

Der belüftete Heber

Detlef Aigner

Einleitung

Als Heber werden Druckleitungen bezeichnet, deren höchster Punkt (Scheitel) über dem Wasserstand des oberen Beckens oder Behälters liegt (Abbildung 1). Sie werden durch selbstständige oder künstliche Evakuierung der Luft zum Anspringen gebracht. Wegen des Unterdruckes im Scheitel kann bei Belüftung der Abfluss reguliert oder unterbrochen werden. Heber werden z.B. zur Hochwasserentlastung eingesetzt. Der unbelüftete Heber ist heute sehr umstritten, da er in kürzester Zeit seinen Maximalabfluss erreicht, wodurch der Unterwasserstand plötzlich ansteigt. Ziel des belüfteten Hebers ist es, regulierend in den Abflussprozess einzugreifen. Eine Methode zur Berechnung und Steuerung dieses Regulierungsprozesses wird hier vorgestellt.

1 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 Fällschächte, Steilstrecken, belüfteten Ringkolbenschiebern und Tiefschützen. 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 den Vergleich mit Messungen am Original mit einiger Sicherheit erfolgen (siehe Bollrich/Aigner 2000). 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 auf Grund der unterschiedlichen Turbulenz sowie von der Oberflächenspannung und der Kompressibilität der Luft gegeben sind.

2 Die Berechnung des belüfteten Hebers

Eine Ursache für die Fehlinterpretation des Lufteintrages an physikalischen Modellversuchen ist die ungenügende Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen **Luftbedarf** und **Luftangebot**. Diese sollen hier am Beispiel des belüfteten Hebers der Oker-Talsperre erläutert werden.

Ein Heber zur Hochwasserentlastung wird meist als Rechteckquerschnitt A mit der Breite b und der Höhe a errichtet. In der Nähe des Auslaufes befinden sich Abrißkanten, die das Anspringen des Hebers erleichtern sollen. Die gestaffelten Heber sind in unterschiedlichen Höhen angeordnet, so dass sie bei steigendem Wasserstand zu unterschiedlichen Zeiten anspringen können.

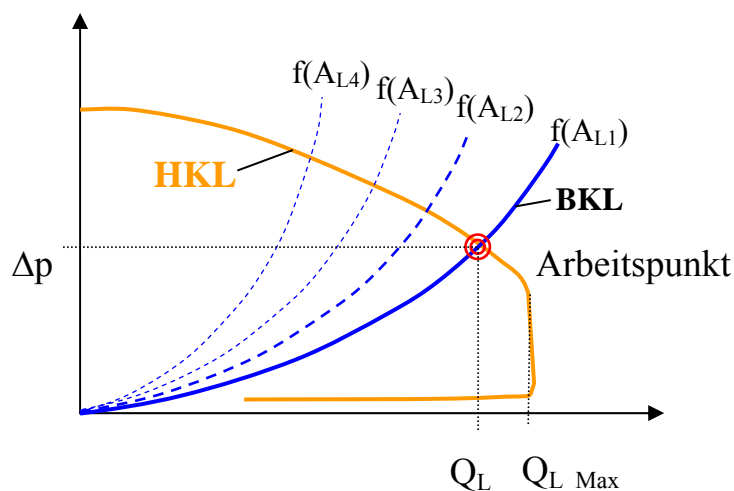


Abbildung 2: Heberkennlinie (HKL) und Belüftungskennlinien (BKL), Arbeitspunkt für Funktion der Belüftungsöffnung A_{L1}

In Abbildung 2 werden die typischen Kennlinien für die Berechnung der Luftströmung in einem Heber dargestellt. Die Heberkennlinie (HKL) verdeutlicht die Verringerung des Unterdruckes Δp im Heberscheitel bei steigendem Luftanteil. Die Belüftungskennlinien (BKL) definieren die Luftzuführung in Abhängigkeit vom Unterdruck und der effektiven Öffnungsfläche $\mu \cdot A_L$ des Belüftungsventils inklusive der Verluste der Belüftungsleitung. Schnittpunkt dieser beiden Kennlinien ist der Arbeitspunkt des Hebers für eine bestimmte Öffnungsfläche.

