

Überprüfung der Leistungsfähigkeit eines Schachtüberfalls

Dipl.-Ing. Klaus-Joachim Prien,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Martin,
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Pohl,
Dipl.-Ing. Marlene Pollok

Die Aabach-Talsperre dient der Trinkwasserversorgung und dem Hochwasserschutz im östlichen Nordrhein-Westfalen. Sie verfügt über einen Damm als Absperrbauwerk und einen Schachtüberfall mit anschließendem Ablaufstollen und einem räumlichen Tosbecken als Hochwasserentlastungsanlage. Die Neuberechnung des Bemessungszuflusses für die Hochwasserentlastungsanlage auf der Grundlage der seit dem Bau vor 25 Jahren gesammelten hydrologischen Daten und der Anwendung des Hochwasserbemessungsfalls 2 gemäß neuer DIN 19700-11 hat zu einer Anhebung dieses Wertes von 53 m³/s auf 75 m³/s geführt. Vor diesem Hintergrund sind an der TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, hydraulische Berechnungen und Modellversuche zur Leistungsfähigkeit dieser Hochwasserentlastungsanlage durchgeführt worden, über die nachfolgend berichtet wird.

Schachtüberfall, Hochwasserentlastungsanlage, Bemessungsabfluss,
Modellversuch

1 Veranlassung und Zielstellung

Die Sicherheit einer Talsperre ist maßgeblich von der Funktionssicherheit ihrer Hochwasserentlastungsanlage abhängig. Die Neufassung technischer Regeln und die Ermittlung neuer Bemessungshochwasserabflussscheitelwerte (bisher 53, jetzt 75 m³/s) mit Hilfe maximierter Gebietsniederschläge veranlassten den Wasserverband Aabach – Talsperre, die Funktionsweise der Hochwasserentlastungsanlage und insbesondere deren maximal möglichen Abfluss an einem physikalischen Modell überprüfen zu lassen.

Wichtig war dabei vor allem die Frage, ab welchem Durchfluss mit einem

Zuschlagen des als Freispiegelgerinne bemessenen Ablaufstollens zu rechnen sei und welche Rolle dabei die mitgeführte Luft spielt.

2 Modellversuche

Der Versuchsaufbau erfolgte im Hubert-Engels-Labor des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden.

Die Hochwasserentlastungsanlage der Aabachtalsperre wurde nach dem Froudeschen Modellgesetz im Längenmaßstab $M = 1:15,79$ nachgebildet (Orientierung am Fallschachtdurchmesser mit Verwendung von genormtem, handelsüblichen Rohrmaterial). Die Durchflüsse verhielten sich dementsprechend wie 1:990,73.

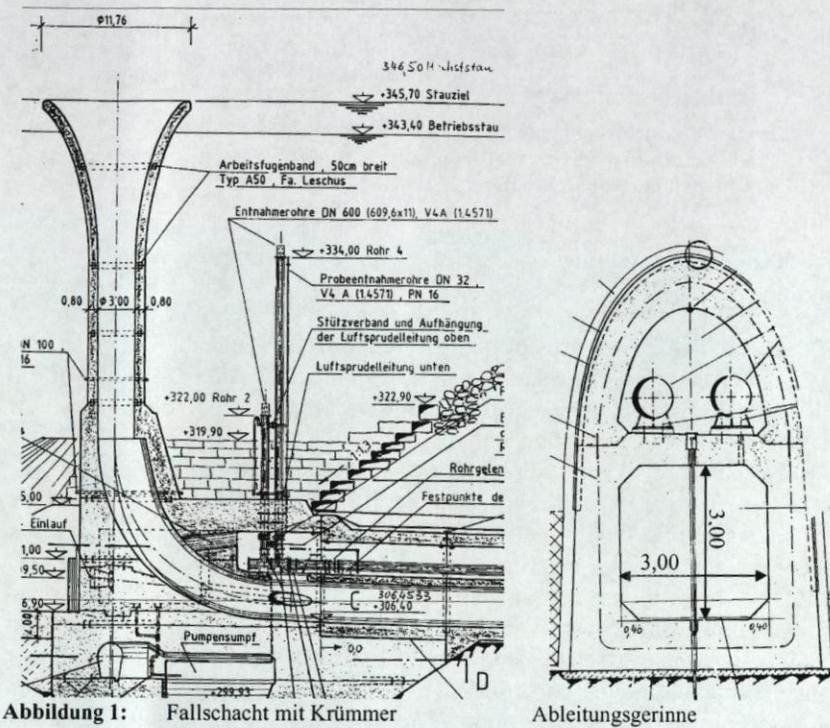
Die vom Wasser durchflossenen Anlagenteile wurden aus Plexiglas hergestellt. Der Einlauftrichter und der Krümmer wurden aus 6 mm dickem Acryl zweiteilig tiefgezogen und zusammengesetzt. Der Hochwasserentlastungsstollen von etwa 10 m Länge im Modell wurde als abgedecktes U-förmiges Kastenprofil mit 2 Fasen auf der Sohle hergestellt. Am Ende des Stollens drückt eine schräge Prallplatte den Abfluss nach unten in das Tosbecken und leitet damit die Energieumwandlung ein. Das Tosbecken wurde aus 10 mm Acryl mit Abstützung außen, mit vertikal veränderbarer Tauchwand und mit 14 Störkörpern, die jeweils mit einer Gewindestange im Boden angeschraubt werden können, angefertigt. In das als Stausee fungierende Gefäß wurde das Wasser mit Hilfe von frequenzgesteuerten Pumpen gefördert. Eine Prallplatte aus Lochblech am Zulauf in dieses Gefäß schützte den Einlauftrichter gegen Stoß und konnte damit die Turbulenzen an der Oberfläche verringern und ein gleichmäßigen Fallschachtzulauf ermöglichen. Der Ablauf erfolgt vom Tosbecken direkt in den Rücklaufkanal des Labors.

