

Wirbelfallschacht zur Entwässerung einer Autobahnbrücke

Köln, im Mai 2010

Kurzfassung

Die Brückenentwässerung an der Wiehltalbrücke der BAB A4 muss im Rahmen der umfassenden Reparatur- und Sanierungsmaßnahmen nach einem schweren Verkehrsunfall, in welchen ein brennender Tanklastzug verwickelt war, erneuert werden. Für die Planung sind die aktuellen Vorschriften, insbesondere DIN EN 752, RAS-EW, DWA-Arbeitsblätter 110, 112 und 118 zu beachten.

Der Höhenverlauf der Fahrbahn bildet innerhalb des Brückenabschnitts eine Wanne. Der maximale Höhenunterschied zwischen Fahrbahn und dem Gelände unter der Brücke beträgt ca. 60 m. Zur Überwindung der daraus resultierenden Fallhöhe des Wassers ist ein Wirbelfallschacht als Absturzbauwerk vorgesehen, wobei Zuläufe in die so genannten Einlaufspiralen aus zwei Richtungen erfolgen. Die mit Blick auf die Brückenkonstruktion gewählte Anordnung führt zu schießenden Anströmungen der Einlaufspiralen. Zur möglichst einfachen Gestaltung der Bauteile werden abweichend von der gängigen Ausführung für derartige Anströmungen Einlaufspiralen mit ebenen Sohlen gewählt. Durch Strahlführungen an den Seitenwänden, deren Formgebung experimentell ermittelt wird, wird ein Ausuferen des Wasserstrahls über den Schachtrand hinaus bei größeren Durchflüssen verhindert. Über 90 % der kinetischen Energie wird durch die Wandreibung im Fallschacht vornehmlich in Wärme umgewandelt. Der übrige Anteil wird in einer Toskammer in Schall und Wärme umgewandelt. Da die Anlage innerhalb eines besiedelten Gebiets liegt, sind geringe Schallemissionen anzustreben. Die Höhenlage und die Einbauten in der Toskammer am Fuß des Fallschachts werden unter Berücksichtigung eines vom Durchfluss abhängigen Rückstaus gewählt.

Vortex drop structure for the drainage of a highway bridge

Summary

The drainage system of the German bridge at the Highway 4 has to be replaced during repairing and rehabilitation activities after a heavy traffic accident involving a burning fuel truck. The design has to be based on the actual standards and guidelines, especially on DIN EN 752, RAS-EW, DWA-Paper 110, 112 and 118.

The course of the highway altitudes forms a depression in the reach of the bridge. The maximum height between bridge and valley surface amounts to approx. 60 m. A vortex

drop shaft with two directions of approaching flow is chosen to cover the resulting drop height of water. The arrangement has to consider the structural elements, which leads to supercritical flow at the spiral inlets. Deviating from the general guide lines for such flows, the intake spirals are designed applying a flat bottom to simplify the different elements of the drop shaft. Jet guide spurs with an experimentally developed shaping prevent from overtopping at higher discharges. More than 90 % of the kinetic energy is converted mainly to heat by the wall friction at the drop shaft. The installation is arranged within a habituated area. Therefore it is aimed at low acoustic emissions. The bottom level and further installations of the stilling chamber at the toe of the drop shaft are chosen regarding a backwater level depending on the discharge.

Verfasseranschriften:

Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Heinemann
Fachhochschule Köln
Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser
Lehrgebiet Hydrologie, konstruktiver Wasserbau, Grundbau
Betzdorfer Straße 2
50679 Köln
ekkehard.heinemann@fh-koeln.de
<http://www.f06.fh-koeln.de/personen/professoren/ekkehard.heinemann/index.html>

Dipl.-Ing. Florian Roth
Ingenieurbüro Osterhammel GmbH
Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft
Dr.-Schild-Straße 5
51588 Nümbrecht
roth@osterhammel.de
<http://www.ingenieurbuero-osterhammel.de/mitarbeiter-a-z/roth-florian.html>

Dipl.-Ing Thomas Krumschmidt
Landesbetrieb Straßenbau NRW
Autobahnniederlassung Krefeld
PL Abteilung Bau
Hansastr. 2
47799 Krefeld
thomas.krumschmidt@strassen.nrw.de
<http://www.strassen.nrw.de/einrichtungen/nl/kr/index.html>

1 Einleitung

Im Rahmen der erforderlichen Bauwerkssanierung der Wiehltalbrücke an der Bundesautobahn 4 in Nordrhein-Westfalen soll ebenfalls die Sanierung der entwässerungstechnischen Anlagen gemäß dem aktuellem Stand der Technik sowie dem Wasserrecht erfolgen. Im vorhandenen Zustand wird das auf der Brücke anfallende Regenwasser zu einem Drittel direkt in ein Gewässer eingeleitet und zu zwei Dritteln über Wasserspeier auf das unterhalb der Brücke gelegene Gelände versprüht.

Ziel der Planung ist es, das Oberflächenwasser der Autobahnbrücke sowie der angrenzenden Streckenabschnitte mit Straßenabläufen zu fassen und durch unter der Brückenkonstruktion hängende Rohrleitungen jeweils vom westlichen und vom östlichen Brückenwiderlager aus, dem Brückentiefpunkt zuzuleiten. Dort soll das verunreinigte Oberflächenwasser über ein rd. 60 m hohes Absturzbauwerk der Abwasserbehandlung zugeführt werden.



Bild 1: Ansicht Brückenpfeiler

Nach erfolgter mechanischer Reinigung soll der Drosselabfluss aus dieser Behandlungsanlage in das Gewässer eingeleitet werden. Als Besonderheit wird gesehen, dass die Zulaufleitung zu dem nachgeschalteten RiStWag-Abscheider mit Gegengefalle als „Düker“ ausgebildet ist.

