10,5 km lange und ca. 1200 ha große Lake Augusta. Die ersten Überlegungen zu einem Schlauchwehr gehen bereits auf die Mitte der 60er Jahre zurück, im November 1966 war die 640 m breite, siebenfeldrige Wehranlage dann fertig gestellt. Zu Beginn des fast 40-jährigen Betriebs des Sunbury Dam traten eine Reihe von Problemen auf: So wurden bereits kurz nach der Fertigstellung an den Seitenflächen der Schlauchkörper, zwischen Wehrpfeiler und Befestigungsschienen, Scheuerstellen bemerkt, die sich zunehmend verstärkten und auf Schwingungen zurückzuführen waren. (Im Beitrag Gebhardt „Analyse

von Schadensfällen an bestehenden Schlauchwehranlagen“ in diesem Heft ist eine detaillierte Schadensanalyse zu finden.) Der Madero Dam in Mexiko besitzt die Schlauchverschlüsse mit der größten Länge weltweit. Die seit 1998 existierende Talsperre, die den Fluss Las Virgenes zur Wasserversorgung und Energiegewinnung aufstaut, besitzt an zwei Felder in der Krone 3,00 m hohe, luftgefüllte Schlauchverschlüsse, von denen ein Schlauch 112,0 m lang und dabei räumlich gekrümmt ist und ein weiterer sogar eine Gesamtlänge von 148,0 m aufweist. Bezüglich der Schlauchhöhe stellt das Sturmflutwehr Ramspol in den Niederlanden gegenwärtig die größte Anlage dar. Das dreifeldrige Sperrwerk befindet sich an der Mündung von Vecht und IJssel und wurde im Jahr 2000 zum Schutz des Gebietes West-Overijssel vor Hochwasser fertig gestellt (Bild 14). Es besteht aus drei mit Wasser und Luft befüllbaren Schläuchen mit einer Länge von jeweils 75,0 m und einer Höhe von 8,00 m im Sperrzustand. Die Kombination von Wasser und Luft als Füllmedium wurde gewählt, um zum einen eine ausreichende Wasserlast dem im Hochwasserfall wirkenden Grundwasserdruck entgegenzustellen und zum anderen um den Gesamtumfang zu minimieren. (Infolge der teilwei-



Bild 12: Schlauchwehr Baiersdorf an der Regnitz: oben links) Querschnitt der zweilagig verstärkten Schlauchmembran, oben rechts) Wehranlage vom Unterwasser, unten links) Leckage durch Vandalismus, unten rechts) Mittelpfeiler

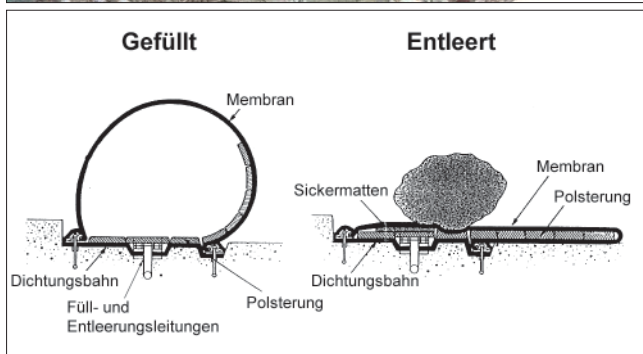


Bild 13: Schlauchwehr Kurotani Dam

sen Luftfüllung ist der Gesamtumfang mit 24,20 m vergleichsweise gering.) Da das Wehr im abgelegten Zustand für die Schifffahrt überfahrbar ist, muss neben der entsprechenden Fahrwassertiefe über der abgelegten Membran eine stabile Ruhelage gewährleistet sein. Dies wird am Sturmflutwehr Ramspol dadurch erreicht, dass die Membran über rotierende Stahlrollen in eine Vertiefung der 15,4 m breiten Wehrschwelle gezogen wird. Die Dicke des verstärkten Gummimaterials beträgt 16 mm und das Material weist ein Flächengewicht von 19,3 kg/m² auf. Jede Schlauchmembran wiegt ohne Füllung 33 t. Die Schließzeit des Sperrwerks beträgt maximal eine Stunde und die Entleerungszeit maximal zwei Stunden [8].