Die Messausstattung des Versuches ist in Abbildung 3 dargestellt. Die gewonnenen Daten werden rechnergestützt erfasst und ausgewertet. Um die Beobachtungen besser zu visualisieren und auswerten zu können, wird der Durchflussvorgang am Schachteinlauf, im Bereich des Krümmers, am Stollenende und im Tosbecken mit Video- und Fotoaufnahmen dokumentiert.

3 Ergebnisse

Die hydraulische Berechnung des Schachtüberfalls ergab einen Überdeckungsabfluss (bei dem die Überfallströmung in den Druckrohrabfluss

übergeht) von $Q_0 = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ und einen kritischen Abfluss (bei dem ein kritischer Unterdruck im Fallschacht erreicht wird) von $Q_{\text{krit}} = 126 \text{ m}^3/\text{s}$. Beide Werte liegen deutlich über dem Anderthalbfachen des alten wie des neuen Bemessungsabflusses, so dass von dieser Seite keine Einschränkungen zu erwarten sind. Der Ist-Zustand der Hochwasserentlastungsanlage wurde im Modell für Abflüsse von 10 bis $80 \text{ m}^3/\text{s}$ untersucht.



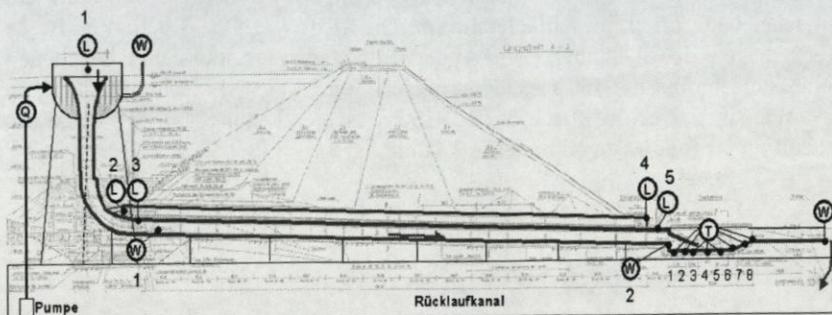


Abbildung 2: Versuchsanordnung: Q...induktive Durchflussmessung (IDM), L...Messung des Luftdurchsatzes (Mikroflügel), W...und T...Wasserstandsmessungen (Ultraschall/Messharfe)

3.1 Visuelle Beurteilung

Bei einem Abfluss von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ fiel das Wasser vertikal im Fallschacht herunter, ab $20 \text{ m}^3/\text{s}$ lief es an der Außenwand des zylindrischen Schachtes herunter und führte dabei eine Drehbewegung aus. Ab $40 \text{ m}^3/\text{s}$ war die Drehung nahezu vollständig. Diese Drehung ist auch in der Natur bei Überfällen ohne Leitwände auf der Krone nicht auszuschließen.

