

# Hybride Modellierung eines belüfteten Hebers für eine Hochwasserentlastungsanlage

*Detlef Aigner, Hans-B. Horlacher (Dresden)*

## Zusammenfassung

Heber weisen gegenüber von Überfällen eine deutlich höhere Abflusskapazität auf. Bei der Anordnung von Hebern zur Hochwasserentlastung bei Talsperren ist zu beachten, dass im Heber ein Druckabfluss herrscht. Vielfach werden deshalb Heber in Kombination mit überlastbaren Hochwasserentlastungen angeordnet. Zur Durchflussregelung können Heber belüftet werden. Die Dimensionierung der erforderlichen Belüftungsquerschnitte ist wegen der im Heber sich ausbildenden Gemischströmung aus Wasser und Luft mit einfachen Bemessungsformeln bisher nicht möglich. In dem nachfolgenden Beitrag wird gezeigt, wie man mit Hilfe von Modellversuchen, analytischen Beziehungen und Simulationsprogrammen diese Lücke für praktische Belange befriedigend lösen kann.

## 1 Einleitung

Heber wurden in Deutschland bei mehreren Talsperren zur Hochwasserentlastung eingesetzt. Als Beispiele sind die Talsperren Roßhaupten und Dornau in Bayern, die Wahnbachtalsperre in Nordrhein-Westfalen, die Talsperren Burgkhammer und Wisenta in Thüringen sowie die Okertalsperre in Niedersachsen zu nennen [11], [12], [13].

Heber zeichnen sich dadurch aus, dass sie gegenüber einem festen Überfall eine deutlich höhere Abflussleistung besitzen [8]. Sie können somit im Vergleich zu einem Überfall mit geringerer Überfallbreite hergestellt werden. Nachteilig sind das plötzliche Anspringen des Hebers mit steilen Abflusswellen im Unterwasser, die aufwendigere Bauweise mit einem in der Regel rechteckigen geschlossenen Saugschlauch und die Verklauungsgefahr. Im Heber selbst herrscht ein Druckabfluss, sodass sie zu den nicht überlastbaren Hochwasserentlastungsanlagen zu zählen sind.

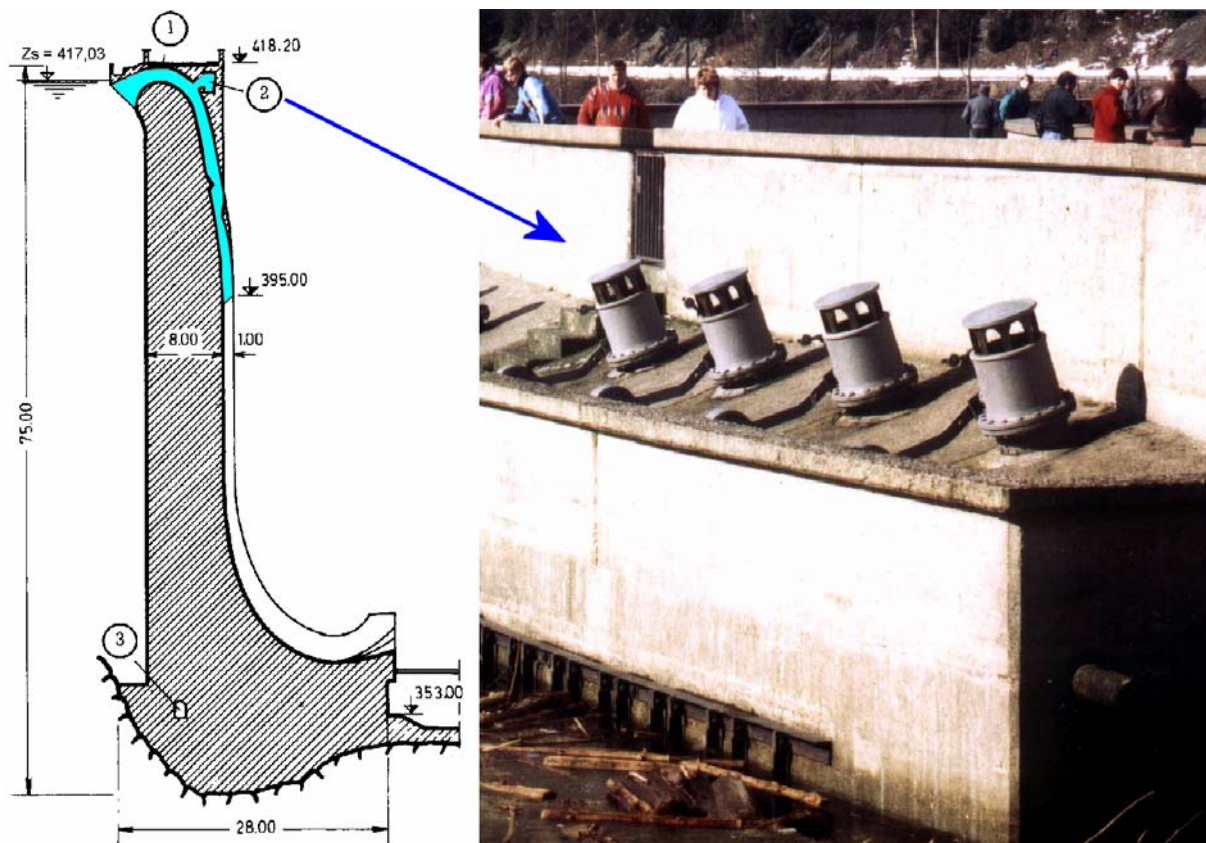
Die Nachteile von Hebern können dadurch gemindert werden, dass diese mit überlastbaren Überfällen kombiniert (Talsperren Roßhaupten, Dornau, Wisenta) oder Einzelheber in der Höhenlage gestaffelt angeordnet werden (Talsperre Burgkhammer, Oker). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch Luftzufuhr im Heberscheitel den Durchfluss im Heberschlauch gezielt zu beeinflussen (Okertalsperre). Durch die Belüftung soll in der Regel erreicht werden, dass der Durchfluss dann abreißt, wenn der Wasserspiegel im Speicher unter die Krone des Hebers absinkt.