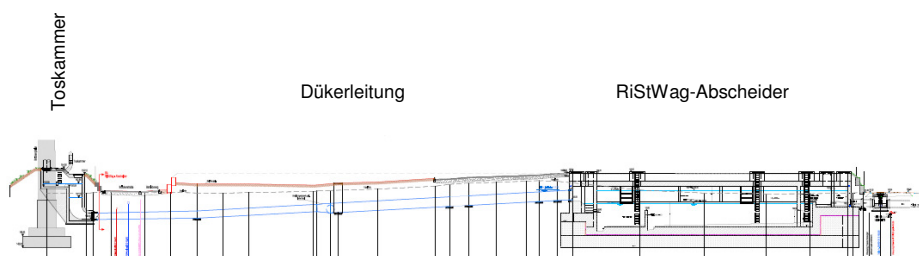


Bild 2: Längsschnitt Düker

Im zukünftigen Betrieb wird sich hier vermutlich eine verstärkte Neigung zur Ablagerung von absetzbaren Stoffen zeigen, die zu einem erhöhten Unterhaltungsaufwand führt. Die Höhe der am Fuß des Wirbelfallschachtes erforderlichen Toskammer ist unter Berücksichtigung der mit dem Durchfluss wechselnden Rückstaubedingungen zu wählen.

1.1 Vorüberlegung

Für die Entwässerung der Autobahnbrücke wurde dem Landesbetrieb Straßenbau NRW als Straßenbaulastträger die Ausbildung eines Wirbelfallschachtes unter Durchführung von Modellversuchen im Wasserbaulabor durch den Planer dringend empfohlen.

Ein lediglich als Fallrohrleitung ausgebildetes Absturzbauwerk würde zu folgenden Nachteilen führen:

- ⇒ Der freie Fall des Wasserstrahls führt zu einem unkontrollierten Wasser-Luft-Gemisch mit einem nicht abschätzbar hohen Luftbedarf
- ⇒ Der un gelenkte Einlauf führt dazu, dass sich das Wasser-Luft-Gemisch nicht gleichmäßig ausbilden kann. Es können wechselnde Wasser- und Luft-„Pfropfen“ entstehen, die ein kurzzeitiges Zurückblasen von Wasser zur Folge hätten. In solchen Phasen wird das Ableitungsvermögen der Fallrohrleitung erheblich eingeschränkt.
- ⇒ Es ist nicht möglich, den Grad der Energieumwandlung innerhalb des Fallvorgangs abzuschätzen. Somit ist die Dimensionierung einer Toskammer am Fuß des Fallrohres nicht möglich. Eine Umwandlung der auftretenden kinetischen Energie wird am Fallschachtende überwiegend in Schall erfolgen.

Die modelltechnischen Untersuchungen sollten insbesondere zwei Bereiche näher beleuchten:

- ⇒ Einlaufbereich:
Da zwei gegenläufig durchströmte Leitungen an den Fallschacht angeschlossen werden müssen, weicht die Gestaltung des Wirbeleinlaufs von Standard-Formgebungen (beispielsweise DWA-A 112) ab und ist deshalb an die maßgebenden örtlichen Bedingungen anzupassen.
- ⇒ Toskammer:
Die Rückstaubedingungen des an den Fallschacht anschließenden Entwässerungssystems erfordern eine bestimmte höhenmäßige Anordnung und erwartungsgemäß Einbauten, die für unterschiedliche Betriebsbedingungen eine gute Energieumwandlung sowie eine ausreichende Trennung von Wasser und Luft bewirken.

Erst nachdem die Ergebnisse aus den Modellversuchen vorliegen, kann die ausführungsfähige Planung des Wirbelfallschacht erfolgen.

1.2 Grundlagenermittlung

Die europäische Norm DIN EN 752-2 enthält Anforderungen an den Überflutungsschutz, die für den Entwurf von Neuanlagen empfohlen werden, sofern von der zuständigen Stelle keine entsprechenden Vorgaben gemacht werden. Der Vorgang der Überflutung ist jedoch in hohem Maße von den lokalen Verhältnissen abhängig. Die Entscheidung über die Wiederkehrzeit des zugrunde zu legenden Bemessungsniederschlags wird durch das gewünschte Maß an Sicherheit gegen Überschreitung bzw. nach den Maßstäben der Verkehrssicherheit bestimmt.

Es ist in diesem besonderen Fall zu beachten, dass die Brücke an exponierter Lage den Tiefpunkt einer Wanne bildet, von dem das bei Starkniederschlagsereignissen aus den Entwässerungsleitungen zurückstauende und somit auf der Fahrbahn verbleibende Wasser nicht anderweitig (z. B. über die Schulter) abfließen kann. Es muss darüber hinaus berücksichtigt werden, dass bei Starkniederschlägen in Fahrtrichtung Westen die Überholspur als Entwässerungstiefpunkt eingestaut wird. Aus diesen Überlegungen heraus wird für die Bemessung der Entwässerungsanlagen mindestens eine Bemessungshäufigkeit von $n = 0,2 \frac{1}{a}$ gewählt.

Im Bereich der Anschlüsse der einzelnen Entwässerungszuleitungen DN 150 mm an den Scheitel der unter der Brücke aufgehängten Sammelrohrleitung tritt ein enormer Lufteintrag auf, der zu Verwirbelungen führt, die wiederum nur schwer abzuschätzen sind, aber mit enormen Verlusten und somit mit negativen Einwirkungen auf die Abflussleistung verbunden sind. Daher ist die Wahl der betrieblichen Rauheit nicht maßgeblich von dem gewählten Rohrmaterial abhängig, sondern wird vor allem von der Vielzahl an Einleitungen im Rohrscheitel beeinflusst. Als Grundlage für die Bemessung der Sammelleitung wird eine betriebliche Rauheit von mindestens $k_b = 1,5 \text{ mm}$ angesetzt.

1.3 Vorbemessung des Wirbelfallschacht

An der Wiehltalbrücke sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- ⇒ Der Wirbelfallschacht ist als Vereinigungsbauwerk auszubilden, da der Zufluss von zwei Teilstrecken ausgeht.
- ⇒ Der Fallschacht ist im Wind- und Sichtschatten eines schlanken Brückenpfeilers anzuordnen.
- ⇒ Die Entwässerungsleitungen können weitgehend innerhalb der Verstrebung der Brückentragkonstruktion geführt werden. Die Einlaufspiralen müssen aber aufgrund der örtlichen Festlegung des Fallschachts unter dieser Verstrebung angeordnet werden.