In Höhe der Abrisskante erfolgte das Auftreffen auf den Krümmer. Die Richtungsänderung ist mit einer starken Turbulenz und einem teilweisen Pendeln des Abflusstrahles verbunden. Durch den anschließenden Abfluss mit wellenförmiger Wasserspiegellage im Ablaufstollen wurde bereits bei Abflüssen ab $53 \text{ m}^3/\text{s}$ eine zeitweilig (später häufig bis dauernd) pulsierend auftretende Fontäne eines Wasser-Luft-Gemisches nach dem Krümmer am Anfang des Hochwasserentlastungsstollens beobachtet, welche durch eine Montageöffnung in die obere Etage des Ableitungsbauwerkes zu den Rohwasserentnahmeleitungen hin austrat. Seitliche Wellen bis hin zur Stollendecke waren häufig nach dem Passieren des Krümmers im ersten Teil des Hochwasserentlastungsstollens zu beobachten.

Bei Durchflüssen von etwa $75 \text{ m}^3/\text{s}$ ist auch ein seltenes Zuschlagen des Hochwasserentlastungsstollens in Höhe der Entlüftungsöffnung am Stollende beobachtet worden. Dabei trat auch hier das Wasser-Luft-Gemisch fontänenartig aus. Durch den stoßartigen Wasseraustritt sind kleinere Schäden am Entlastungsbauwerk nicht vollkommen auszuschließen. Ab etwa $75 \text{ m}^3/\text{s}$ erfolgte auch ein beidseitiges Übertreten des Wassers aus dem Tosbecken. Durch dieses Überschwappen sind Auswaschungen und Beschädigungen der

umliegenden Böschungen und des Geländes denkbar. Es wird nicht erwartet, dass die geschilderten, kurzzeitigen Belastungen die Standsicherheit des Absperrbauwerkes negativ beeinträchtigen, weshalb sie im vorliegenden Hochwasserbemessungsfall 2 nach DIN 19700 T11 toleriert werden können.

3.2 Druckhöhen und Geschwindigkeiten im Hochwasserentlastungsstollen und im Tosbecken

Im Tosbecken schwankten die Druckhöhen (Wasserstände) aufgrund der Turbulenz und des erzwungenen Fließwechsels erheblich. Beim Blick auf das Tosbecken vom Unterwasser aus (Abbildung 3) ließ sich eine raue, unebene Wasseroberfläche beobachten. In der Mitte herrschten niedrige Wasserstände welche zu den Seiten hin leicht anstiegen und an den Wänden steil nach oben schossen. Die Druckhöhen unter der Prallplatte waren bei allen Abflüssen relativ konstant (Schießen). Die Druckhöhe am Ende der Prallplatte zum Tosbecken hin schwankte wegen der Pulsation im Wechselsprung um etwa einen Meter (bezogen auf die Großausführung).

Die Wasserstände direkt vor der ersten Bremspfeilerreihe lagen relativ hoch (leichter Aufstau, geringe Geschwindigkeit) um dann zwischen beiden Bremspfeilerreihen abzusinken. Je größer der Abfluss war, desto tiefer lag der Wasserspiegel, da eine hohe Geschwindigkeit infolge der Strahleinschnürung durch die 2 benachbarten Bremspfeiler herrschte. Bei den letzten 3 Messpunkten im Tosbecken wurde ein leichter Anstieg zum Tosbeckenende hin verzeichnet, der Wasserspiegel war aber relativ gleichmäßig (Strömen). Das Überlaufen des Wassers über den Tosbeckenrand wurde durch Videoaufnahmen dokumentiert.



Abbildung 3: Tosbecken von Unterwasser mit eingezeichnetem Wasserspiegel

Über den Wasserstand und Durchfluss sind die Geschwindigkeiten im Hochwasserentlastungsstollen und Tosbecken indirekt ermittelten worden. Die hohe Geschwindigkeit im Hochwasserentlastungsstollen wird durch die schräge Prallplatte abgebremst, wodurch ein gewisser Rückstau entsteht, aus dem sich bei hohen Abflüssen ein kurzzeitiges Zuschlagen entwickeln kann. Zwischen den Störkörpern kam es nochmals zu einem leichten Anstieg der Geschwindigkeit.

