

Finite-Elemente-Analysen zur Optimierung der Geometrie und der Spannungsverteilung in der Membran von Schlauchwehren

Anne Maurer
Michael Gebhardt
Karl Schweizerhof

Schlauchwehre sind eine Alternative zu konventionellen Stahlwasserbauverschlüssen und werden als hydraulisches System allein durch das Ein- und Ausleiten von Luft oder Wasser gesteuert. Während die Lastabtragung im Feld in Umfangsrichtung erfolgt, entstehen im Anschluss an die Wehrpfeiler bzw. -wangen Falten und dadurch zweiaxiale Spannungszustände. Die Ausbildung der Falten ist von der Lage der Klemmschienen, der Neigung der Wehrwangen bzw. -pfeiler sowie von der Geometrie der Membran abhängig. Je größer die Wehrhöhen und damit auch die Membrandicken gewählt werden, umso stärker wirkt sich dabei auch die Biegesteifigkeit des Materials aus. Mit Hilfe von nichtlinearen Finite-Elemente (FE)-Analysen wurden Parameterstudien durchgeführt und die berechneten Schlauchgeometrien im Hinblick auf eine günstige Faltenbildung und geringe Spannungskonzentrationen bewertet. Ziel der Untersuchungen war es, die Schlauchgeometrie zu optimieren und einen Stress Concentration Factor (SCF) zu bestimmen, um daraus einen belastbaren Sicherheitsbeiwert für die Bemessung der Membran ableiten zu können. Für die FE-Berechnungen wurde dabei ein neues spezielles Programmteil entwickelt, bei dem die Fluidfüllung auch in Kombination mit einer partiellen Luftfüllung einer Kammer durch eine energetisch äquivalente Belastung beschrieben wird. Hierbei gehen für die betrachteten großen Deformationen im Füll- und Belastungsprozess die aktuellen Zustandsgrößen deformierte Geometrie, Volumen, Dichte und Druck ein. Die Untersuchungen zeigen, dass mit wenigen Änderungen der Konstruktionsparameter und der Füllung eine günstigere Faltenbildung mit geringeren Spannungskonzentrationen erreicht werden kann.

Stichworte: Schlauchwehr, Fluid-Struktur Interaktion, Faltenbildung, Entwurfsrichtlinien

1 Einleitung

Aufgrund ihrer einfachen Konstruktion, dem geringen Unterhaltungsaufwand und aufgrund monetärer Vorteile hat die Anzahl von Schlauchwehren in

Deutschland in den letzten Jahren zugenommen (*Gebhardt, 2006*). Dabei gibt es bislang weltweit keine einheitliche Methodik bei der Bemessung von Schlauchmembranen oder Normen, in denen Sicherheitsbeiwerte festgelegt sind. Eine Ausnahme ist Japan, wo es eine Richtlinie zur Planung von Schlauchwehren gibt, ohne dabei im Detail auf die Bemessung einzugehen. Daneben berichten nur *Van der Horst & Rövekamp (1999)* über die Bemessung des Sturmflutwehres Ramspol in den Niederlanden. Ziel eines gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und des Instituts für Mechanik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) war es daher, mit Hilfe von Parameterstudien mit Finite-Elemente Simulationen einfache Berechnungsformeln für Entwürfe zu entwickeln. Im Rahmen des Beitrages soll ein Teil der Ergebnisse, der insbesondere auf die Entwurfsformeln bei Berücksichtigung der maximal auftretenden Spannungen und der Faltenbildung im Bereich der Wangen zielt, vorgestellt werden.

2 Aufbau der Finite-Elemente Simulation

Die ausgeführten Schlauchwehranlagen sind grundsätzlich sehr ähnlich aufgebaut. Sie bestehen aus einem oder mehreren im Vergleich zur Höhe sehr breiten Wehrfeldern und besitzen dabei in der Regel geneigte Wehrwangen. Ein verallgemeinertes Simulationsmodell kann daher gut auf der Grundlage einer parametrisierten Geometrie erstellt werden. Dazu wurden zunächst am Beispiel des Schlauchwehres in Marklendorf (*Meine, 2007*) die wesentlichen Geometrieparameter identifiziert und anschließend mit Hilfe der theoretischen Grundlagen der quasi-statischen Fluid-Struktur Interaktion in eine Finite-Elemente Simulation eingebettet.