⇒ Vorgenannte Bedingung führt zu Leitungsabschnitten mit großen Gefällen unmittelbar vor den Einlaufspiralen und damit zu hohen Fließgeschwindigkeiten. Die Anströmung ist jeweils stark schießend (FROUDE-Zahl $Fr > 6$).

1.4 Fließverhältnisse an den Zuläufen

Wesentliche Grundzüge zur Ausbildung eines Wirbelfallschachts werden im Arbeitsblatt DWA A 112 (Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Sonderbauwerken in Abwasserleitungen) beschrieben. Weitergehende Hilfen sind bei Hager, Kellenberger, Kleinschroth, Merlein und Valentin [2, 4, 6, 8] zu finden. Danach werden Fallschächte mit schießender Anströmung in der Regel mit einer stark geneigten Sohle im Bereich der Einlaufspirale ausgebildet. Nur Motzet und Valentin [9] weisen darauf hin, dass auch dann eine Ausbildung mit ebener Sohle möglich ist. Allerdings gilt in diesen Fällen, dass der Wasserstrahl an der Wand der Einlaufspirale etwa bis zur sohlenbezogenen Energiehöhe ansteigt.

Im Hinblick auf eine möglichst einfache Ausführung für die unter der Brückenkonstruktion zu befestigenden Bauteile wird zunächst eine Ausbildung der Einlaufspiralen mit ebenem Boden favorisiert. Dazu wird zunächst ein auf hydraulischen Berechnungen gegründeter Entwurf aufgestellt, der durch Modellversuche überprüft wird.

Vorentwurf

Hydraulische Berechnungen führen zu folgenden Anströmbedingungen für den Wirbelfallschacht:

Anströmung aus dem westlichen Brückenabschnitt

Zufluss	$Q = 285 \frac{1}{s}$;
Fließgeschwindigkeit	$v = 6,13 \text{ m/s}$.
Rohrleitungsdurchmesser mit Übergang zum Rechteckquerschnitt	DN 450
Breite des Rechteckquerschnitts	$b = 0,40 \text{ m}$;

Anströmung aus dem östlichen Brückenabschnitt

Zufluss	$Q = 179 \frac{1}{s}$;
Fließgeschwindigkeit	$v = 6,29 \text{ m/s}$.
Rohrleitungsdurchmesser: mit Übergang zum Rechteckquerschnitt	DN 350
Breite des Rechteckquerschnitts:	$b = 0,30 \text{ m}$;

1.5 Gestaltung des Wirbelfallschachts

1.5.1 Wahl des Fallschachtdurchmessers

Die Gestaltung der Einlaufspiralen richtet sich vornehmlich nach dem Durchmesser des Fallschachts und den Breiten der Zulaufkanäle. Der Durchmesser des Fallschachts wird aus dem Gesamtzufluss $Q_{\max} = 0,285 + 0,17899 = 0,464 \text{ m}^3/\text{s}$ errechnet [10]:

$$d_{FS} = \eta \cdot \sqrt[5]{\frac{Q_{\max}^2}{g}}$$

Bei einem an der ETH Zürich untersuchten Bauwerk [10] wurde für einen als Vereinigungsbauwerk ausgeführten Wirbelfallschacht ein Beiwert $\eta = 1,67$ gewählt und in Modellversuchen bestätigt. Mit diesem Wert erhält man

$$d_{FS} = 1,67 \cdot \sqrt[5]{\frac{0,464^2}{9,81}} = 0,78 \text{ m}.$$

Für den Fallschacht des Absturzbauwerks an der Wiehltalbrücke wird der Fallschachtdurchmesser mit $d_{FS} = 0,80 \text{ m}$ gewählt.

1.5.2 Radien der Einlaufspiralen

Die äußeren Radien der Einlaufspiralen werden in Anlehnung an das DWA-Arbeitsblatt A 112 gewählt. Die inneren Radien ergeben sich bei einem Vereinigungsbauwerk durch die Anordnung beider Spiralen um den gemeinsamen Fallschacht. Die im vorliegenden Fall gewählten Abmessungen sind der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

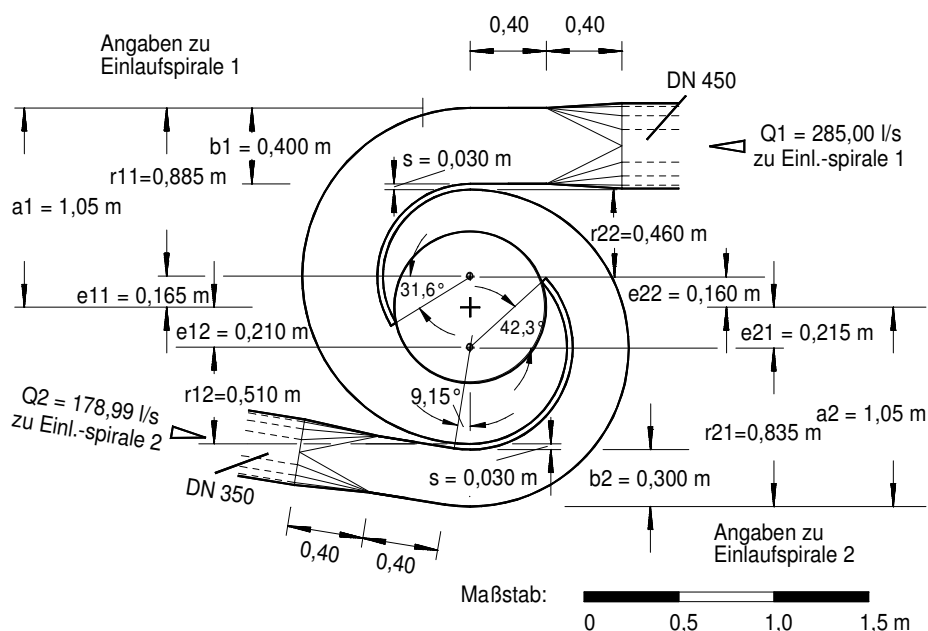


Bild 3: Abmessungen der Einlaufspiralen des Wirbelfallschachts

1.5.3 Fließverhältnisse im Fallschacht

Der Fallschacht ist auf den gesamten Abfluss von $Q = 464 \frac{1}{s} = 0,464 \frac{m^3}{s}$ ausgelegt. Die Geschwindigkeit steigert sich im Fallschacht bis zu einem Grenzwert v^* . Für die Endgeschwindigkeit und die zugehörige Tiefe z_L unter der Einlaufspirale, ab der diese Geschwindigkeit auftritt, werden zunächst folgende Normierungsgrößen verwendet:

$$v^* = k_{St}^{3/5} \cdot \left(\frac{Q}{\pi \cdot d_{FS}} \right)^{2/5},$$

$$z_* = \frac{v_*^2}{2 \cdot g}.$$

Der Rauheitsbeiwert nach Manning-Strickler wird für das relativ glatte Rohr mit $k_{St} = 90 \frac{m^{3/5}}{s}$ angesetzt. Damit erhält man

$$v_* = 90^{3/5} \cdot \left(\frac{0,464}{3,1416 \cdot 0,80} \right)^{2/5} = 7,57 \text{ m/s},$$

$$z_* = \frac{7,57^2}{19,62} = 2,92 \text{ m}.$$

Die Endgeschwindigkeit v errechnet sich unter Berücksichtigung der geplanten Schachttiefe von $l_s = 60 \text{ m}$ zu

$$v = \sqrt{v_*^2 \cdot \tanh\left(\frac{l_s}{z_*}\right)} = \sqrt{7,57^2 \cdot \tanh\left(\frac{60}{2,92}\right)} = 7,57 \text{ m/s}.$$

Dieser Wert entspricht v^* , da $\tanh\left(\frac{60}{2,92}\right)$ den Wert 1 erreicht.

Die Endgeschwindigkeit wird in der Tiefe z_L erreicht. Der zugehörige Zahlenwert ergibt sich nach [2, 4] zu

$$z_L = 3 \cdot z_* = 3 \cdot 2,92 = 8,76 \text{ m}$$

Dieser Wert ist für die vorgesehene Modelluntersuchung zu berücksichtigen. Das Modell muss diese Tiefe des Fallschachts (mit dem Modellmaßstab verkleinert) wenigstens einbeziehen, um die Abmessungen und Einbauten der Toskammer mit überprüfen zu können.

Der für die Energieumwandlung im Fallschacht gegebene Wirkungsgrad errechnet sich aus der gesamten Höhe von ca. 60 m und der Geschwindigkeitshöhe aus der Endgeschwindigkeit von $v = 7,57 \text{ m/s}$ zu

$$\eta = \frac{60 - \frac{7,57^2}{19,62}}{60} = 0,95$$

es werden also ca. 95 % der potentiellen und kinetischen Energie auf dem Weg zur Toskammer in Wärme und zu einem geringen Teil auch in Schall umgewandelt.

1.5.4 Toskammer

Es wird zunächst eine Toskammer in Anlehnung an die in [2] enthaltenen Angaben gestaltet. Die Höhenlage der Toskammer kann entsprechend der Rückstaubedingungen infolge des unterstrom folgenden Dükers angepasst werden. Die Durchmesser des Fallschachts und der weiterführenden Rohrleitung sind derzeit jeweils mit 0,80 m angesetzt. Die Toskammerabmessungen werden mit folgenden Ansätzen abgeschätzt

Toskammerhöhe $H_T = 2 \cdot 0,80 = 1,60 \text{ m}$,

Toskammerbreite $B_T = 1,1 \cdot 0,80 = 0,88 \approx 0,90 \text{ m}$,

aus Gründen der Arbeitssicherheit auf 1,00 m vergrößert,

Toskammerlänge $L_T = 4 \cdot 0,80 = 3,20 \text{ m}$.

Als Einbau in das Tosbecken wird zunächst ein quer angeordneter Balken vorgesehen. Die Abmessungen des Tosbeckens mit diesem Einbau und weiteren Ergänzungen, die aus den Modellversuchen resultieren, sind in Bild 4 enthalten.

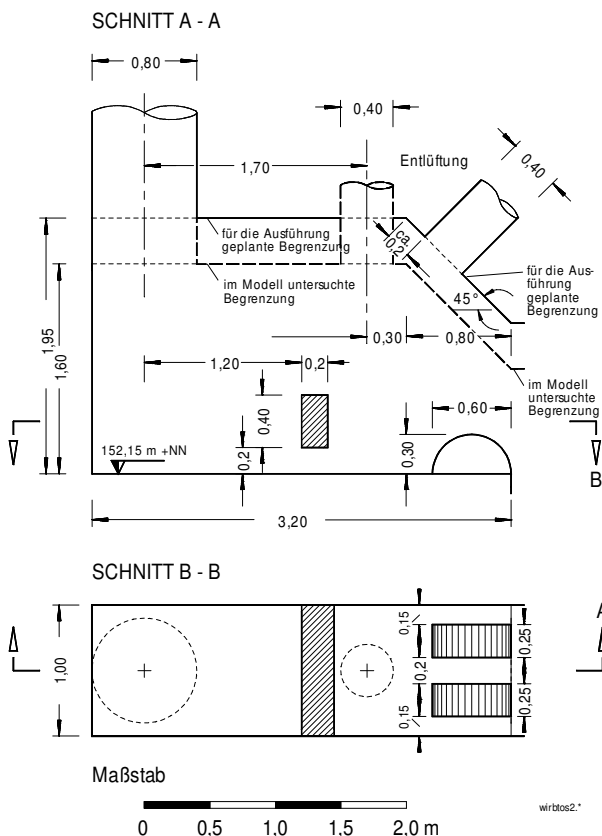


Bild 4: Toskammer am Fuß des Wirbelfallschachts

1.5.5 Luftbedarf und Entlüftungsquerschnitt

Der Luftdurchfluss wird als Produkt aus dem Beiwert β und dem Wasserabfluss Q ermittelt. Der Beiwert β errechnet sich nach [2] aus dem Bezugswert q_e

$$q_e = 0,018 \cdot \left(\frac{l_s}{d_{FS}} \right)^{1/3} = 0,018 \cdot \left(\frac{60}{0,80} \right)^{1/3} = 0,0759$$

und dem Relativedurchfluss

$$q_s = \frac{Q}{k_{St} \cdot \pi \cdot d_{FS}^{8/3}} = \frac{0,464}{90 \cdot 3,1416 \cdot 0,80^{8/3}} = 0,00298$$

mit dem Ansatz

$$\beta = \left(\frac{q_e}{q_s} \right)^{1/2} - 1 = \left(\frac{0,0759}{0,00298} \right)^{1/2} - 1 = 4,048.$$