Die beobachteten (und gefilmten Fontänen) an der Montage- und Entlüftungsöffnung konnten ebenfalls messtechnisch nur ungenügend erfasst werden, da sich dieser Zustand nur kurzzeitig und pulsierend einstellte. Die Wasserstandszylinder für die Ultraschallabtastung reagieren zeitlich etwas verzögert und gleichen kurzzeitige Schwankungen aus, was dort im Sinne der Glättung bzw. Mittelbildung auch erwünscht war.

Die Variation der Wasserstände lässt sich vor allem aber über den Anteil der mitgerissenen Luft erklären. Obwohl ein Teil der im Schacht transportierten Luft ab der Abrisskante beginnend bereits wieder aus dem Wasser ausgetreten war, enthielt der Wasserstand, welcher am Stollenanfang gemessen wurde, noch einen hohen Anteil Luft (die turbulente Grenzschicht reichte von der Oberfläche bis auf die Stollensohle). Dieser Luftanteil gaste im Hochwasserentlastungsstollen nach und nach aus, so dass am Messpunkt 2 (Stollenende) der Luftanteil deutlich geringer war.

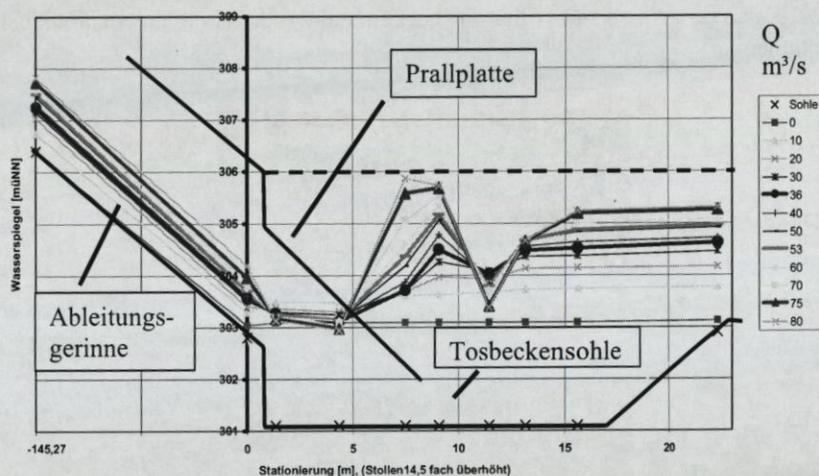


Abbildung 4: Drucklinien Ist-Zustand

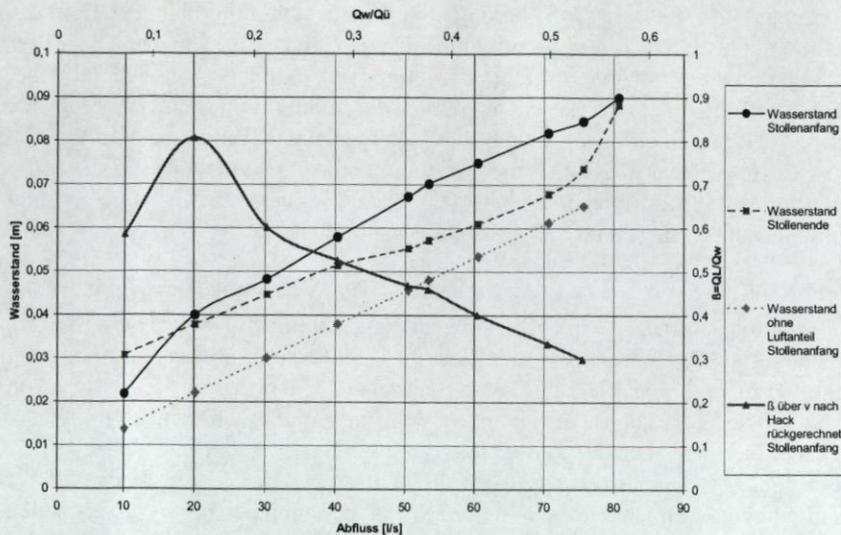


Abbildung 5: Wassertiefen und Belüftungsgrad β

Der Wasserstand am Ende war niedriger als am Stollenanfang, wobei die Geschwindigkeit des Wassers infolge der Abbremsung im Stollen auf keinen Fall größer sein kann. Die Abweichung der Geschwindigkeiten vom erwarteten Wert wurde bei Durchflüssen von über $70 \text{ m}^3/\text{s}$ wieder geringer und ging gegen 0. Das zeigt, wie auch die Luftmessung bestätigt, dass im Modell bei hohen Durchflüssen von $70\text{-}80 \text{ m}^3/\text{s}$ kaum noch Luft an den ersten 3 Luftmessstellen (Schachteinlauf, Abrisskante, Montageöffnung hinter dem Krümmer) mitgerissen wird. Der Luftanteil ist also sowohl am Stollenanfang als auch Ende gering. Die Wasserstände W1 (am Stollenanfang) und W2 (am Stollende) nähern sich also mit steigendem Durchfluss aneinander an, bzw. W1 wird kleiner, weil der Luftanteil am Messpunkt 1 zunehmend geringer wird.