Die Ableitung von Berechnungsformeln zur Bestimmung des Durchflusses durch einen unbelüfteten Heber ist in der einschlägigen Fachliteratur mehrfach dargestellt worden, sodass hier nicht darauf eingegangen werden soll [8]. Die Berechnung des Durchflusses in einem belüfteten Heber ist dagegen wegen der sich ausbildenden Gemischströmung aus Wasser und Luft mit einfachen Bemessungsformeln nicht zu erschließen. Selbst Ergebnisse von physikalischen Modellversuchen können wegen der Maßstabeffekte nur bedingt auf reale Gegebenheiten übertragen werden. In dem nachfolgenden Beitrag wird gezeigt, wie man mit Hilfe von Modellversuchen, analytischen Beziehungen und Simulationsprogrammen diese Lücke für praktische Belange befriedigend lösen kann. Die durchgeführten Untersuchungen werden an dem Beispiel eines Hebers der Okertalsperre aufgezeigt.

## **2 Belüftete Heber der Okertalsperre**

Die 1956 fertig gestellte Okertalsperre ist wegen der angetroffenen geologischen Verhältnisse bis auf eine Höhe von 62 m eine Bogenstaumauer, der darüber liegende Teil der Talsperre von ca. 13 m Höhe besteht aus einer aufgesetzten Gewichtsmauer. Die Talsperre weist eine Breite von 260 m auf und hat einen Stauraum von ca. 48 Mio. m<sup>3</sup>. Sie dient der Trinkwasserversorgung, der Energieerzeugung, der Niedrigwasserregelung und dem Hochwasserschutz. Zur Hochwasserentlastung besitzt sie 2 Heberbatterien, bestehend aus je 4 Hebern mit einer gesamten Abflusskapazität von 120 m<sup>3</sup>/s [11], [12].

Die Heber weisen eine Fallhöhe von ca. 23 m auf. Um Unterdrücke im Bereich des Heberscheitels in zulässigen Grenzen zu halten, wurde der Querschnitt im Heberscheitel von 1,5 m<sup>2</sup> auf einen Querschnitt im Auslauf von 0,85 m<sup>2</sup> reduziert (s. Abbildung 1). Die Energieumwandlung erfolgt für jede Hebergruppe mit einer Sprungschanze mit gekrümmten Zahnschwellen.



**Abbildung 1:** Querschnitt der Okertalsperre mit Heber und Heberbatterie

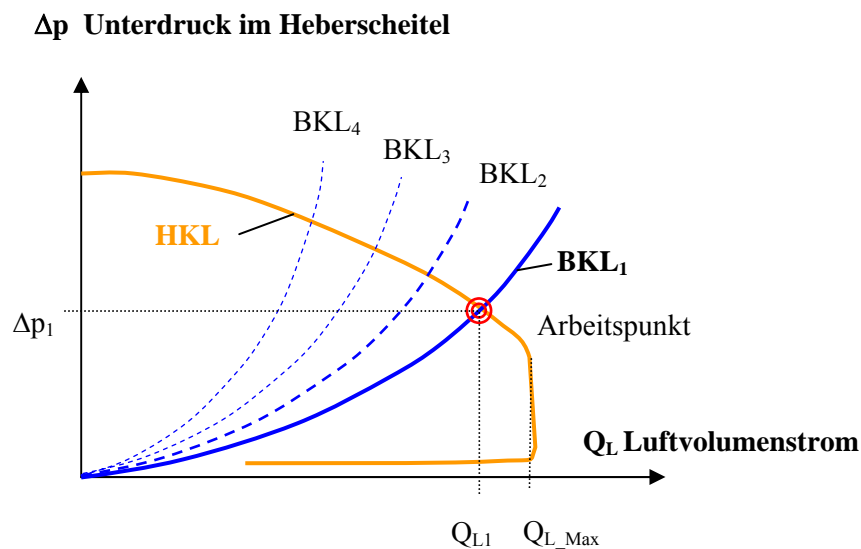
### 3 Modelluntersuchungen und Übertragungsgrenzen