Der Luftdurchfluss ergibt sich damit zu

$$Q_a = \beta \cdot Q = 4,048 \cdot 0,464 = 1,878 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Der maximale Luftbedarf, der sich bei einem maßgebenden Wasserdurchfluss von

$$Q_M = \frac{1}{2} \cdot q_e \cdot k_{St} \cdot \pi \cdot d_{FS}^{8/3} = \frac{1}{2} \cdot 0,0759 \cdot 90 \cdot 3,1416 \cdot 0,80^{2,6667} = 5,92 \text{ m}^3/\text{s}$$

einstellen könnte, läge bei

$$Q_{a,max} = 0,41 \cdot Q_M = 0,41 \cdot 5,92 = 2,43 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Ein derartiger Wasserzufluss zum Wirbelfallschacht wird von der Wiehltalbrücke allerdings nicht erwartet.

Der Entlüftungsquerschnitt A_L wird auf eine Luftgeschwindigkeit von 25 m/s bemessen. Damit ergibt sich

$$A_a = \frac{Q_a}{25} = \frac{1,878}{25} = 0,0751 \text{ m}^2.$$

Bei einem gewählten Durchmesser der Luftaustrittsöffnung von $d_a = 0,40 \text{ m}$ ergibt sich ein Entlüftungsquerschnitt von

$$A_a = 0,1257 \text{ m}^2.$$

Die Luftaustrittsgeschwindigkeit ergibt sich damit zu $14,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Eine Luftzirkulation, wie sie bei weniger hohen Fallschächten gestaltet wird, ist bei dem hier vorliegenden Höhenunterschied von ca. 60 m nicht realisierbar. Daher wird ein Luftstrom von rund $1,9 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ an der Einlaufspirale mit angesaugt und unten aus dem Tosbecken auch wieder ausgetragen. An der Einlaufspirale ist für den Luftzutritt ein entsprechend großer Querschnitt für den Lufteintritt freizuhalten.

2 Hydraulischer Modellversuch für den Wirbelfallschacht

2.1 Wahl des Modellmaßstabs

Der Modellmaßstab wird mit Blick auf möglichst geringe Verfälschungen der Ergebnisse in Bezug auf die Luftaufnahme (Oberflächenspannung) und das Reibungsverhalten (Rauheit, Zähigkeit und Turbulenz) möglichst groß angesetzt. Die ausreichend große Turbulenz sowohl in den Einlaufspiralen und im Ablauf der Toskammer sind wesentliche Vorbedingungen für eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Modell auf die Großausführung. Daher wird für den vorliegenden Fall ein Maßstab der Längen $1 : M_L$ von ca. $1 : 2$ bis $1 : 3$ angestrebt. Eine Randbedingung ergibt sich aus dem für den Fallschacht verwendeten Plexiglasrohr mit einem Innendurchmesser von 290 mm. Der Maßstabsfaktor der Länge errechnet sich unter Berücksichtigung des für die Großausführung gewählten Durchmessers von 0,80 m zu

$$M_l = \frac{d_{\text{Natur}}}{d_{\text{Modell}}} = \frac{800}{290} = 2,759.$$

Für die Fließvorgänge in den Zuläufen, in den Einlaufspiralen und im Tosbecken sind überwiegend Trägheits- und Schwerekräfte maßgebend. Deshalb ist für die Übertragung von Werten aus der Natur in das Modell und umgekehrt das FROUDEsche Ähnlichkeitsgesetz maßgebend. Daraus ergeben sich folgende Maßstabsfaktoren für die weiteren Größen [2]:

Maßstabsfaktor der Zeit	$M_t = M_l^{0,5} = 1,661$,
Maßstabsfaktor der Geschwindigkeiten	$M_v = M_l^{0,5} = 1,661$,
Maßstabsfaktor der Durchflüsse	$M_Q = M_l^{2,5} = 12,64$.

Die für die Bemessung maßgebenden Zuflüsse im Modell errechnen sich damit zu

- Zulauf aus dem westlichen Brückenabschnitt Einlaufspirale 1 $Q_1 = 22,55 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$,
- Zulauf aus dem östlichen Brückenabschnitt Einlaufspirale 2 $Q_2 = 14,16 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$,
- Gesamtzufluss zum Wirbelfallschacht $Q = 36,71 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

Alle Längen im Modell mit Ausnahme der Höhe des Fallschachts werden mit dem Maßstabsfaktor der Längen ($M_L = 2,759$) verkleinert. Eine Wiedergabe der Gesamthöhe des Wirbelfallschachts ist nicht erforderlich, weil sich bereits nach einer Tiefe von

$$z_L = 3 \cdot z_* = 3 \cdot 2,92 = 8,76 \text{ m (Naturmaß)}$$

die für das Tosbecken maßgebende Endgeschwindigkeit von

$$v = \sqrt{v_*^2 \cdot \tanh\left(\frac{l_s}{z_*}\right)} = \sqrt{7,57^2 \cdot \tanh\left(\frac{60}{2,92}\right)} = 7,57 \text{ m/s}$$

einstellt.