3.3 Luftdurchsatz in der Hochwasserentlastungsanlage

Die Betrachtung der vom Wasser mitgeführten Luft ist wichtig, weil diese einen Teil der für die Hochwasserableitung zur Verfügung stehenden Querschnittes einnimmt und somit die so genannte Abflussleistung reduzieren kann.

Mit dem überfallenden Wasser wurde Luft in den trichterförmigen Schachteinlauf gerissen. Hack (1977) geht davon aus, dass das Wasser an der

Rohrwand des Fallschachtes herunter läuft und sich innerhalb ein Luftkern befindet. Die Größe der Luftaufnahme ist nun abhängig von der Dicke der turbulenten Grenzschicht, welche wiederum abhängig von der Überfallhöhe, dem Überfallwinkel und der Differenz von Energielinie und Wasserspiegel ist. Ist die Grenzschichtdicke gleich der senkrecht zur Wandung gemessenen Wasserstrahldicke, beginnt die Luftaufnahme. Daraus lässt sich der Belüftungsgrad bestimmen. Einen erheblichen Einfluss auf die Turbulenz und damit auf die Grenzschichtdicke hat die Wandrauheit.

Der Belüftungsgrad $\beta = Q_L/Q_w$ definiert das Verhältnis des abfließenden Luftvolumenstromes zum abfließenden Wasservolumenstrom. Diese sind in Abhängigkeit des Verhältnisses Abfluss zu Überdeckungsabfluss in Abbildung 7 aufgetragen. Die glatte Linie ohne Symbol stellt den für die Bemessung von Schachtüberfällen zugrunde liegenden Belüftungsgrad nach WAPRO 4.09 – 4 Schachtüberfälle- dar. Die gepunktete Linie (Dreieck) ist der nach Hack (1977) berechnete Belüftungsgrad. Über die Differenz der nach Hack (1977) ermittelten Geschwindigkeiten und der aus den gemessenen Wasserständen ermittelten Geschwindigkeiten am Stollenanfang konnte der Luftanteil des Gemisch-abflusses und damit der Belüftungsgrad im Versuch (gestrichelte Linie) zu Vergleichszwecken näherungsweise bestimmt werden.

Die Parabel mit Sternsymbol kennzeichnet den theoretisch maximalen Luftdurchsatz. Er wurde über die maximale, auf Grund der Fallhöhe erreichbare Geschwindigkeit [Torricelli] unter Berücksichtigung des Luftkernes ermittelt. Wenn angenommen wird, dass sich am Anfang des zylindrischen Fallschachtes der Luftkern ohne Schlupf mit der Geschwindigkeit des Wassers bewegt, erhält man den dargestellten maximalen theoretischen Luftdurchsatz. Bei Berücksichtigung der Maximalgeschwindigkeit am Schachtende erhält man die Linie mit dem Punktsymbol, welche gut mit dem aus den (über dem Schachteinlauf) gemessenen Luftvolumenströmen ermittelten Belüftungsgrad (Dreiecksymbol) harmoniert.