2.1 Definitionen und Annahmen

Folgende Definitionen und Annahmen wurden bei den Berechnungen getroffen:

Q_W Wasserabfluß [m^3/s],

Q_L Luftzufluss [m^3/s],

$\dot{m}_L = \rho_L \cdot Q_L$ Massenvolumenstrom der Luft [kg/s],

$Q_G = Q_L + Q_W$ Gemischabfluss [m^3/s],

$\beta = \frac{Q_L}{Q_W}$ Belüftungsgrad [-],

$v_W = \frac{Q_W}{A}$ mittlere Geschwindigkeit [m/s] im Heber bis zur Belüftung,

v_{WS} – Geschwindigkeit im Scheitel des Heberkrümmers [m/s],

$v_G = \frac{Q_G}{A}$ mittlere, schlupflose Geschwindigkeit [m/s] im Gemisch,

$\frac{v_G}{v_W} = \beta + 1$,

$A = b \cdot a$ Heberabflußfläche [m^2], Recheckquerschnitt, Scheitelwert,

z Abstand Heberscheitel – Wasserstand [m],

H Energiehöhe des Hebers [m],

r Heberradius [m],

K Krümmereinfluss [-],

A_L Belüftungsquerschnitt [m^2],

μ Zuflußbeiwert der Luftströmung inclusive Verluste [-],

p_S Absolutdruck im Heberscheitel [Pa],

p_L Luftdruck, Außendruck [Pa],

L_1 Länge des Hebers bis zur Belüftungsöffnung [m],

L_2 Länge des Hebers ab Belüftungsöffnung [m],

ρ_G Dichte des Wasser-Luft-Gemisches [kg/m^3],

ρ_L Dichte der Luft [kg/m^3],

ρ_W Dichte des Wassers [kg/m^3],

R Gaskonstante der Luft [$287,2 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{K}$],

T Temperatur in Kelvin [K],

$d_{hy} = 4 \cdot r_{hy} = 4 \cdot \frac{A}{l_U} = 2 \cdot \frac{b \cdot a}{b + a}$ hydraulischer Durchmesser von A in [m],

$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{k}{d_{hy}}\right)$ Reibungsbeiwert abhängig von Re-Zahl und Rauheit [-],

$\sum \zeta$ Summe der örtlichen Verluste [-],

$R_1 = \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_{hy1}} + \sum \zeta_1$ Verlustbeiwerte des Hebers bis zur Belüftung [-],

$$R_2 = \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_{hy2}} + \sum \zeta_2 \quad \text{Verlustbeiwerte des Hebers ab Belüftungsöffnung [-],}$$

$$\rho_L = \frac{p}{R \cdot T} \quad \text{Luftdichte ermittelt aus der Gasgleichung [kg/m}^3\text{],}$$

$$\frac{\rho_G}{\rho_W} = \frac{1 + \frac{\rho_L}{\rho_W} \cdot \beta}{\beta + 1} \cong \frac{1}{\beta + 1} \quad \text{Dichteverhältnis Gemischabfluss zu Wasserabfluss [-],}$$

2.2 Berechnung der Wasserströmung bis zur Belüftung

Die hydraulische Berechnung eines Hebers erfolgt wie bei normalen Druckleitungen mit Hilfe der Energiegleichung. Bei nicht kreisförmigen Querschnitten wird anstelle des Durchmessers der äquivalente oder hydraulische Durchmesser d_{hy} verwendet. Aus dem Energiegleichgewicht zwischen Einlauf und Belüftungsöffnung im Krümmerscheitel ergibt sich folgende Gleichung:

$$p_L - p_s = \Delta p = \rho_w \cdot g \cdot (z + h_{v1}) + \rho_w \frac{v_{ws}^2}{2} = \rho_w \cdot g \cdot z + \rho_w \frac{v_w^2}{2} \cdot (R_1 + K) \quad (1)$$

Aus der reinen Wasserströmung im ersten Abschnitt des Hebers definiert sich der Zusammenhang zwischen dem Abstand z des Wasserspiegels bis zum Punkt der Belüftung (Heberscheitel), dem Unterdruck an dieser Stelle und dem Wasserabfluss. Die Geschwindigkeit im Scheitel des Heberkrümmers v_{ws} ist etwas geringer als die mittlere Geschwindigkeit v_w im Heber. Aus deren Verhältnis ins Quadrat ergibt sich der Krümmereinfluss K . Der Reibungsbeiwert R_1 berücksichtigt nicht nur Reibung und örtliche Verluste sondern auch Querschnittsveränderungen im Heber.

2.3 Geschwindigkeitsverteilung infolge Krümmung

Wird die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im Krümmer innerhalb des Scheitelquerschnittes berücksichtigt (Bollrich, 2000), dann reduziert sich die Geschwindigkeitshöhe am äußeren Rand nach Gleichung (2). Das Verhältnis der reduzierten zur mittleren Geschwindigkeitshöhe wird als Krümmereinfluss K definiert. K wird am äußeren Scheitelrand, dem Punkt der Belüftung, immer kleiner als Eins.

$$K = \frac{v_{ws}^2}{v_w^2} = \left(\frac{1}{(r/a + 1) \cdot \ln(1 + a/r)} \right)^2 \quad (2)$$

Turbulente Druckschwankungen hervorgerufen durch Geschwindigkeitsschwankungen können dazu führen, dass es zu einem schnelleren Abriss des Hebers kommt als berechnet. Die Druckhöhe kann dabei bis zur Größe der Geschwindigkeitshöhe schwanken. Mit der Annahme $K = 0$ für eine Berechnungsvariante wird dieser Einfluss berücksichtigt.