Die Übertragung von Ergebnissen aus Untersuchungen an belüfteten Hebermodellen auf das Naturbauwerk bereitet Probleme. Das betrifft nicht nur den belüfteten Heber, Gleiches gilt für Fallschächte, Steilstrecken, belüftete Ringkolbenschieber und Tiefschütze. In allen physikalischen Modellversuchen, bei denen der Lufteintrag, der Lufttransport bzw. die Wasser-Luft-Gemischströmung eine Rolle spielen, werden Ergebnisse aus Modellversuchen nur qualitativ interpretiert. Ihre Übertragung auf das Naturbauwerk kann nur durch Vergleich mit Messungen am Original mit einiger Sicherheit erfolgen [7]. Begründet werden die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen Modell und Natur mit den Übertragungsgrenzen, die durch die Abhängigkeit vom nicht zu modellierenden Umgebungsdruck, von der gleichen Luftblasengröße im Modell und in der Natur, vom unterschiedlichen Beginn des Lufteintrages aufgrund der unterschiedlichen Turbulenz sowie von der Oberflächenspannung und der Kompressibilität der Luft gegeben sind. Eine Lösung bietet heute die numerische Modellierung. Sie erlaubt die Modellnachbildung in der Größe und den Randbedingungen der Natur. Offen bleibt die Frage, ob die Einmischung der Luft und die Strömung des Wasser-Luft-Gemisches im numerischen Modell korrekt nachgebildet werden.

Im Hubert-Engels-Labor des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden wurden detaillierte Untersuchungen für einen belüfteten Heber der Okertalsperre f die Harzwasserwerke GmbH, Hildesheim, in einem hydraulischen Modell durchgeführt [5]. Sie basieren auf Modellversuchen, die in Vorbereitung für den Bau der Talsperre an der Technischen Hochschule in Berlin durchgeführt wurden. Schon damals wurden aus den Ergebnissen der Modellversuche die Belüftungsöffnungen zu gering dimensioniert. Auch die Ergebnisse der Versuchsreihen in Dresden lieferten zu geringe Werte. Durch Vergleiche mit Naturdaten wurde vorgeschlagen, die im Modellversuch ermittelten Belüftungsflächen dreimal größer auszuführen.

#### 4 Durchflusscharakteristik des belüfteten Hebers

Eine Ursache für die Fehlinterpretation des Lufteintrages bei physikalischen Modellversuchen ist die ungenügende Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen Luftbedarf und Luftangebot. In Abbildung 2 werden die typischen Kennlinien für die Berechnung der am Heberscheitel zuströmenden Luft dargestellt. Die Heberkennlinie (HKL) verdeutlicht die Verringerung des Unterdruckes  $\Delta p$  im Heberscheitel bei steigendem Luftstrom  $Q_L$ . Die Belüftungskennlinien (BKL) definieren die Luftzuführung in Abhängigkeit vom Unterdruck und der effektiven Öffnungsfläche  $\mu A_L$  des Belüftungsventils. Schnittpunkt dieser beiden Kennlinien ist der Arbeitspunkt des Belüftungsventils bei einer bestimmten Öffnung. Je kleiner der Belüftungsquerschnitt ist, desto weniger Luft wird in den Heber eingesaugt und umso größer ist auch der Unterdruck im Heberscheitel. Ab einem bestimmten Belüftungsquerschnitt ist der eingesaugte Luftstrom ( $Q_{L\_Max}$ ) so groß, dass der Heber abreißt und voll belüftet wird. Der Abfluss über die Heberkrone erfolgt nun wie bei einem Überfall mit freiem Wasserspiegel.



**Abbildung 2:** Heberkennlinie (HKL) und Belüftungskennlinien (BKL), Arbeitspunkt des Hebers für Belüftungsöffnung 1

## 5 Analytische Berechnung des Durchsatzes eines belüfteten Hebers

Es wird nachfolgend ein iteratives Berechnungsverfahren erläutert, das in drei Schritten erfolgt. Zunächst wird der Heberabschnitt vom Hebereinlauf bis zur Belüftung betrachtet und mithilfe einer Energiebilanz der Unterdruck im Heberscheitel ermittelt. Daran anschließend werden Beziehungen abgeleitet, um den durch das Belüftungsventil eingesaugten Luftstrom zu ermitteln. Im dritten Schritt wird der Durchfluss für das Gemisch aus Wasser und Luft für den Heberabschnitt vom Heberscheitel bis zum Auslauf bestimmt.