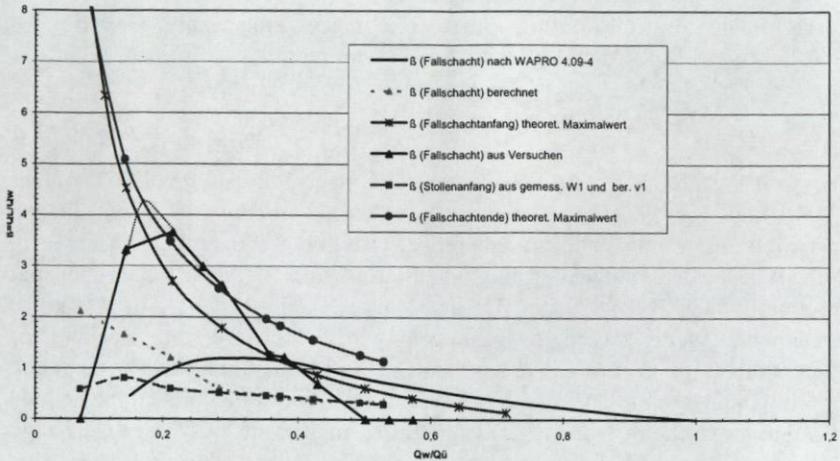


Abbildung 6: Belüftungsgrade β

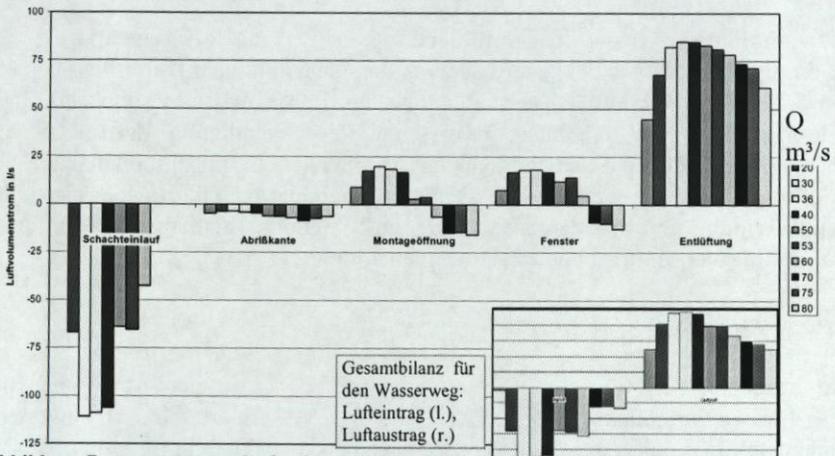


Abbildung 7: gemessene Luftvolumenströme Ist-Zustand (positiv = Luftausttrag, negativ = Lufteintrag)

Berechnungen nach Hack (1977) zu Folge beginnt in der Natur bei $53 \text{ m}^3/s$ Abfluss im Fallschacht (ca.) 21 m unterhalb der Überfallkrone die Lufteinmischung, d.h. die Grenzschicht erreicht die Wasseroberfläche. Bei einem Abfluss von $75 \text{ m}^3/s$ erreicht die Grenzschicht die Wasseroberfläche nicht, es wird keine Luft eingemischt. (Das bestätigt auch der Modellversuch, in dem beim Bemessungsabfluss von $75 \text{ m}^3/s$ keine Luftbewegung über dem Schachteinlauf gemessen und auch an der Abrisskante weniger Luft angesaugt

wurde.) Die Luftmitführung im Ableitungsgerinne kann durch den Belüftungsgrad β oder den Luftanteil am Gesamtstrom

$$c_m = (Q_w + Q_L) / Q_w = \beta / (\beta + 1) \quad (1)$$

z.B. nach WAPRO 4.09 – 4 Schachtüberfälle, nach Rao/Kobus (1972), Hager (1994) und Sliski (1986) ermittelt werden. Während die ersten beiden Verfahren Belüftungsgrade im unteren zweistelligen Prozentbereich ergeben, bleiben die beiden letzten Verfahren deutlich unter 5 %. Nach Hager errechnet sich ein β -Wert von 4% bei 75 m³/s, der mit sinkendem Abfluss auf 0 zurückgeht. Wenn davon ausgegangen wird, dass die am Beginn des Ablaufstollens noch im Wasser vorhandene Luft allmählich austritt, und sich der Luftgehalt am Stollende dem berechneten Wert annähert, ergibt sich als Differenz zwischen gemessener (mit Luft) und mittels Wasserspiegellage berechneter Wassertiefe (ohne Luft) ein Luftanteil der zwischen den Ergebnissen nach Hager und Sliski liegt.

In Abbildung 7 ist die Luftbilanz für die Einzelöffnungen und das Gesamtsystem dargestellt. Interessant ist, dass sich ab einem Durchfluss von 60 bis 70 m³/s die Luftbewegungsrichtung im Entnahmestollen umkehrt. Die Gesamtbilanz lässt erkennen, dass unter Berücksichtigung der möglichen Messgenauigkeit und der begrenzten Möglichkeiten einer modellähnlichen Luftmodellierung (ungenügende Berücksichtigung von Oberflächenspannung und Reibung im Froudemodell) eine gute Übereinstimmung der ein- und ausströmenden Luft nachgewiesen werden konnte.