Abbildung 1: Schlauchwehr Bannetze an der Aller

2.1 Geometrie

Die Geometrie eines Schlauchwehres kann durch 8 geometrische Parameter beschrieben werden (s. Abbildung 2). Sie bestehen aus der Wehrfeldbreite l , der Höhe der seitlichen Befestigung R , dem Abstand der Befestigungsschienen b , dem senkrechten Abstand s an der Wange, der Wangenneigung γ und den beiden Winkeln β_1 und β_2 , die die Neigung der seitlichen Befestigungsschienen beschreiben.

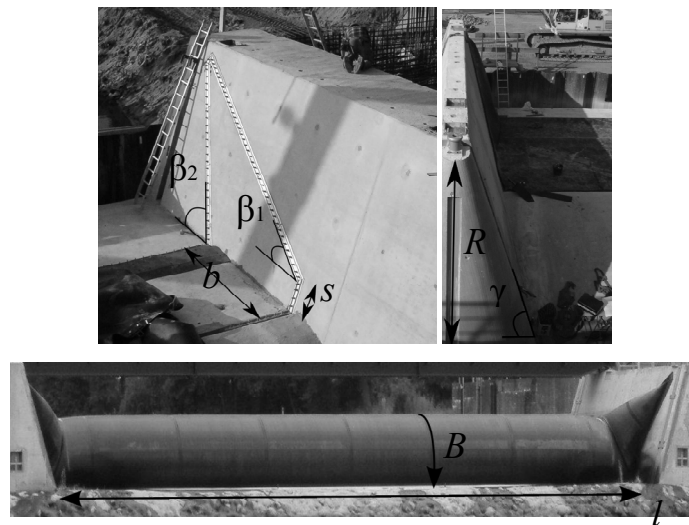


Abbildung 2: Geometrieparameter am Beispiel des Schlauchwehres Marklendorf

Dabei ist der Parameter β_1 von den anderen abhängig, so dass sieben unabhängige Parameter für die Analyse verbleiben. Weitere Einflussgrößen sind der Innendruck und der Oberwasserstand. Durch Nutzung der parametrisierten Geometrie können dann automatisiert, in diesem Fall unter Verwendung des Preprocessors des Programms ANSYS, Elemente, Knoten und Randbedingungen für eine Finite-Elemente Simulation erstellt werden.

2.2 Quasi-statische Fluid-Struktur Interaktion

Die Abbildung von Fluiden in einer Finite-Elemente Simulation stellt auch bei stationärem Verhalten gerade beim Füllvorgang ein hoch nichtlineares Problem mit entsprechenden theoretischen Anforderungen dar.

Die Füll- und Belastungsvorgänge im und am Schlauchwehr sind in der Regel unabhängig von Turbulenzen und Wellen, so dass ein quasi-statisches Verhalten angenommen werden kann, das hier wegen der hohen Nichtlinearitäten vorteilhaft im Zeitbereich mit expliziter Zeitintegration gelöst wird. Das zu lösende Gleichungssystem

$$M\ddot{x} - f^{ext} + f^g + f^f + f^i = 0 \quad (1)$$

besteht aus der Massenmatrix M der Struktur, den Beschleunigungen \ddot{x} der Strukturknoten und aus den Lastvektoren aus den äußeren Lasten f^{ext} , dem Gasdruck f^g und der Wasserspiegelhöhe f^f sowie den inneren Kräften aus Spannungen bzw. Dehnungen f^i in der Struktur.

Als Folge der Erfassung des Fluids im quasi-statischen Fall über einen deformationsabhängigen Lastvektor können insbesondere große Deformationen der Struktur und des Fluids gut abgebildet werden. Damit kann der komplette Füllvorgang, vom vollständig entleerten und abgelegten Schlauch bis zur Vollfüllung (Bemessungsverschlusshöhe), simuliert werden.

Alle Füllkombinationen aus Gas, inkompressiblen und kompressiblen Flüssigkeiten können so beschrieben werden (Hafßler, 2008; Rumpel, 2004). Als Beispiel soll hier nur auf den Fall eines inkompressiblen Fluids in Kombination mit Gasfüllung eingegangen werden. Dabei wird, siehe Abbildung 3, die innere Berandung der umgebenden Struktur - der Schlauchmembran - teilweise mit Flüssigkeit und teilweise mit Gas beansprucht.