2.4 Maßstabeffekte infolge Reibung (Luftvolumenstrom inkompressibel)

Der Unterdruck Δp im Krümmerscheitel führt bei Vorhandensein einer Belüftung zum Ansaugen von Luft. In der ersten Näherung wird der Einfluss der Kompressibilität der Luft sowie der Lufttemperatur auf das Luftvolumen und damit die Luftdichte nicht berücksichtigt. Für den Modellversuch mit relativ geringen Saugdrücken im Heber (wenige Dezimeter) ist diese Annahme akzeptabel. Im Naturbauwerk ergeben sich dagegen maximale Unerdrücke von über 0,8 bar, hier würde es durch die Vernachlässigung der Kompressibilität, insbesondere bei kleineren Belüftungsöffnungen, zu Fehlern bei der Ermittlung der Luftmenge von über 100% kommen.

$$Q_L = \mu \cdot A_L \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_L}} \quad (3)$$

Bezieht man den Luftvolumenstrom auf den Wasservolumenstrom und ersetzt die Unterdruckhöhe durch Gleichung (1), dann erhält man den Belüftungsgrad β für eine inkompressible Luftzuströmung.

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_w} = \frac{\mu \cdot A_L}{A} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_L} \cdot \left(\frac{2g \cdot z}{v_w^2} + R_1 + K \right)} \quad (4)$$

Wird der Luftvolumenstrom mit dem Froudemodell übertragen, dann müßte der Belüftungsgrad β in der Natur gleich dem im Modell sein. Die Auswertung von Gleichung (5) in der Abbildung 3 zeigt, dass das nicht der Fall ist. Ursache sind unterschiedliche Reibungsanteile R_1 für Modell und Natur, vor allem wegen der unterschiedlichen Rauheit k sowie der kleinere Reynoldszahlen im Modell. Dieser Unterschied ist umso größer, je dominanter R_1 gegenüber den anderen Werten unter der Wurzel wird. Steigt der Wasserspiegel über den Heberscheitel (z wird negativ - keine oder geringe Heberwirkung) und nähert sich das Verhältnis z zur Geschwindigkeitshöhe der Wasserströmung dem negativen

Wert des Krümmereinflusses K , dann ist der Belüftungsmaßstab M_β nur noch von den Reibungsanteilen in Natur bzw. Modell abhängig.

$$M_\beta = \frac{\beta_N}{\beta_M} = \frac{\sqrt{\frac{2g \cdot z_N}{v_{WN}^2} + R_{1N} + K_N}}{\sqrt{\frac{2g \cdot z_M}{v_{WM}^2} + R_{1M} + K_M}} \quad (5)$$

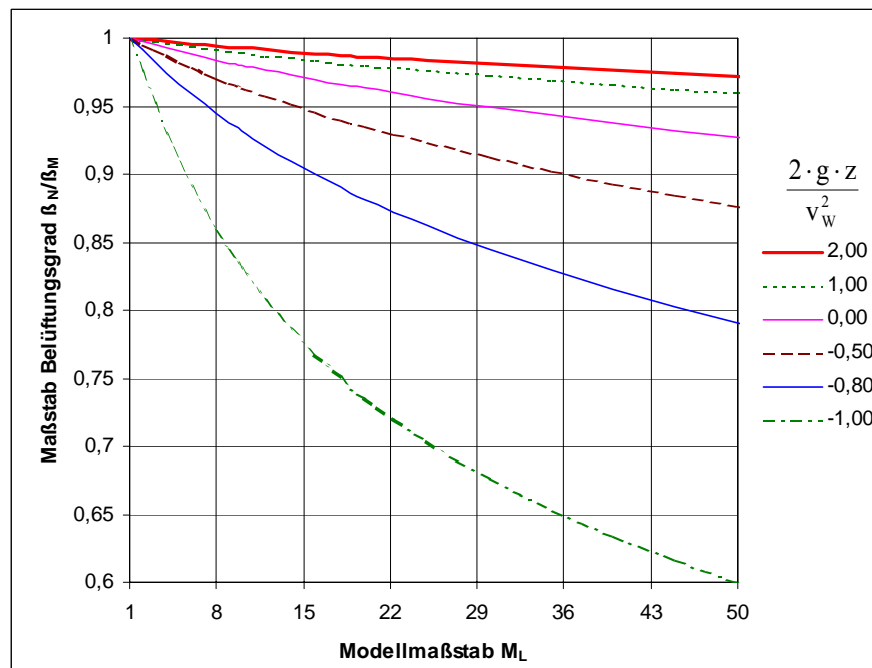


Abbildung 3: Maßstabseffekte für den Belüftungsmaßstab ohne Berücksichtigung der Kompression der Luft und $K=1$

Eine Beispielrechnung zur Auswertung der Gleichung (5) bei unterschiedlichen Wasserständen im Speicher (z -Werte) zeigt Abbildung 3.