Die beiden zugehörigen Werte im Modell betragen

$$z_{L,M} = 8,76 / 2,759 = 3,18 \text{ m} \quad \text{und} \\ v_M = 7,57 / 1,661 = 4,56 \text{ m/s}.$$

Der Fallschacht ist im Modell mit einer Höhe von ca. 3,70 m nachgebildet. Damit ist die Höhe rund 20% größer als theoretisch erforderlich.

2.2 Gestaltung des Modells

Für die Gestaltung der Einlaufspiralen wurde mit Blick auf die Verarbeitbarkeit, die Betriebssicherheit und die Korrosionsbeständigkeit Edelstahlblech mit einer Dicke von 1,5 mm verwendet. Soweit für die Großausführung größere Wanddicken mit Blick auf einen dort möglicherweise eingesetzten Kunststoff zu erwarten waren, wurden doppelte Wandungen ausgeführt. Die Wandhöhe beträgt im Modell 0,50 m, was einem Naturmaß von 1,38 m entspricht. Durch Einbauten, deren Form mit Hilfe der Modellversuche fest zu legen war, sollte die Wandhöhe der Naturausführung gegenüber diesem Maß vermindert werden.

Die Abmessungen der Übergänge und der Radien der Einlaufspiralen entsprechen exakt den Werten, die in der Vorbemessung ausgewiesen und dort in Bild 3 dargestellt sind. Die für die Großausführung mit 0,03 m dargestellte Dicke der Trennwände zwischen den Einlaufspiralen 1 und 2 wurde im Modell (entsprechend verkleinert) durch eine doppelwandige Ausführung der Stahlblechkonstruktion berücksichtigt.

Das Fallrohr besteht aus Plexiglas, um die spiralförmige Strömung, die eine über den Fließweg zunehmende Steigung aufweist, auf der gesamten Höhe beobachten zu können.

Die Toskammer besteht aus Edelstahlblech mit den Längswänden aus Plexiglas, um die Energieumwandlung beobachten zu können. Die Einbauten wurden überwiegend aus Edelstahl hergestellt.

Der Wasserkreislauf wird über zwei Tauchpumpen gespeist. Die Anströmung der beiden Einlaufspiralen wird unabhängig geregelt. In den Druckleitungen ist jeweils ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser mit einer Messabweichung $< 1\%$ angeordnet.

2.3 Zuflussgeschwindigkeiten im Modell

2.3.1 Anströmung der Einlaufspiralen

Die in der hydraulischen Vorbemessung errechneten Anströmgeschwindigkeiten basieren auf einer Betriebsrauheit von $k_b = 0,25$ mm. Allerdings kann nach der Neuinstallation für den letzten Rohrabschnitt auch eine niedrigere Rauheit auftreten, die in der Einlaufspirale zu ungünstigeren Fließverhältnissen führen würde. Ferner ist für den steil verlaufenden Rohrabschnitt nur eine grobe Abschätzung der Verlusthöhe möglich. Daher wird für das Modell an dieser Stelle eine etwas erhöhte Anströmgeschwindigkeit untersucht, um auch für den vorgenannten Fall das Wasser über die Einlaufspirale sicher abführen zu können. Eine um 5 % bis 10 % erhöhte Anströmgeschwindigkeit erscheint hier angemessen, um eine betriebssichere Gestaltung der Einlaufspiralen zu gewährleisten. Diese Anforderung wird im weiteren Modellbetrieb eingehalten.

2.3.2 Anströmung der Toskammer

Die in der hydraulischen Berechnung ausgewiesene Endgeschwindigkeit muss unter Berücksichtigung des Modellmaßstabs wenigstens erreicht werden, um die Energieumwandlung in der Toskammer zutreffend abzubilden. Die Endgeschwindigkeit im Fallrohr beträgt

$$v = 7,57 \text{ m/s bzw. im Modell } v_M = \frac{7,57}{\sqrt{2,759}} = 4,56 \text{ m/s.}$$

Ein in den an der Fallrohrwandung fließenden Strahl eingebrachtes Staurohr muss wenigstens eine piezometrische Druckhöhe von

$$\frac{v_M^2}{2 \cdot g} = 1,06 \text{ m}$$

anzeigen. Allerdings ist auch hier zu berücksichtigen, dass die Fallrohrwandung glatter sein kann, als dies mit dem in der hydraulischen Berechnung angesetzten Rauheitsbeiwert nach Strickler von $k_{St} = 90 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$ ermittelt wird. Am Modell treten Höhen zwischen 1,20 m und 1,40 m auf, im Mittel 1,30 m. Die glatte Plexiglaswandung des Modells führt somit zu einer Geschwindigkeit von

$$v_M = \sqrt{2 \cdot g \cdot 1,30} = 5,05 \text{ m/s}.$$

Sie ist somit auch rund 10% höher als die erforderliche Modellgeschwindigkeit von 4,56 m/s. Damit werden die in der Toskammer zu erwartenden Fließverhältnisse und die damit zusammenhängende Energieumwandlung mit einer ausreichenden Sicherheit simuliert.

2.4 Veränderung des Lufttransports im Modell

Eine maßstäbliche Übertragung des Lufttransports ist mit Blick auf die hier maßgebende FROUDEsche Ähnlichkeit nicht unmittelbar möglich. Dieser Vorgang wird mit von der Turbulenz, der Zähigkeit und der Oberflächenspannung beeinflusst. Eine zutreffende Wiedergabe der hierzu gehörenden Auswirkungen wäre nur in einem Modell im Maßstab 1:1 gegeben. Eine derartige Modellgestaltung scheitert an der Wirtschaftlichkeit. Aus diesem Grund wird der Lufteintrag aus der Vorbemessung für die Ausführungsplanung herangezogen.

3 Ergebnisse des Modellversuchs

3.1 Fließverhältnisse und Einbauten im Bereich der Einlaufspiralen (Drallkammer)

Aufgrund der schießenden Anströmung wird ein Überströmen der im Modell 0,50m hohen Seitenwände (1,38 m in der Natur) ab folgenden Zuflüssen festgestellt:

Einlaufspirale 1: ab etwa 16 ‰ (entsprechend 202 ‰ in der Natur);

Einlaufspirale 2: ab etwa 12 ‰ (entsprechend 151 ‰ in der Natur).