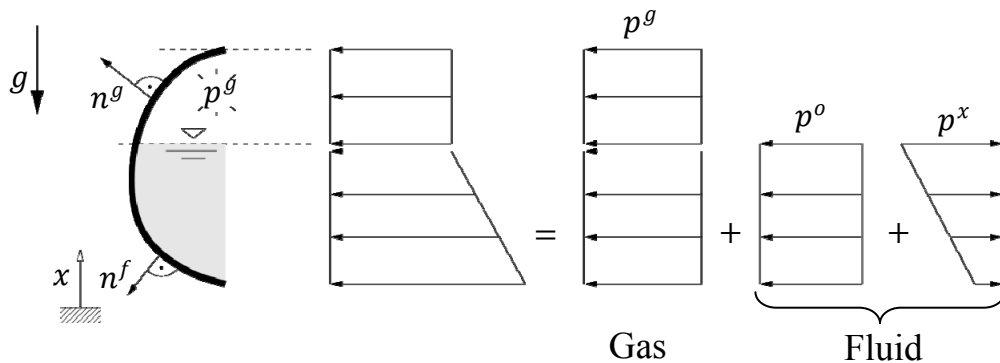


Abbildung 3: Hydrostatischer Druck in einer teilweise gefüllten Kammer

Die Last lässt sich dabei aufteilen in einen konstanten Anteil infolge Gasdruck, einen konstanten Anteil infolge Fluiddruck und einen linear veränderlichen Anteil aus dem hydrostatischen Druck. Mit dem Gravitationsvektor g , der nach außen zeigenden Normalen n^f des Fluids bzw. n^g des Gases, der Dichte des Fluids ρ , dem Gasdruck p^g und der Koordinate zum Wasserspiegel x^o ergibt sich die virtuelle Arbeit des Fluids zu

$$\delta\Pi^f = \int_{\Omega^f} \rho g \cdot (x - x^o) n^f \cdot \delta u \, d\Omega^f \quad (2)$$

und die virtuelle Arbeit des Gases zu

$$\delta \Pi^g = \int_{\Omega^g} p^g n^g \cdot \delta u \, d\Omega^g \quad (3)$$

mit der virtuellen Verschiebung δu . Diese Arbeitsausdrücke sind nichtlinear und führen direkt zu den Lastvektoren f^f und f^g . Der Lastvektor f^{ext} für beliebige äußere Beanspruchung kann unabhängig vom Fluid aufgestellt werden. Mit der Beschreibung der Berandung mittels Finiten Elemente und Einsetzen der Ansatzfunktionen ergibt sich eine um Fluide erweiterte virtuelle Arbeitsgleichung zur Lösung quasi-statischer Fluid-Struktur Interaktion. Gleichung 1 wird hier mit Hilfe expliziter Zeitintegration gelöst, was sich bei starken Nichtlinearitäten als sehr effizientes Lösungsinstrument erwiesen hat, siehe *Belytschko (2000)*. Um hierbei ein nicht physikalisches Verhalten für den quasi-statischen Lastfall zu verhindern, wird die Beanspruchung infolge Flüssigkeit und Gas sehr langsam aufgebracht. Die Lastfälle für reine Gas- bzw. reine inkompressible Fluidfüllung stellen Sonderfälle der hier vorgestellten Gleichungen dar.

2.3 Ausführung in LS-Dyna

Um das komplexe Verhalten eines Schlauchwehres, wie den Kontakt im Faltenbereich, die verschiedenen Materialien und vor allem größere, realitätsnahe Probleme in einer Finite-Element Simulation abbilden zu können, wurden die in Kapitel 2.2 dargestellten Entwicklungen im Zuge dieses Projektes in das kommerzielle Finite-Elemente Programm LS-Dyna implementiert (*Maurer, 2010*). Dazu wurde auch eine neue Eingabeoption eingeführt, die es erlaubt, Gasdruck und Wasserspiegel über Funktionen einzugeben. Insbesondere ist es auch möglich, Mehrkammersysteme zu berechnen. Da es sich um ein explizites Verfahren handelt, ist darauf zu achten, dass bei der Abbildung des quasi-statischen Verhaltens die kinetische Energie vernachlässigbar klein bleibt.

3 Spannungen

Um die Spannungen in der Schlauchmembran und die Faltenbildung in Abhängigkeit von den in Abschnitt 2.1 erwähnten Geometrieparametern und der Füllung bzw. Belastung beschreiben zu können, wurde eine Parameterstudie mit variierten Geometrieparametern und Belastungszuständen durchgeführt. Unveränderliche Größen waren dabei die Dicke des Materials von 14mm und ein in

erster Näherung linear-elasto-plastisches Materialverhalten, wobei die Spannungen in allen Fällen im elastischen Bereich bleiben.