Die Unterschiede im λ – Wert ergeben sich hier nur aus der Reynoldszahl. Die relative Rauheit k/d_{hy} wurden für Modell und Natur zur Vereinfachung gleich gewählt, obwohl sie sich je nach Wandbeschaffenheit des Hebers unterscheiden kann.

Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass der Belüftungsgrad im Modell bei einem Modellmaßstab größer als 1 immer größer wird als in der Natur, das heißt, es wird anteilig mehr Luft im Modell gemessen.

Weiterhin wurde im Modell festgestellt, dass die angesaugte Luftmenge bei steigendem Wasserstand (größeres H und kleineres z , Bild 1) abnimmt. Das kann mit Gleichung (2) begründet werden. Eine Verkleinerung von z gegenüber einer nur gering zunehmenden Geschwindigkeit v_w führt zu einer Abnahme des Luftvolumenstromes.

2.5 Berechnung des Massenvolumenstromes der Luft (kompressibel)

Wird die Kompressibilität der Luft berücksichtigt, dann wird der Lufteintritt über den Massenstrom \dot{m} nach folgender Gleichung ermittelt (Will, Ströhl, 1990).

$$\dot{m}_L = \mu \cdot A_L \cdot \Psi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_L \cdot p_L} \quad (6)$$

$$\text{mit } \Psi = \sqrt{3,5 \cdot \left[\left(\frac{p_s}{p_L} \right)^{\frac{10}{7}} - \left(\frac{p_s}{p_L} \right)^{\frac{12}{7}} \right]} \quad (6a)$$

Dabei ist Ψ die Ausflussfunktion für kompressible Gase. Sie wird mit dem Adiabatenexponenten $\kappa = 1,4$ für Luft ermittelt. Der Zuflussbeiwert μ beinhaltet die Einschnürung und die Verluste des einströmenden Luftvolumenstromes.

Der Luftdichte und damit der Luftvolumenstrom unterscheidet sich nun zwischen Heberscheitel bei starkem Unterdruck Δp und Heberauslauf mit Luftdruck. Das wirkt sich auf den β -Wert und damit auf die Geschwindigkeit des Gemischabflusses aus.

Die Dichte der angesaugten Luft bei einem Druck p_s im Heberscheitel ergibt sich aus der im Punkt 2.1. angegebenen Gasgleichung.

Der Luftvolumenstrom Q_{LS} und damit der Belüftungsgrad β_s im Scheitel wird damit zu:

$$\beta_s = \frac{Q_{LS}}{Q_w} = \frac{\dot{m}_L}{Q_w \cdot \rho_{LS}} = \frac{\dot{m}_L \cdot R \cdot T}{Q_w \cdot p_s} \quad (7a)$$

und für den Auslauf am Ende des Hebers bei normalem Luftdruck zu:

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_w} = \frac{\dot{m}_L}{Q_w \cdot \rho_L} = \frac{\dot{m}_L \cdot R \cdot T}{Q_w \cdot p_L} \quad (7b)$$

Zur Berechnung der Energieverluste im Wasser-Luft-Gemisch entlang des 2. Heberabschnittes wurde ein Mittelwert β_m aus beiden Luftanteilen ermittelt.

$$\beta_m = \frac{\beta}{2} \cdot \left(1 + \frac{p_L}{p_s}\right) \quad (7c)$$

2.6 Zuflussbeiwert der Luftströmung

Der Zuflussbeiwert μ in den Abschnitten 2.4 und 2.5 enthält die Verluste und die Einschnürung der Luftzuströmung. Er wird von der Geometrie der Öffnung aber auch von der Wasserströmung im Heber selbst beeinflusst. Dabei kommt es durch die Wassergeschwindigkeit im Heber zu einer seitlichen Ablenkung und Einschnürung der zuströmenden Luft. Welchen Einfluss diese Hauptströmung bei einer seitlichen Wasserzuströmung auf die Einschnürung hat, wurde von Aigner (2000) untersucht. Wie sich dieser Einfluss bei einer Luftzuströmung auswirkt, ist unbekannt. Für das im Modell verwendete Belüftungsventil wurde vom Hersteller ein Zuflussbeiwert von $\mu = 0,85$ angegeben. Aus dem Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Luftzufluss nach Punkt 2.5 wurde ein Einschnürungsbeiwert von $\mu = 0,4 + 10/3 \cdot z/H$ ermittelt. Die Vergrößerung von z/H verringert den Hauptströmungseinfluss, eine Verkleinerung von z bzw. eine Vergrößerung von H bedeuten eine größere Einschnürung.