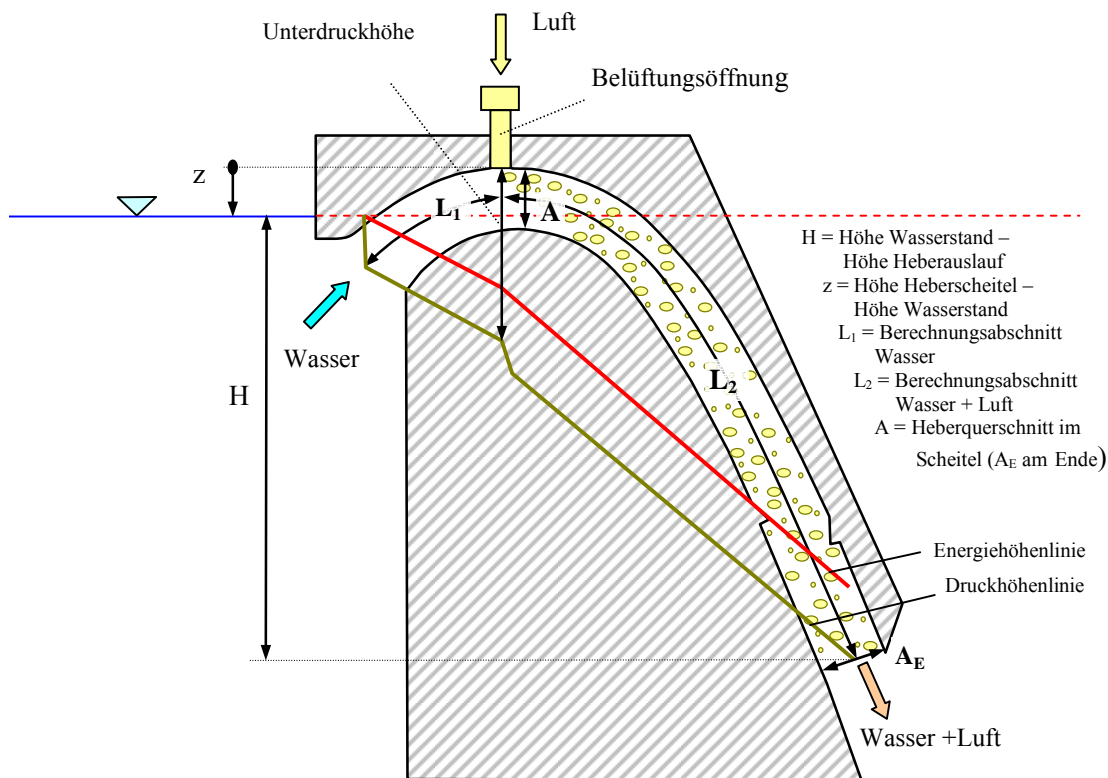


Abbildung 3: Berechnungsansatz am belüfteten Heber (vereinfacht)

### a) Berechnung der Wasserströmung bis zur Belüftung

Aus dem Energiegleichgewicht zwischen Einlauf und Belüftungsöffnung im Scheitel des Hebers ergibt sich folgende Gleichung der Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen Atmosphärendruck  $p_L$  und Druck im Heberscheitel  $p_S$ :

$$\Delta p = p_L - p_S = \rho_w \cdot g \cdot z + \rho_w \frac{v_w^2}{2} \cdot \zeta_1 + \rho_w \frac{v_{WS}^2}{2} = \rho_w \cdot g \cdot z + \rho_w \frac{v_w^2}{2} \cdot (\zeta_1 + \zeta_K) \quad (1)$$

Aus der reinen Wasserströmung im ersten Abschnitt des Hebers definiert sich der Zusammenhang zwischen dem vertikalen Abstand  $z$  des Wasserspiegels bis zum Punkt der Belüftung (Heberscheitel), dem Unterdruck  $\Delta p$  an dieser Stelle und dem Wasserabfluss. Die Geschwindigkeit  $v_{WS}$  im Scheitel der Heberkrümmung ist etwas geringer als die mittlere Ge-

schwindigkeit  $v_w$ . In der Gleichung (1) wird mit  $\zeta_k$  dieser Einfluss berücksichtigt,  $\zeta_1$  enthält die Verlustbeiwerte für Reibung und örtliche Verluste (Einlauf, Krümmer),  $g$  ist die Erdbeschleunigung und  $\rho_w$  die Dichte des Wassers. Die Unterdruckhöhe im Scheitel (Abbildung 3) ergibt sich somit aus dem Abstand  $z$ , der Energieverlusthöhe entlang  $L_1$  und der Geschwindigkeitshöhe berechnet mit der Geschwindigkeit am oberen Rand des Heberscheitels.

### b) Berechnung de Luftzuströmung

Der Lufteintritt an der Belüftungsöffnung am Scheitel des Hebers kann unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft über den Massestrom  $\dot{m}$  nach [9], [10] ermittelt werden.

$$\dot{m}_L = \rho_L \cdot Q_L = \mu \cdot A_L \cdot \Psi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_L \cdot p_L} \quad (2)$$

$$\text{mit } \Psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_S}{p_L} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_S}{p_L} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} = \sqrt{3,5 \cdot \left[ \left( \frac{p_S}{p_L} \right)^{\frac{10}{7}} - \left( \frac{p_S}{p_L} \right)^{\frac{12}{7}} \right]} \quad (3)$$

Dabei ist  $\Psi$  die Zuflussfunktion der Luftöffnung  $A_L$  für kompressible Gase. Sie wird mit dem Exponenten  $\kappa = 1,4$  für adiabatische Zustandsänderungen der Luft ermittelt. Der Zuflussbeiwert  $\mu$  beinhaltet die Einschnürung und die Verluste des einströmenden Luftvolumenstromes. Der Druck  $p_S$  ergibt sich aus dem Luftdruck  $p_L$  minus Unterdruck  $\Delta p$  aus Gleichung (1).