Die Spannungskomponenten der verschiedenen Schlauchwehre - hier abgebildet mit Schalenelementen - werden miteinander mit Hilfe der Von-Mises Vergleichsspannungen σ_v verglichen. Für den ebenen Spannungszustand gilt dabei:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (4)$$

Im Allgemeinen sind die Spannungsspitzen im Bereich der Falten zu erwarten (s. Abbildung 4), so dass es hier zur Überschreitung der Bruchfestigkeit und zum Materialversagen kommt. In Feldmitte dagegen variieren die Spannungen nur gering, da es sich hier um einen ebenen Spannungszustand handelt. Dies gilt sowohl für Schlauchwehre mit stark ausgeprägten Falten (Abbildung 4b) und weniger stark ausgeprägten Falten (Abbildung 4a). Aufgrund der hohen Gradienten in der Spannungsverteilung ist im Randbereich eine möglichst feine Diskretisierung erforderlich, was zu einer höheren Anzahl von Elementen führt.

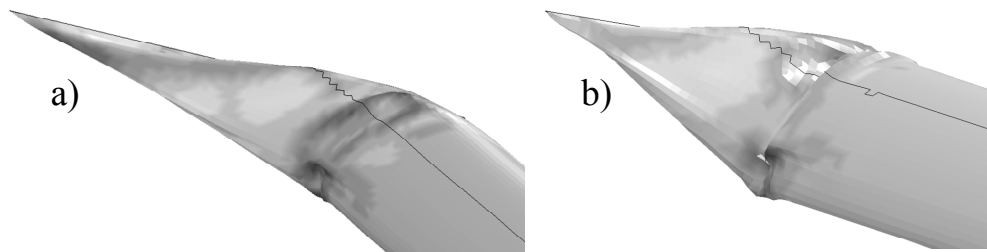


Abbildung 4: Von-Mises Spannungen in zwei verschiedenen Schlauchwehren mit unterschiedlich ausgeprägten Falten

Mit Hilfe der Parameterstudie wurde auf Basis einer quadratischen Regressionsformel eine Bemessungsformel entwickelt, mit der die Spannungen für beliebige Parametersätze, d.h. beliebige Geometrien, Innendrucke und Oberwasserstände, abgeschätzt werden können. Damit sind Entwürfe neuer Schlauchwehre mit ähnlichen Geometrien und Belastungen ohne komplexe Finite-Elemente Simulation möglich.

Abbildung 5 zeigt die Korrelation zwischen den Von-Mises Spannungen aus der FE-Simulation und aus der Regressionsgleichung. Dabei wird deutlich, dass die Ergebnisse der FE-Simulation mit Gleichung (5) sehr gut approximiert werden können.

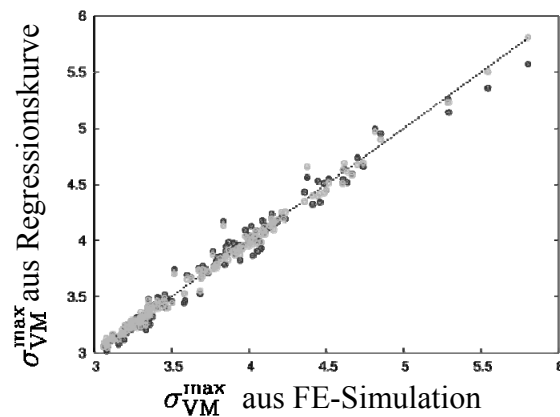


Abbildung 5: Approximation der maximalen Von-Mises Spannung in Feldmitte

$$\sigma_{VM}^{max} = 3.21 \cdot 10^{-2} + 3.04 \cdot 10^{-5} b + 5.92 \cdot 10^{-4} R + 5.04 \cdot 10^{-5} s + 2.02 \cdot 10^{-3} \gamma + 2.10 \cdot 10^{-2} \beta_2 + 6.07 \cdot 10^{-5} B + 6.45 \cdot 10^{-4} h_{ow} \quad (5)$$

3.1 Maximale Spannungen

Der Stress Concentration Factor (SCF) bezeichnet das Verhältnis der Maximalspannungen, die aufgrund der zweiaxialen Spannungszustände im Bereich der Wehrwangen zu erwarten sind, und den Spannungen in Feldmitte, die analytisch (*Gebhardt et al., 2011*) oder über die in Abschnitt angegebene Bemessungsformeln bestimmt werden können. Zum Vergleich der Spannungen werden sinnvollerweise ebenfalls die Von-Mises Spannungen verwendet.