2.7 Energiegleichung für das Wasser-Luft-Gemisch

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 des Gemisches ermittelt, welches aus der mittleren Luftdichte berechnet wird. Nur die Geschwindigkeitshöhe am Heberauslauf wird mit der Gemischdichte für den normalen Luftdruck bestimmt. Für die Reibung im turbulenten Wasser-Luft-Gemisch wurde der gleiche Reibungsansatz verwendet, der auch für reine Wasserströmungen gilt, da sich an den Wandungen ein Wasserfilm bildet, der ähnliche Bedingungen schafft, wie bei einer Wasserströmung (Volkart, 1978). Örtliche Verluste können aus Vergleichsrechnungen für den unbelüfteten Heber ermittelt werden. Die zusätzlichen Verluste durch die Vermischung mit der Luft (Vermischungsverluste) und den Schlupf (Schlupfverluste) sind aus Vergleichsrechnungen mit Modell- oder Naturmessungen bestimmbar.

Aus der Energiebetrachtung zwischen dem Heberscheitel und dem Auslauf ergibt sich Gleichung (8).

$$\rho_G \cdot g \cdot (H + z) = \rho_w \cdot g \cdot z + \rho_w \frac{v_w^2}{2} \cdot R_1 + \rho_G \cdot \frac{v_G^2}{2} \cdot R_2 + \rho_{GE} \cdot \frac{v_{GE}^2}{2} \quad (8)$$

Die Umstellung und Umwandlung von Gleichung (8) mit den Definitionen in Punkt 2.1. liefert eine Gleichung zur Berechnung der Geschwindigkeitshöhe bzw. der Geschwindigkeit der Wasserströmung und damit des Durchflusses Q_w .

$$\frac{v_w^2}{2g} = \frac{H - z \cdot \beta_m}{(\beta_m + 1) \cdot (R_1 + (\beta_m + 1) \cdot R_2 + \beta + 1)} \quad (9)$$

Problematisch stellte sich die Ermittlung der Vermischungsverluste innerhalb der Reibungsverluste R_2 im Abschnitt 2 des Hebers heraus. Durch Vergleichsrechnungen wurde versucht, diese Verluste zu quantifizieren (siehe Punkt 3). Für diesen Verlustbeiwert wurde folgende Gleichung ermittelt:

$$\zeta_v = 7 \cdot \beta_m^2 \quad (10)$$

Da das Gleichungssystem von vielen Einflussfaktoren abhängig ist, gilt diese Gleichung nur im Zusammenhang mit im Punkt 3 genannten Annahmen.

3 Anwendung des Berechnungsansatzes

Da die Gleichungen nicht direkt auflösbar sind, erfolgt die Berechnung iterativ. Unter Annahme beispielsweise des Wasserdurchflusses Q_w bzw. der Geschwindigkeit v_w lassen sich die Reibungswerte und daraus die Belüftungswerte über den Unterdruck im Scheitel und der effektiven Belüftungsfläche und letztendlich die Geschwindigkeitshöhe aus Gleichung (9) ermitteln. Schnell ist erkennbar, dass bei ständiger Vergrößerung der Belüftungsöffnung der Wasserdurchfluss zu Null wird und das Gleichungssystem zu keiner positiven Lösung mehr führt - die Strömung reißt ab. Die Reibungswerte für den Heber bei geschlossener Belüftungsöffnung lassen sich durch den Vergleich mit den Messwerten ermitteln. Hierzu wurden die Untersuchungsergebnisse von Horlacher u.a. (1995) verwendet.

Die Vergleichsrechnungen zeigten, dass der Zeitpunkt des Strömungsabbrisses in der Berechnung größere Belüftungsöffnungen liefert, als im Modellversuch ermittelt. Hier kann die Ursache in der Turbulenz der Strömung liegen. Das sehr

empfindliche System reagiert auf Strömungsschwankungen und damit auf Druckschwankungen mit einem schnelleren Strömungsabriss. Um diesen Einfluss zu simulieren, wurde eine Geschwindigkeitsschwankung von 100% im Krümmerscheitel mit $K = 0$ simuliert (Abbildung 4). Um wieder die Ergebnisse der Modellversuche zu erhalten, wurde gleichzeitig der Zuflußbeiwert μ erhöht. Beide Werte beeinflussen den Luftzufluss.