### c) Berechnung der Wasser-Luft-Gemischströmung

Die Druckabhängigkeit des Luftvolumenstromes führt dazu, dass im Heberscheitel die Luft wegen des Unterdruckes ein größeres Volumen einnimmt als am Heberauslauf bei Luftdruck. Mit der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung des Wasser-Luft-Gemisches wird zur Vereinfachung die Reibung mit einer Geschwindigkeit ermittelt, welche aus der mittleren Luftdichte berechnet wird. Die Berechnung des Reibungsbeiwertes für diesen Abschnitt erfolgt analog der für Wasserströmungen. Örtliche Verluste ergeben sich aus Vergleichsrechnungen mit einem unbelüfteten Heber. Die zusätzlichen Verluste durch die Vermischung mit der Luft (Vermischungsverluste) und dem Schlupf (Schlupfverluste) sind aus Vergleichsrechnungen mit Modell- oder Naturmessungen bestimmbar.

$$\rho_G \cdot g \cdot (H + z) = \rho_w \cdot g \cdot z + \rho_w \frac{v_w^2}{2} \cdot \zeta_1 + \rho_G \cdot \frac{v_G^2}{2} \cdot \zeta_2 + \rho_G \cdot \frac{v_{GE}^2}{2} \quad (4)$$

Die Indizes in Gleichung (4) stehen für: W für Wasserströmung, G für Gemischströmung Wasser/Luft und GE für Gemischströmung am Ende des Hebers. Die Umstellung und Umwandlung der Energiegleichung für den Gemischabfluss führt auf

$$H + z = \frac{\rho_w}{\rho_G} \cdot z + \frac{\rho_w}{\rho_G} \cdot \frac{v_w^2}{2g} \cdot \zeta_1 + \frac{v_G^2}{2g} \cdot \zeta_2 + \frac{v_{GE}^2}{2g} \quad (5)$$

Zusammen mit den Beziehungen

$$\frac{\rho_w}{\rho_G} \cong 1 + \beta, \quad \frac{v_G}{v_w} = 1 + \beta \quad \text{und} \quad \zeta_E \cong \left(\frac{A}{A_E}\right)^2 \quad (6)$$

erhält man eine Gleichung zur Berechnung der Geschwindigkeitshöhe der Wasserströmung  $v_w$  und damit des Durchflusses  $Q_w$ .

$$\frac{v_w^2}{2g} = \frac{H - z \cdot \beta}{(\beta + 1) \cdot [\zeta_1 + (\beta + 1) \cdot \zeta_2 + (\beta + 1) \cdot \zeta_E]} \quad (7)$$

Der Belüftungsgrad  $\beta$  wurde als Verhältnis des Luftvolumenstromes  $Q_L$  zum Wasservolumenstrom  $Q_w$  definiert. Wegen der Kompressibilität der Luft unterscheidet sich dieser Wert zwischen Scheitel und Auslauf des Hebers etwas und ist als Mittelwert zu verstehen. Die Reibungsbeiwerte  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  sind zusammengefasste Verlustbeiwerte des ersten und zweiten Berechnungsabschnittes für die Wasser- und die Gemischströmung. Der Anteil des Verlustbeiwertes aus der Lufteinmischung wurde als Funktion des Quadrates des Belüftungsgrades aus Vergleichsrechnungen ermittelt. Bei Verkleinerung des Querschnittes  $A_E$  im Auslauf des Hebers wird Austrittsverlustbeiwert  $\zeta_E$  größer als 1.