In den USA befinden sich außer dem oben erwähnten Sunbury Dam zwei weitere große Anlagen mit Schlauchhöhen von 4,57 m bzw. 4,90 m: die Highgate Falls in Vermont und der Tempe Town Lake in Arizona. Der Tempe Town Lake befindet sich im Hauptschluss des Salt River und wird durch zwei Stauanlagen mit je vier Wehrfeldern begrenzt (s. Bild 15). Jeder Schlauchkörper ist etwa 73,1 m lang, wiegt 40 t und weist eine Membrandicke von mehr als 25 mm auf. Der Innendruck der luftgefüllten Schlauchkörper

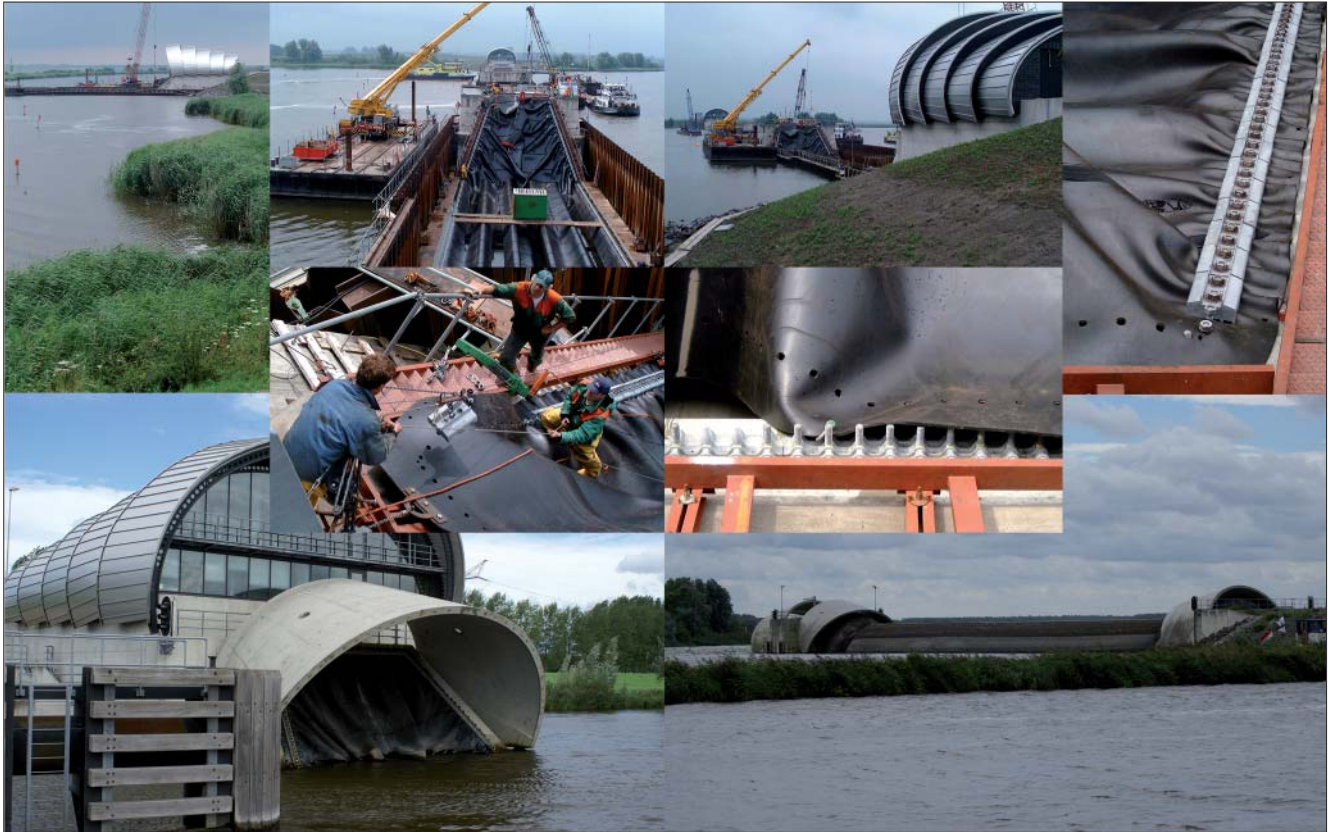


Bild 14: Sturmflutwehr Ramspol: oben links) Blick vom Oberwasser, oben Mitte) Montage der Schlauchmembrane, oben rechts) Klemmschienen, Mitte links) Montage der Klemmschienen, Mitte rechts) untere Klemmschiene und gelochte Schlauchmembran, unten links) Betriebshaus mit Antriebsaggregat, unten rechts) gefüllter Schlauchverschluss