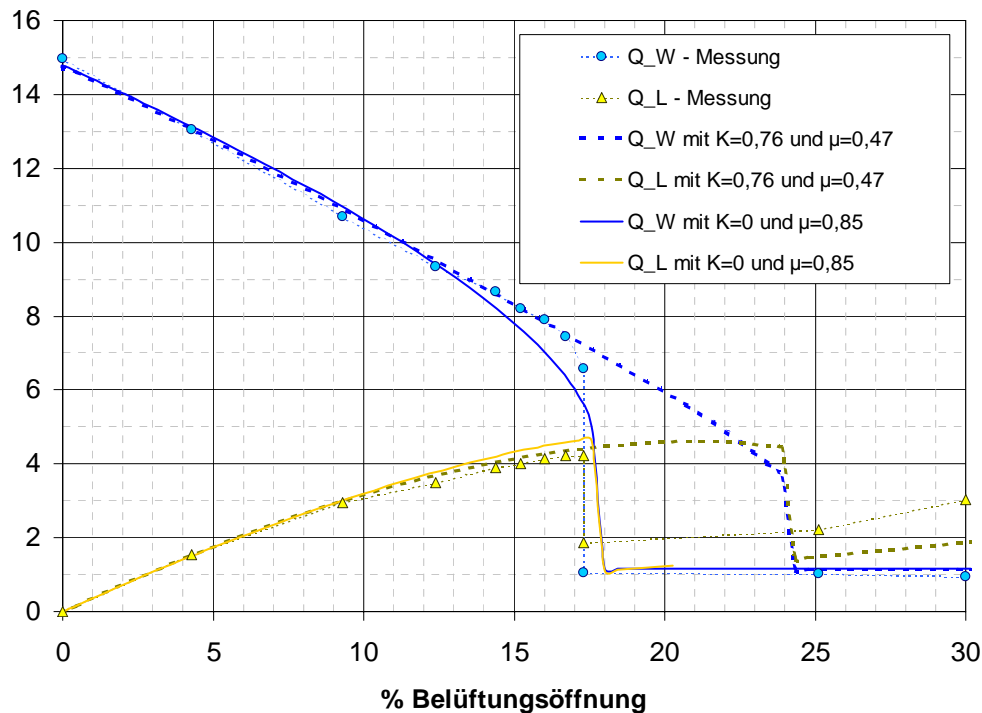


Abbildung 4: Vergleichsrechnung mit Modellwerten für eine Stauhöhe von 417,03 m ü NN

Für den Heber wurde ein konstanter Verlustbeiwert für die reine Wasserströmung von $\zeta_2 = 2,9$ ermittelt, der fast vollständig dem zweiten Heberabschnitt zugeordnet wurde. Er beinhaltet die örtlichen Verluste des Einlaufes, der Krümmung, der Einbauten aber auch den Einfluss der Querschnittsänderungen im Heberschlauch ($a=0,65\dots 2,8\text{m}$, $b=1,32\dots 1,5\text{m}$). Für die Reibung wurde eine hydraulische Rauheit von $k = 0,001\text{m}$ in der Natur und $k = 0,0001\text{m}$ im Modell angenommen.

Annahmen und Werte der Beispielrechnung für das Modell:

$Q_W = 0,03 \text{ m}^3$	$A = 0,015 \text{ m}^2$	$R_1 = 0,236$	$K = 0,76$
$A_I/A = 0,027$	$z = 0,047 \text{ m}$	$H = 2,25 \text{ m}$	$R_2 = 4,38$

Mit Gleichung (1) wird der Unterdruck Δp und der Druck im Scheitel berechnet:

$$\Delta p = \rho_w \cdot g \cdot z + \rho_w \cdot \frac{v_w^2}{2} \cdot (R_1 + K) =$$

$$\Delta p = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,047 + 1000 \cdot \frac{2^2}{2} \cdot (0,236 + 0,76) = 2453 \text{ Pa}$$

$$p_s = p_L - \Delta p = 101340 - 2453 = 98887 \text{ Pa}$$

Mit p_s erfolgt die Berechnung des Massenvolumenstromes, des Belüftungsgrades, des Luftvolumenstromes Q_L usw.:

$$\Psi = \sqrt{3,5 \cdot \left[\left(\frac{p_s}{p_L} \right)^{\frac{10}{7}} - \left(\frac{p_s}{p_L} \right)^{\frac{12}{7}} \right]} = \sqrt{3,5 \cdot \left[\left(\frac{98887}{101340} \right)^{\frac{10}{7}} - \left(\frac{98887}{101340} \right)^{\frac{12}{7}} \right]} = 0,154$$

Mit $\mu = 0,4 + 10/3 \cdot z/H = 0,47$ ergibt sich der Massenvolumenstrom der Luft zu:

$$\dot{m}_L = \mu \cdot A_L \cdot \Psi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_L \cdot p_L} = 0,47 \cdot 0,000405 \cdot 0,154 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,25 \cdot 101340} = 0,0147 \text{ kg/s}$$

$$\beta_s = \frac{\dot{m}_L \cdot K \cdot T}{Q_w \cdot p_s} = \frac{0,0147 \cdot 287,2 \cdot 283}{0,03 \cdot 98887} = 0,403$$

$$\beta = \frac{\dot{m}_L \cdot K \cdot T}{Q_w \cdot p_L} = 0,393$$

$$\beta_m = \frac{\beta}{2} \cdot \left(1 + \frac{p_L}{p_s} \right) = \frac{0,393}{2} \cdot \left(1 + \frac{101340}{98887} \right) = 0,398$$