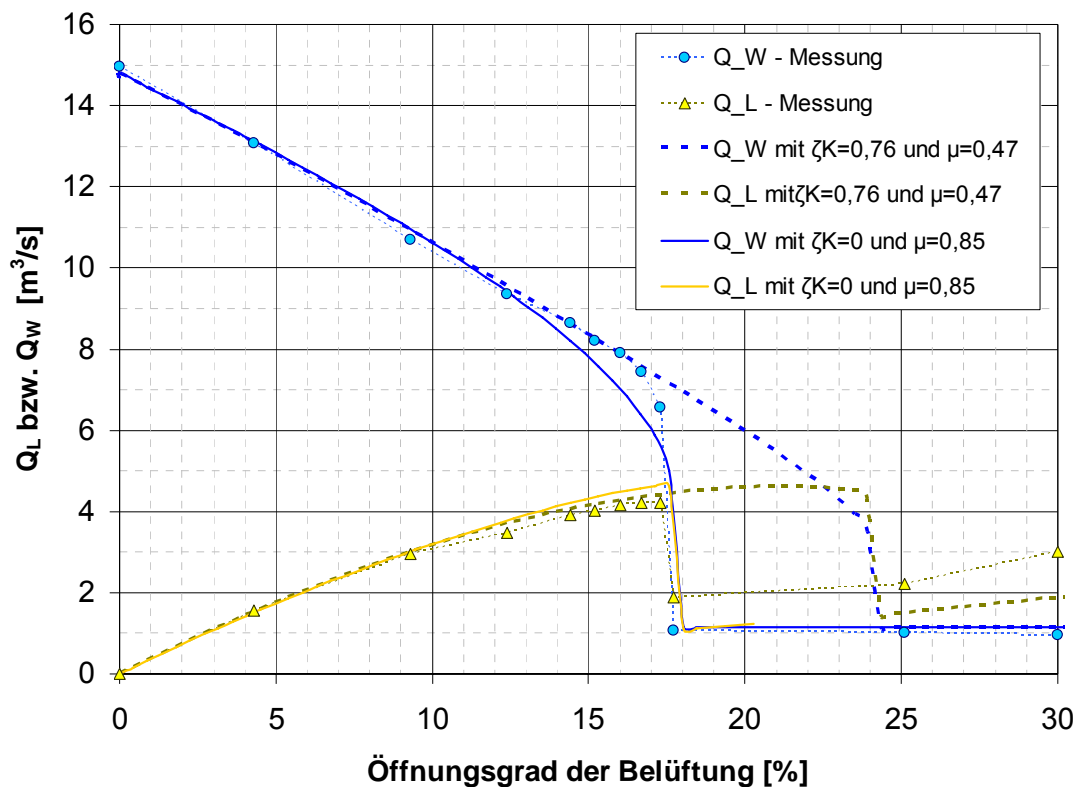
#### d) Iteration

Die Berechnung erfolgt iterativ. Die Rechenschritte a), b) und c) werden solange wiederholt, bis die in a) eingesetzte Geschwindigkeit der Wasserströmung  $v_w$  mit der in c) nach Gleichung (7) berechneten identisch ist. Mit dieser Methode wurden die Messergebnisse des Modellversuches für den Heber der Okertalsperre nachgerechnet und es konnten der Strömungsabriss bei Belüftung und der Einfluss des Wasserstandes vor dem Heber auf den Strömungsabriss nachempfunden werden (siehe Abbildung 4 und 5).

## 6 Das physikalische Modell

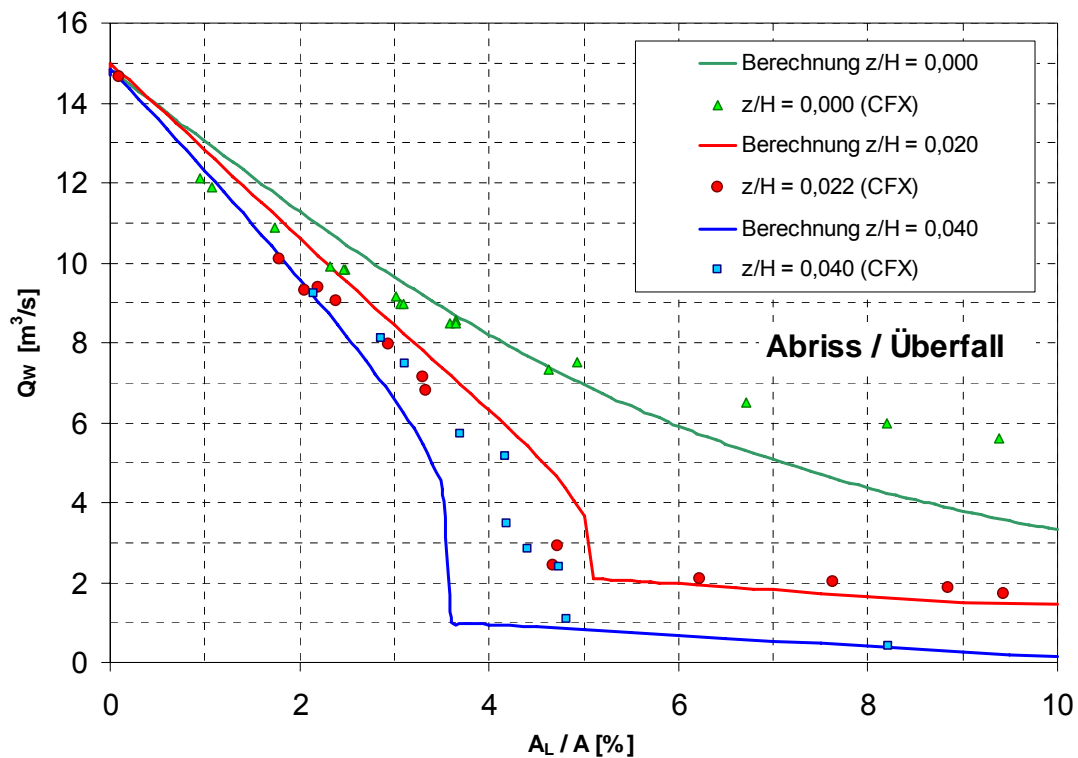
In den Modellversuchen im Hubert-Engels-Labor des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden ist der Heber 5 der Okertalsperre im Maßstab 1:10 nachgebildet worden [5]. Es wurden umfangreiche Messungen der Wasser- und der Luftströmung in Verbindung mit der Druckverteilung im Heber durchgeführt. Diese Versuchsergebnisse wurden verwendet, um die analytischen Berechnungen zu überprüfen (Abbildung 4) und Vergleiche zwischen der Berechnung mit Naturwerten und Modellwerten durchzuführen. Dabei wurde festgestellt, dass der Maßstabeffekt auf den Abrissvorgang nachgebildet werden konnte. Dieser wird von der unterschiedlichen Rauheit zwischen Modell und Natur und vor allem vom Wasserstand vor dem Heber, also vom Abstand  $z$  zum Scheitel des Hebers, beeinflusst. Die im Modell ermittelte erforderliche Belüftungsfläche für den Heberabriss war zu gering. Es wurde deshalb empfohlen, bedeutend größere Belüftungsöffnungen für die realen Belüftungsventile vorzusehen.