Der SCF lässt sich allerdings nicht eindeutig den Von-Mises Spannungen in Schlauchwehrmitte zuordnen, wie ein Vergleich in Abbildung 6 zeigt. Die Streuung ist insbesondere bei kleinen Von-Mises Spannungen in Feldmitte sehr groß: Die Spannungen im Bereich der Wehrwangen liegen hier im Bereich $1.1 \leq SCF \leq 4.6$ und werden sehr stark von der gewählten Geometrie, dem Innendruck und dem Oberwasserstand beeinflusst. Interessant dabei ist, dass für große Innendrucke (Wasserstand im Schlauchwehr eineinhalb Mal größer als der Membrumfang) und folglich große Spannungen in der Membran der Unterschied zwischen den Spannungen im Randbereich und Feldmitte abnimmt und daraus $SCF = 1$ resultiert. Zum Vergleich: *Van der Horst & Rövekamp (1999)* ermittelten für das Sturmflutwehr Ramspol eine Spannungskonzentration von $SCF = 4.2$.

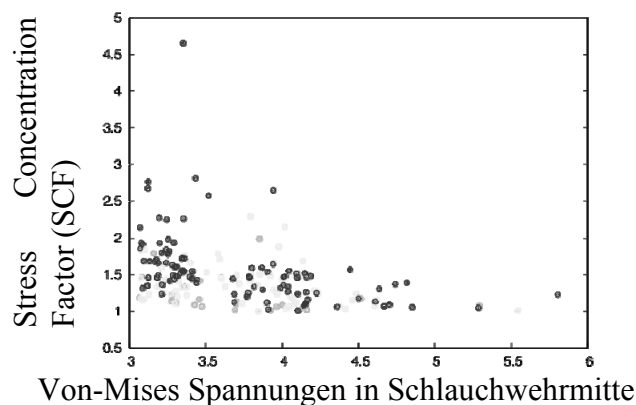


Abbildung 6: Stress Concentration Factor für Schlauchwehre mit Wasserfüllung

3.2 Auslegung von Schlauchwehren bezüglich Faltenbildung

Neben der Vermeidung von Spannungskonzentrationen ist die Dichtheit eines Verschlusses, also die Vermeidung von Wasserverlusten durch eine Falte, ein zweites Ziel, welches mit einem guten Design erreicht werden soll. Abbildung 7 zeigt die unterschiedliche Faltenbildung bestehender wassergefüllter Schlauchwehre. Ein Beispiel für eine ungünstige Faltenausbildung ist links in Abbildung 7 ist zu erkennen.



Abbildung 7: Schlauchwehre mit ausgeprägter Falte (Baiersdorf, Erlangen, Wertheim)

Um die berechneten Schlauchwehre im Hinblick auf ihre Dichtheit bewerten zu können, wurden die Geometrien im Hinblick auf ihre Faltenbildung nacheinander Ampel in drei Farbkategorien unterteilt: Grün wurden Schlauchwehre ohne deutliche Faltenbildung klassifiziert. Die Schlauchmembran lag dabei in einem definierten Querschnitt über dem angestrebten Oberwasserstand, so dass keine Wasserverluste zu erwarten sind. Mit Gelb wurden Schlauchwehre mit einer kleinen Falte und mit rot Schlauchwehre mit tiefen Falten klassifiziert (s. Abbildung 8).