Die Werte unterschreiten deutlich die auf das Modell umgerechneten Bemessungswerte von 22,55 ‰ bzw. 14,16 ‰. Als Lösung bieten sich zwei Varianten an:

- ⇒ Variante 1: Es werden Strahlführungen so an den Außenwänden der Einlaufspiralen angeordnet, dass eine Ausuferung vermieden wird.
- ⇒ Variante 2: Die Sohlen der Einlaufspiralen werden mit einem steilen Gefälle versehen und die Breiten kontinuierlich vermindert.

Variante 2 führt zu einem deutlich höheren baulichen Aufwand. Daher wird angestrebt, das Ausuferen unter Beibehaltung einer guten Anströmung des Fallschachts mit Hilfe von Leiteinrichtungen zu verhindern.

Verschiedene Formgebungen der Strahlführungen werden untersucht. Die Experimente führen zu einer Abwinklung, die auf die äußeren Seitenwände der Einlaufspiralen gesetzt werden. Bild 5 zeigt den Blick in die Einlaufspirale 1 (von oben), den an der Außenwand ansteigenden Wasserspiegel sowie die Wirkung der Strahlführung für den Bemessungsdurchfluss.



Bild 5: Blick in Einlaufspirale 1 (oberer Teil) und Einlaufspirale 2 (unterer Teil) mit Strahlführungen

In der Einlaufspirale 1 ist zur Verbesserung der Anströmung des Fallschachts noch ein Strahlteiler vorgesehen, dessen Form und Anordnung aus verschiedenen Experimenten hervorgeht. Die endgültigen Maße sind in Anlage 2 enthalten.

Ferner wird beobachtet, dass der Übergang von der horizontalen Sohle der Einlaufspiralen in den vertikalen Fallschacht mit leichten Strahlablösungen verbunden ist. Ein Brechen der Kante am Fallschachteintritt unter 45° führt hier zur Abhilfe.

3.2 Untersuchungen am Fallschacht

Die Fließverhältnisse im Fallschacht stellen sich in der erwarteten Weise ein. Einzelne Wasserspritzer, die sich unmittelbar am Eintrittsquerschnitt vom Eintrittsstrahl lösen, treten wenig später ohne erkennbare Störungen des übrigen Fließvorgangs in den an der Schachtwand geführten Fließquerschnitt ein. Die Sicht auf den Strömungsverlauf im Plexiglasfallschacht macht deutlich, dass die Vertikalkomponente der Fließgeschwindigkeit über den Fließweg zunächst deutlich zunimmt. Auf dem letzten Stück von etwa 0,50 m Länge ist keine Änderung der Fließrichtung mehr erkennbar. Damit hat die Fließgeschwindigkeit nach einem Fallweg von etwa 3,20 m im Modell ihr Maximum erreicht. Dies entspricht einem Naturmaß von rund 8,80 m. Dieser Wert stimmt erstaunlich gut mit dem in der Vorbemessung rechnerisch ermittelten Wert von 8,76 m überein.

Eine in der Diskussion mit dem Planer erörterte Frage ist die an einer Rohrverbindung des Fallschachts zulässige Größe des Versatzes der Rohrwand. Die üblichen Durchmessertoleranzen der Rohrhersteller könnten hier zu einer Ablösung der Strömung von der Fallschachtwand führen.

Erste Versuche mit einem 2 mm in den Schachtquerschnitt ragenden Ring zeigen, dass insbesondere bei kleinen Abflüssen eine so weitgehende Ablösung erfolgt, dass sich der frei fallende Strahl nicht mehr an die Fallschachtwand anschmiegt.



Bild 6: Blick in den Fallschacht; Wirkung der 2 mm vorstehende Kante im Fallschacht bei 20 % des Bemessungszuflusses

Weitere Versuche mit einer Auskragung von 1 mm führen zu akzeptablen Fließverhältnissen für den gesamten Durchflussbereich. Der zunächst abgelöste Strahl legt sich auch bei kleinen Abflüssen wieder an die Schachtwand an. Bei größeren Abflüssen treten nur Ablösungen über kurze Strecken auf. Für den Bemessungsabfluss sind kaum Veränderungen erkennbar. Bei der Übertragung dieses Ergebnisses erscheint es nicht zweckmäßig, eine Übertragung des ermittelten Wertes auf die Natur mit dem Modellmaßstabsfaktor vorzunehmen. Die Ablösung eines relativ dünnen Wasserstrahls wird nicht nur von Trägheit und Schwere sondern auch von der Zähigkeit und der Oberflächenspannung des Wassers beeinflusst. Will man die hier maßgebenden Kräfte insgesamt dynamisch ähnlich nachbilden, führt dies zu einem Modellmaßstab für diesen Teil der Modellversuche von 1 : 1. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, den maximal zulässigen Versatz innerhalb der Fallschachtwand auf 1 mm zu begrenzen.

Ferner zeigen Versuche mit einer 2 mm tiefen und 2 mm hohen ringförmigen Nut in der Fallschachtwand keine erkennbaren Auswirkungen auf das Fließverhalten. Für die Großausführung lässt sich daraus ableiten, dass Stoßfugen bis zu einer Weite von ca. 5 mm toleriert werden können.

3.3 Fließverhältnisse in der Toskammer

Die Toskammer hat die Aufgabe, die mit einer Geschwindigkeit von über 7 m/s verbundene kinetische Energie weitgehend in Schall und Wärme umzuwandeln und eine Strömungsumlenkung von 90° zu bewirken. Es wird deshalb empfohlen, die Sohle der Toskammer im Strahlaufprallbereich mit einer Edelstahlauskleidung zu versehen.

Die Höhe der Toskammersohle ergibt sich aus einer Reihe von Versuchen, die eine möglichst effektive Beruhigung und eine weitgehende Verminderung der Luftkonzentra-

tion des Wassers zum Ziel haben. Andererseits müssen ein Wasseraustritt aus der Entlüftung und ein Zuschlagen des Querschnitts am Düker oberhalb sicher vermieden werden. Experimente mit verschiedenen Sohlhöhen der Toskammer führen zu einer unterschiedlich guten Luftaustrag. Bild 7 zeigt den Bemessungsdurchfluss für die gewählte Sohlenhöhe von 152,15 m +NN.