Letztendlich wird die Annahme Q solange verändert, bis sie dem Ergebnis der Gleichung (9) entspricht:

$$\frac{v_w^2}{2g} = \frac{H - z \cdot \beta_m}{(\beta_m + 1) \cdot (R_1 + (\beta_m + 1) \cdot R_2 + \beta + 1)}$$

$$\frac{v_w^2}{2g} = \frac{2,25 - 0,047 \cdot 0,398}{(0,398 + 1) \cdot (0,236 + (0,398 + 1) \cdot 4,38 + 0,393 + 1)} = 0,209 \text{ m}$$

$Q_w = 0,0304 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$ neue Iteration.

Dieser Modellwert auf Naturbedingungen umgerechnet ergibt (siehe Abb. 5):

$$Q_{\text{WN}} = 0,0304 \cdot 10^{2,5} = 9,61 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Der Luftvolumenstrom für das Modell umgerechnet auf den Naturwert wird zu:

$$Q_{\text{LN}} = Q_{\text{WN}} \cdot \beta = 9,61 \cdot 0,393 = 3,78 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Nach erfolgreicher Iteration kann durch Veränderung der Randbedingungen, z.B. ein neues z bzw. eine andere Öffnungsfläche gewählt werden, und die Iteration zur Ermittlung des Arbeitspunktes beginnt von neuem.

4 Auswertung und Vergleich mit Modellversuchen

Der oben behandelte Berechnungsansatz für den belüfteten Heber wurde mit den 1995 durchgeführten Modellversuchen (Horlacher/Dornack/Müller, 1995) verglichen und es wurden Vergleichsrechnungen für die Heber an der Oker-Talsperre durchgeführt. Eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten im Modell stellte sich ein für $K = 0,76$ und $\mu = 0,4 + 10/3 \cdot z/H$. Der Abrissvorgang wurde gut mit $K = 0$ und $\mu = 0,84$ nachgebildet und ist für die Abhängigkeit von z/H in Abbildung 5 dargestellt.

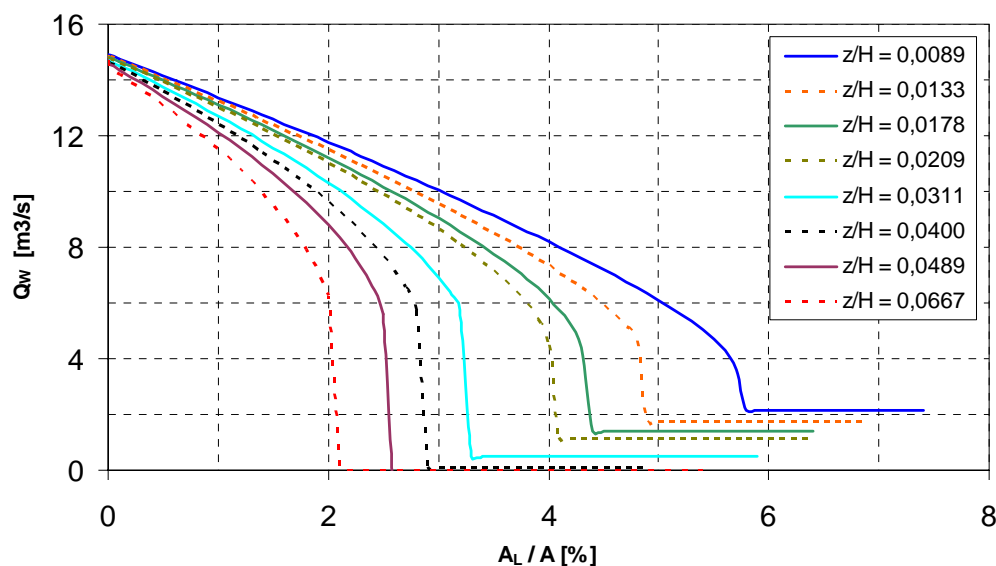


Abbildung 5: Nachrechnung des Abrissvorganges des Modellhebers in Abhängigkeit von der Belüftungsfläche und der Stauhöhe im Becken

Eine fast identische Abhängigkeit wurde im Modellversuch ermittelt. Dazu heißt es im Untersuchungsbericht: „Die Modellversuche ... ergaben eine starke Abhängigkeit der erforderlichen Luftertrittsfläche von der Wasserspiegellage im Staubecken. Innerhalb des untersuchten Schwankungsbereiches wächst die erforderliche Belüftungsfläche von 263 cm^2 bei $H = 416,00 \text{ m ü NN}$ auf das 3,5 fache bei $417,30 \text{ m ü NN}$.“