4 Zusammenfassung

In den Modellversuchen war zu prüfen, ob der für extreme Hochwasserverhältnisse von 53 m³/s auf 75 m³/s erhöhte Hochwasserscheitelabfluss durch die Hochwasserentlastungsanlage abgeführt kann.

In den im Hubert-Engels-Labor durchgeführten Modellversuchen wurde festgestellt, dass der neue Bemessungsabfluss von 75 m³/s von der Hochwasserentlastungsanlage beherrscht wird. Dabei möglicherweise auftretende kleinere Schäden (durch Fontänen an Montage- oder Entlüftungsöffnung) können im Hochwasserbemessungsfall 2, bei dem es sich um ein Ereignis mit 10 000 jähriger Eintrittswahrscheinlichkeit handelt, zugelassen werden, weil erwartet wird, dass sie die Standsicherheit des Absperrbauwerkes nicht gefährden. Diese Auslegung entspricht auch der neuen DIN 19700 T 11, nach der beim Hochwasserbemessungsfall 2 Beschädigungen

an Bauwerksteilen, Betriebs- und Messeinrichtungen in Kauf genommen werden können, sofern hierdurch die Tragfähigkeit der Absperrbauwerke nicht gefährdet wird.

Gegebenenfalls sollte die Luftseite des Dammes um die Entlüftungsöffnung herum befestigt werden. Aus Sicherheitsgründen ist die Wartung des Unterwasserprofils zur Vermeidung von Rückstau jederzeit zu gewährleisten.

Varianten (Prallplatte 32 cm höher, ohne Prallplatte, Prallplatte beidseitig trapezförmig ausgespart) zeigten keine Verbesserung der hydraulischen Verhältnisse.

5 Literatur

- Bollrich, G.: Technische Hydromechanik 1.- Verlag Bauwesen, Berlin 5. Aufl. 2000
Martin, H.; Pohl, R.: Technische Hydromechanik 4.- Verlag Bauwesen, Berlin 2000
Ven Te Chow: Open-Channel Hydraulics.- McGraw-Hill, NewYork, Toronto, London 1959
Rao/ Kobus: Characteristics of self-aerated Flows, Water and Waste Water, Nr. 10, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld, 1972
Volkart, P.: Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme, Diss ETH Nr.6104, 1978, UAW ETH N. 30
Hack, H.P.: Lufteinzug in Fallschächte mit ringförmiger Strömung durch turbulente Diffusion, Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München, Bericht Nr. 36, 1977
Bormann, K.: Der Abfluss in Schussrinnen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme, Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München Bericht Nr. 13, 1968
Projektierung Wasserwirtschaft, WAPRO 4.09, Blatt 4 -Schachtüberfälle-, 1962
Hager, W.H.: Abwasserhydraulik, Springer- Verlag, 1994
Slisky, C.M.: Hydraulische Berechnungen von Hochdruckanlagen, Energoatomisdat, 1986

Autoren:

Dipl.-Ing. Klaus-Joachim Prien

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Martin
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Pohl
Dipl.-Ing. Marlene Pollok

Wasserverband Aabach- Talsperre

Institut für Wasserbau und Technische
Hydromechanik
Technische Universität Dresden
D 01062 Dresden

Bleiwäischer Straße 6

D-33181 Bad Wünnenberg

Tel.: ++49 - 2953 - 9877-0

Tel.: ++49 - 351 - 46335693

Fax: ++49 - 2953 - 9877-15

Fax: ++49 - 351 - 4635693

E-Mail: <mailto:prien@aabachtalsperre.de>

<mailto:Reinhard.Pohl@mailbox.tu-dresden.de>



HYDROPROJEKT
INGENIEURGESELLSCHAFT

**Seit Jahrzehnten bewährt -
Ingenieurleistungen für**

WASSER

UMWELT

INFRASTRUKTUR

Firmensitz:

**Hydroprojekt Ingenieurgesellschaft mbH
Rießnerstraße 18
99427 Weimar**

**Telefon: (03643) 746 400
Telefax: (03643) 746 405
e-mail: hydroprojekt@hydroprojekt.de
Internet: <http://www.hydroprojekt.de>**

Regionalbereiche und Geschäftsstellen in:

**Bad Vilbel, Berlin, Dresden, Leipzig,
München, Stuttgart, Weimar**

**Planung und Consulting
für umweltgerechten Wasserbau**