Bild 7: Fließverhältnisse in der Toskammer bei einer Sohlenhöhe von 252,15 m +NN, deutlicher Rückstau bei Bemessungsdurchfluss zur Förderung des Luftaustrags

Der Rückstau und die damit verbundene Begünstigung des Luftaustrags sind klar erkennbar. Ein 0,20 m über der Sohle quer angeordneter Balken fördert bei größeren Wasserführungen die Beruhigung. Die Entlüftung des Wassers wird hierdurch zusätzlich begünstigt.

Am Ende des Tosbeckens bewirken zwei halbzyklindrische Staukörper einen Rückstau insbesondere bei kleinen Abflüssen. Der anschließende Düker führt in diesen Fällen zu keinem Rückstau in die Toskammer. Der Querbalken wird dann unterströmt und somit unwirksam. Die Wirkung der halbzyklindrischen Staukörper wird in Bild 8 für 50 % des Bemessungsdurchflusses deutlich.



Bild 8: Toskammer wie in Bild 8 bei 50 % des Bemessungsdurchflusses

4 Zusammenfassung / Ausblick

Die durch die Vorbemessung festgelegten Abmessungen für den Wirbelfallschacht an der Wiehltalbrücke wurden durch die Modellversuche im Maßstab von 1:2,76 bestätigt. Einbauten zur Strahlführung und Strahlteilung erlauben nun eine Beschränkung der Wandhöhe im Bereich der Einlaufspiralen auf 1,10 m.

Das relativ groß ausgeführte Modell erlaubt eine eingehende Betrachtung der Fließverhältnisse in den Einlaufspiralen, im oberen Teil des Fallschachts und im Tosbecken. Die untersuchte Höhe des Fallschachts beschränkte sich aber auf den Abschnitt, der zur Erreichung der Endgeschwindigkeit führt.

Untersuchungen an vorspringenden Kanten im Fallschacht zeigten, dass an Rohrstößen der Versatz auf ein Maximum von 1 mm zu beschränken ist und Spaltweiten in den Muffen bis zu 5 mm toleriert werden können.

Die Toskammer dient neben der weitgehenden Umwandlung der noch vorhandenen kinetischen Energie dem Austrag der durch den Fallschacht mitgerissenen Luft. Durch die Anordnung von geeigneten Staukörpern wird der Luftaustrag auch schon bei kleinen Durchflüssen gewährleistet.

Die Ergebnisse aus den labortechnischen Modellversuchen dienten als Grundlage für die weitere Planung. Da die Muffenspalte eine Tiefe von 5 mm und der Rohrversatz durch Muffenspiel bzw. Maßtoleranzen 1 mm nicht überschreiten darf, wurden Kunststoffe als Material für den Fallschacht ausgeschlossen, da diese nicht die geforderten Maßtoleranzen erwarten lassen. Es wurde entschieden, den Fallschacht und die Drallkammer aus Edelstahl zu fertigen und mittels Flanschverschraubung zu verbinden. Es ist vorgesehen, die Falleitung und die Drallkammer auf entsprechenden Konsolen direkt an dem Brückenpfeiler aufzuhängen. Die Drallkammer nebst Fallschacht und Aufhängung befindet sich zur Zeit in der Ausschreibungsphase und soll im Jahr 2010 erstellt werden.

Die Toskammer wurde als Stahlbetonfertigteile mit einer Wandauskleidung aus Polyethylen-Betonschutzplatten zum Schutz vor Beschädigung der Betonoberfläche geplant. Die labortechnisch entwickelten Staukörper sollen in Edelstahl gefertigt und nachträglich auf der Sohle montiert werden. Dieses Bauwerk wurde mittlerweile in monolithischer Bauweise gefertigt und vor Ort montiert.

Es ist zu erwarten, dass sich durch weitere Modellversuche und Variation der Zuflussgröße, der Fließgeschwindigkeit und des zuführenden Rohrleitungsdurchmessers allgemeine Bemessungs- und Planungsparameter ermitteln und systematisieren lassen, so dass für vergleichbare Entwässerungsfälle zukünftig auf modelltechnische Untersuchungen verzichtet werden kann.

Literatur

- [1] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2007): Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Sonderbauwerken in Abwasserleitungen. Arbeitsblatt 112, DWA, Hennef
- [2] Hager W. H. (1995): Abwasserhydraulik – Theorie und Praxis - , Berlin Heidelberg New York , Springer Verlag
- [3] Heinemann E., Feldhaus R. (2003): Hydraulik für Bauingenieure. Wiesbaden, 2. Aufl., B. G. Teubner Verlag
- [4] Kellenberger M. H. (1988): Wirbelfallschächte in der Kanalisationstechnik, Mitt. VAW ETH Zürich, 98
- [5] Kellenberger M.; Volkart P. (1987): Der Wirbelfallschacht in Kanalisationsnetzen. Schweizer Ingenieur und Architekt, 104 (16), ETH Zürich, 364 – 371
- [6] Kleinschroth A. (1972): Strömungsvorgänge im Wirbelfallschacht, Mitt. Inst. für Hydraulik und Gewässerkunde TU München, 8
- [7] Lehmann, M.; Volkart, P. (1991): Wirbelfallschächte zur Brückenentwässerung. Wasser, Energie, Luft / eau, énergie, air, 83, 38/4, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Baden, 73 – 76
- [8] Merlein J., Kleinschroth A., Valentin F. (2002): Systematisierung von Absturzbauwerken, Hydraulik und Gewässerkunde TU München, 69
- [9] Motzet K., Valentin F. (2002): Efficiency of a Vortex Chamber with Horizontal Bottom under Supercritical Flow, 9th International Conference on Urban Drainage, Portland Oregon, USA
- [10] Volkart P. (1984): Vereinigungs- und Wirbelfallschacht kombiniert. Schweizer Ingenieur und Architekt, 102 (11), ETH Zürich, 190 – 195