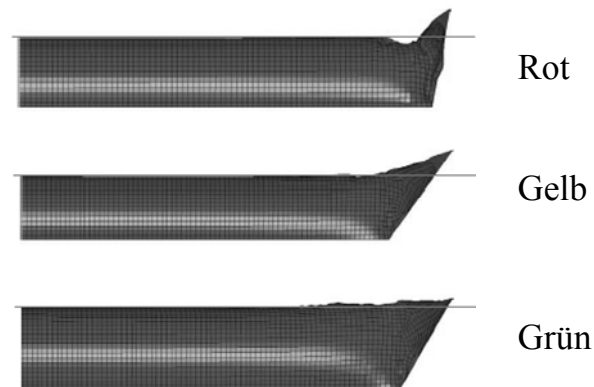


Abbildung 8: Einteilung von Schlauchwehren gemäß Ampeldarstellung

Ausgehend von dieser Klassifizierung konnten dann die Parameter bestimmt werden, die für eine Faltenbildung im Wesentlichen verantwortlich sind. Der Parameter mit dem größten Einfluss ist dabei der Neigungswinkel γ der Wehrwange bzw. des Wehrpfeilers. Bei einem Wert größer als 60° treten immer Falten auf und bei einem Winkel größer als 40° hängt die Faltenbildung stark von anderen Parametern ab, wie z.B. der Höhe R der seitlichen Befestigung. Interessanterweise zeigt sich, dass die Belastung aus Ober- oder Unterwasser zwar die Tiefe und die Geometrie der Falte beeinflusst, nicht jedoch das grundsätzliche Auftreten einer Falte.

4 Zusammenfassung

Die Untersuchung von Schlauchwehren mit Ober- und Unterwasser ist mittels nichtlinearer quasi-statischer Finite-Elemente-Fluid-Struktur-Simulation möglich, wobei das dynamische Verhalten in der Regel vernachlässigt werden kann. Es zeigt sich, dass insbesondere für die maximalen Spannungen der Faltenbereich besonders betrachtet werden muss, da bei Schlauchwehren dort das Mehrfache der Spannungen wie in Feldmitte auftreten. Mittels einer Serie von Finite-Elemente Simulationen von Schlauchwehren mit unterschiedlicher Geometrie und Belastung konnte eine Datenmenge zum Aufbau einer Regressionsformel für die Spannungen in Schlauchwehrmitte erstellt werden. Außerdem wurden die zugehörigen maximalen Spannungen im Randbereich ermittelt. Die Stress Concentration Faktoren streuen dabei sehr stark und hängen im praxisrelevanten Bereich neben der gewählten Geometrie auch von der Steifigkeit der Membran und dem Innendruck ab. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass sich der SCF allerdings mit zunehmendem Innendruck reduziert und nur leicht erhöhte Spannungen im Wangenbereich im Vergleich zu den Spannungen in Feldmitte auftreten.

Weitere Simulationsergebnisse zu anderen Fragestellungen sind *Maurer et al. (2011)*, *Gebhardt et al. (2011)* und *Maisner et al. (2012)* zu entnehmen.

5 Literatur

- Belytschko, T.; Liu, W.K.; Moran, B. (2000): Nonlinear finite elements for continua and structures, Wiley.
- Gebhardt, M.; Maurer, A.; Schweizerhof, K. (2011): On the hydraulic and structural design of fluid and gas filled inflatable dams to control water flow in rivers. Proceedings of V. Conference on "Textile Composites and Inflatable Structures" (Structural Membranes 2011), Barcelona.
- Gebhardt, M. (2006): Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren, Dissertation, Universitätsverlag Karlsruhe.
- Haßler, M.; Schweizerhof, K. (2008): On the static interaction of fluid and gas loaded multi-chamber systems in a large deformation finite element analysis, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 197, 1725-1748.
- Maisner, M.; Gebhardt, M.; Gabrys, U., Maurer, A.; Schweizerhof, K. (2012): Schlauchwehre, Untersuchungen zum Widerstand der Schlauchmembran gegen Beschädigungen. 35. Dresdner Wasserbaukolloquium.
- Maurer, A.; Gebhardt, M.; Schweizerhof, K. (2010): Computation of fluid and/or gas filled inflatable dams. LS-Dyna Forum, Bamberg, Germany.
- Meine, G. (2007): Bundeswasserstraße Aller – Schlauchverschlüsse für das Allerwehr Marklendorf. Bau- und Funktionsbeschreibung, erste Erfahrungen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 91.
- Rumpel, T.; Schweizerhof, K. (2004): Hydrostatic fluid loading in non-linear finite-element analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 59, 849-870.
- Van der Horst, A.; Rövekamp, N. (1999): Design of the Storm Surge Barrier Ramspol, The Netherlands, STUFIB Conference, Osaka, Japan.

Autoren:

Anne Maurer
Karl Schweizerhof

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

Tel.: +49 721 60847794
Fax: +49 351 60847990
E-Mail: info@ifm.kit.edu

Michael Gebhardt

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
Referat Wasserbauwerke (W3)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Tel.: +49 721 9726-3410
Fax: +49 721 9726-4540
E-Mail: michael.gebhardt@baw.de