Auch die Untersuchungen [6] zur Ermittlung der erforderlichen Belüftungsfläche für das plötzliche Abreißen des Hebers Burgkammer bestätigten diese Abhängigkeiten vom Wasserstand vor dem Heber.



**Abbildung 4:** Nachrechnungen der Volumenströme für Wasser und Luft eines Modellversuches des Hebers der Okertalsperre für eine Stauhöhe von 417,03 m ü NN (Bezugsbelüftungsquerschnitt 0,33 m<sup>2</sup>, auf die Naturwerte umgerechnet)

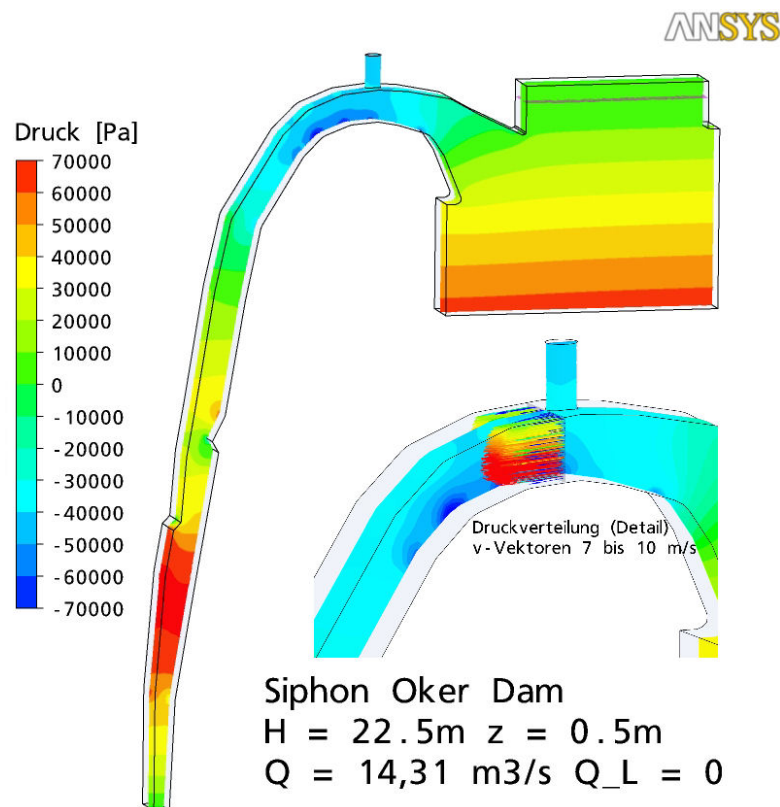




**Abbildung 5:** Nachrechnung des Abrissvorganges in Abhängigkeit vom Wasserstand im Vergleich mit Ergebnissen der numerischen Simulation (bei  $z/H=0$  wird ein Abfluss erreicht, bei dem der Heber nicht mehr abreißt)

## 7 Das numerische Modell

Das dreidimensionale Strömungsprogramm ANSYS-CFX-11 erlaubt die Simulation turbulenter Gemischströmungen am numerischen Modell. Es ist in der Lage sowohl die freie Oberfläche als Stoffübergang Wasser-Luft in Strömungen mit geringer Turbulenz als auch eine Vermischung in hochturbulenter Strömung nachzubilden. Das numerische Modell kann in Naturgröße nachgebildet und berechnet werden. Als Randbedingungen werden der Wasserstand vor dem Heber, die Größe der Belüftungsöffnung und der Luftdruck am Ende des Hebers vorgegeben. Der Reibungseinfluss wird über die Rauheit der Wände definiert. Die Auswahl der zu verwendenden Turbulenzgleichungen (Turbulenzmodelle) ermöglicht es, bestimmte Einflussgrößen wie Wandeinfluss, Strömungsturbulenz oder Mischvorgänge zu berücksichtigen. In den Beispielrechnungen wurde mit einem  $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell gerechnet. Vorteile des numerischen Modells sind die Nachbildung in Originalgröße, die einfache Variation der Randbedingungen und die umfangreichen Möglichkeiten der Visualisierung der Strömungs- und Druckbedingungen innerhalb und am Rand der Strömung. Plausibilitätskontrollen und Überprüfungen der Ergebnisse anhand von Naturmessungen oder Werten aus einem physikalischen Modell sind jedoch zu empfehlen.