beträgt 41,37 kPa (entsprechend 4,13 m Wassersäule). Die Schlauchmembranen sind mit Keramiksplittern durchsetzt, um die Abriebbeständigkeit gegenüber Geschiebe und Treibgut bei Hochwasserabfuhr zu erhöhen. Bei der Planung der beiden Schlauchwehranlagen wurde ein Bemessungsabfluss von 7.800 m³/s zu Grunde gelegt, wobei seit der Inbetriebnahme im Jahr 1989 bereits 3650 m³/s über die beiden Stauanlagen abgeführt wurde. Im Hochwasserfall können die Verschlüsse innerhalb von 30 min abgesenkt werden [9].

4 Betriebserfahrungen im Winter

Im Allgemeinen ist der Winterbetrieb von wassergefüllten Anlagen unproblematisch und Frostgefahr scheint mehr ein Verkaufsargument für luftgefüllte Schlauchwehre zu sein. Jedenfalls ist kein Fall von Vereisung auch von anderen Anlagen in Europa bekannt. [10] berichten über mehrere Anlagen in Österreich und in der Tschechischen Republik, die ohne Einschränkung über mehrere Monate im Winter bei Außentemperaturen unter -10 °C betrieben wurden. Die Autoren bestätigen die Unempfindlichkeit der elastischen Schlauchmembrane gegenüber Treibgut und Geschiebe und verweisen auf die 13-jährige Betriebserfahrung von über 30 Anlagen in der Tschechischen Republik. Über den Winterbetrieb von acht Schlauchwehren, die zwischen 1984 und 1996 gebaut wurden, berichtet auch das [11]. So werden über den Broadwater Dam

am Missouri River im Frühjahr Treibgut und Eisschollen mit Dicken bis zu 60 cm über die sieben, 16,50 m breiten und 3,40 m hohen, luftgefüllten Schlauchwehre abgeführt.

5 Literatur

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN (BMVBW) (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 2005/2006, Deutscher Verkehrs-Verlag
- [2] IMBERTSON, N.: Collapsible Dam aids Los Angeles water supply, Civil Engineering, S.42-44, 1960
- [3] TAM, P.W.M.: Application of inflatable dam technology – problems and countermeasures, Canadian Journal of Civil Engineering, No. 2 (1998), S.383-388.
- [4] GEBHARDT, M.: Hydraulische und Statische Bemessung von Schlauchwehren, Mitteilungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung - Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik - der Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [5] GÜNTHER, H.; JÄGER, F.: Flexibler Staukörper auf dem Muldewehr Penig, WWT 20.Jahrgang, Heft 10 (1970), S.332-336
- [6] ITTEL, G.; HEIMERL, St., Innovative Sanierung der Wasserkraftanlage Kiebingen am Neckar, Wasserwirtschaft 91, Heft 9, 2001, S.434-442



Bild 15: Tempe Town Lake: oben links) Verschlüsse in Staustellung, oben rechts) Absenkbeginn, unten links) vollständig abgelegter Schlauchverschluss beim Hochwasser, unten rechts) Wehranlage in Betrieb

- [7] MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT, RIVER BUREAU: Technische Richtlinie für Schlauchwehre, Übersetzung aus dem Japanischen im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, unveröffentlicht (2000).
- [8] JONGELING, T.H.G.; RÖVEKAMP, N.H.: Wave-induced response of inflatable barrier, XXVIIIth IAHR Congress, Graz (August 1999).
- [9] City of Tempe, Arizona: Tempe Town Lake, www.tempe.gov (2007)
- [10] OBERLEITNER, P.; VISCHER, D.: Schlauchwehre, Zusammenfassung eines Vortrages von Vischer, D., Wasser, Energie, Luft – eau, energie, air, 75. Jahrgang, Heft 4, Baden (1983), S.95-97.
- [11] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS: 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 (Oktober 2001), S.1-5.

Danksagung

Die vorliegende Veröffentlichung basiert in wesentlichen Teilen auf der Dissertation „Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren“ von Michael Gebhardt. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. hc. mult. Franz Nestmann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Schweizerhof für die wissenschaftliche und fachliche Betreuung dieser Arbeit.