Auch die Untersuchungen von Bollrich (1994) zur Ermittlung der erforderlichen Belüftungsfläche für das plötzliche Abreißen des Hebers Burgkhammer bestätigen diese Abhängigkeiten von z . Er berechnete die erforderliche Belüftungsfläche von 3,7% der Heberfläche mit der Gleichung (3) für inkompressible Luftzuströmung unter Annahme eines erforderlichen Belüftungsgrades $\beta=1$, d.h. das erforderliche Luftvolumenstrom wurde von Bollrich gleich dem Wasservolumenstrom gesetzt. Eine Nachrechnung der Bedingungen an den Hebern Burgkhammer zeigt Abbildung 6.

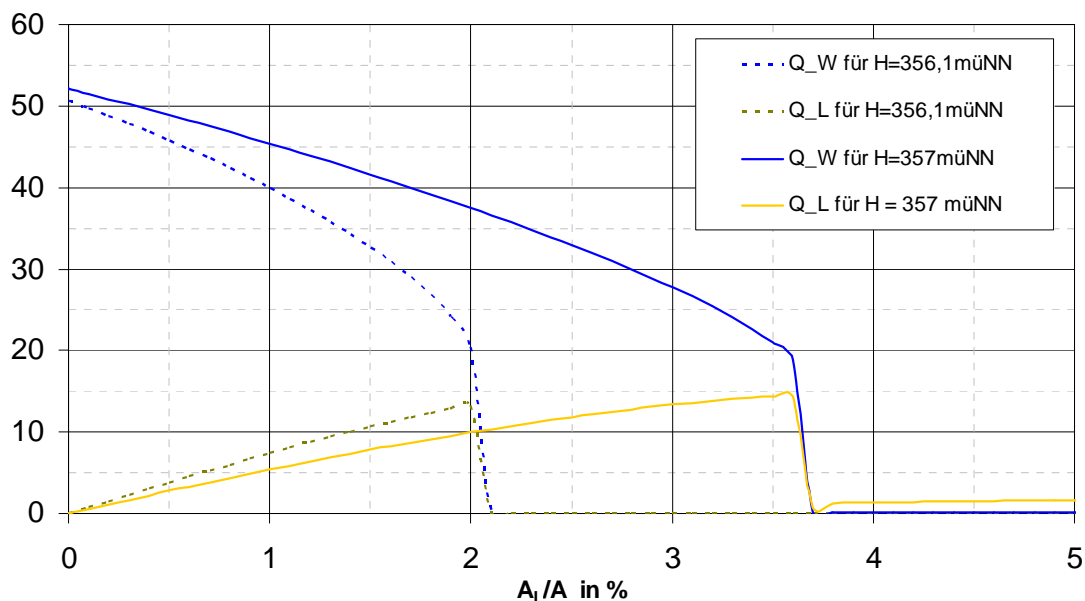


Abbildung 6: Berechnung des Abflusses und der Belüftung der Heber Burgkhammer

5 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 Oker-

Talsperre beweisen die Tauglichkeit dieser Berechnungen. Die durchgeführten Beispielrechnungen zeigen, dass die Belüftungswerte stark von der Wasserspiegellhöhe in der Talsperre abhängen. Auch bei der Übertragung der Modelluntersuchungen auf die Natur kann man diese Einflüsse von z nachweisen. Die vielen Annahmen in den Gleichungen, wie z.B. die Verlustbeiwerte infolge Luftermischung, 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 Vergleichsmessungen bzw. Modellversuche unerlässlich.

6 Literatur:

Aigner, D.: Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen und industrieller Prozesse. In Technische Hydromechanik, Band 4, Verlag für Bauwesen Berlin 2000,

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

Bollrich, G.: Hydraulische Untersuchung der Heberüberfälle des Ausgleichsbeckens Burgkammer. Internationaler Talsperrenkongress in Durban/Südafrika, November 1994, in IWT Heft 2, Weimar, Oktober 1994

Bollrich, G.; Aigner, D.: Hydraulisches Versuchswesen. In Technische Hydromechanik, Band 4, Verlag für Bauwesen Berlin 2000,

Bollrich, G.: Technische Hydromechanik, Band 1, 5. Auflage, Verlag für Bauwesen Berlin 2000,

Volkart, P.: Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftmitnahme. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau ETH Zürich, Heft 30, Zürich, 1978

Will, D. W.; Ströhl, H.: Einführung in die Hydraulik und Pneumatik, 5. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, 1990

Autor:

Dr.-Ing. habil. Detlef Aigner

Institut für Wasserbau und Technische
Hydromechanik der TU Dresden

Helmholtzstrasse 10, 01062 Dresden

Tel.: 0351 463 34725

Fax: 0351 463 37124

detlef.aigner@mailbox.tu-dresden.de