**Abbildung 6:** Druckverteilung am numerischen Hebermodell der Okertalsperre

Die ersten Simulationsrechnungen am numerischen Hebermodell zeigten, dass ähnlich wie am physikalischen Modell, die wissenschaftliche Herangehensweise unter Beachtung aller Einflussgrößen unerlässlich ist. Es konnten die Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Strömung vom Wasserstand vor dem Heber richtig nachgebildet werden. Es war möglich, den Abrissvorgang bzw. den Übergang zum Abfluss eines Überfalles bei ausreichender Belüftung zu ermitteln.

## 8 Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Gleichungen zur Berechnung eines belüfteten Hebers unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft gestatten die Analyse der verschiedenen Einflussfaktoren und die Ermittlung der erforderlichen Belüftungsfläche zur Steuerung eines belüfteten Hebers. Vergleiche mit Ergebnissen aus den Modellversuchen und Naturdaten des Hebers der Okertalsperre beweisen die Tauglichkeit dieser Berechnungen. Die vielen Annahmen in den analytischen Gleichungen, wie z. B. die Verlustbeiwerte infolge Lufteinmischung, der Zuflussbeiwert der Luftströmung und seine Beeinflussung durch die Wasserströmung oder der Einfluss der Turbulenz der Wasserströmung auf den Abrissprozess zeigen die Schwierigkeiten bei der Übertragung auf andere Heberbauwerke. Hier sind Naturmessungen bzw. Modellversuche zur Kalibrierung unerlässlich. Die Fortschritte in der numerischen Strömungssimulation zeigen neue Wege zur Untersuchung dieser komplizierten und komplexen Vorgänge.

## 9 Literatur:

- [1] **Aigner, D.; Horlacher, H.-B.:** Investigation of Aerated Siphon, 32th IAHR Congress, Juli 2007, Venedig, Italien
- [2] **Aigner, D.:** Der belüftete Heber, Wasserbauliche Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, Heft 29, 2005
- [3] **Aigner, D.:** Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen und industrieller Prozesse, Technische Hydromechanik, Band 4, Verlag für Bauwesen Berlin, 2000
- [4] **Dornack, S.; Horlacher, H.-B.:** Hydraulic Model Experiments for the Siphon Spillway of the Oker Dam, 28th IAHR Congress, August 1999, Graz, Österreich
- [5] **Horlacher, H.-B.; Dornack, S.; Müller, U.:** Hydraulische Untersuchungen für die Heberanlage der Okertalsperre, Institut für Wasserbau und THM der TU Dresden, Forschungsbericht FO 95/2 vom 23.02.1995, unveröffentlicht
- [6] **Bollrich, G.:** Hydraulische Untersuchung der Heberüberfälle des Ausgleichsbeckens Burgkhammer, Internationaler Talsperrenkongress in Durban/Südafrika, November 1994, in IWT Heft 2, Weimar, Oktober 1994
- [7] **Bollrich, G.; Aigner, D.:** Hydraulisches Versuchswesen, Technische Hydromechanik, Band 4, Verlag für Bauwesen Berlin, 2000
- [8] **Bollrich, G.:** Technische Hydromechanik 1, Band 1 - Grundlagen, 6. Auflage, Verlag für Bauwesen Berlin, 2007
- [9] **Will, D. W.; Ströhl, H.:** Einführung in die Hydraulik und Pneumatik, 5. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, 1990
- [10] **Horlacher, H.-B.; Lüdecke, H.-J.:** Strömungsberechnung für Rohrsysteme, 2. Auflage, Expert Verlag, Renningen, 2006
- [11] **Talsperren in der Bundesrepublik Deutschland,** Herausgeber: Nationales Komitee für Große Talsperren in der BRD – DNK und Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. – DVWK, 1987
- [12] **Dams in Germany,** Deutsches Talsperren Komitee, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2001
- [13] **Talsperren in Thüringen,** Thüringer Talsperrenverwaltung, 1993

### Autoren:

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. **Detlef Aigner**  
Prof. Dr.-Ing. habil. **Hans.-B. Horlacher**  
Institut für Wasserbau und  
Technische Hydromechanik der TU Dresden  
Helmholtzstrasse 10, 01062 Dresden  
Tel.: 0351 463 34397  
Fax: 0351 463 37120  
[detlef.aigner@tu-dresden.de](mailto:detlef.aigner@tu-dresden.de)  
[Hans-B. Horlacher@tu-dresden.de](mailto:Hans-B.Horlacher@tu-dresden.de)