

Hydraulische Auslegung eines Trennbauwerks mit schießender Anströmung

Starkniederschläge führen vermehrt in urbanen Regionen zu gravierenden Hochwasserschäden. Trennbauwerke, die einen Großteil des Abflusses über eine Entlastungsleitung ableiten, können gerade in dicht besiedelten Gebieten eine Lösung darstellen. Eine schießende Anströmung, komplexe dreidimensionale Strömungszustände im Einlaufbereich sowie die Berücksichtigung der Verluste und potenzielle Verlegung der Rechenanlage durch Treibgut erfordern für das beschriebene Projekt physikalische Modellversuche zur Bestimmung des Abführungsvermögens.

Mario Axler, Matthias Franke, Ekkehard Heinemann, Christian Jokiel und Roman Martzinek

1 Projektbeschreibung

In den vergangenen Jahren haben Starkregenereignisse und daraus resultierende Hochwasserabflüsse im Mehlemer Bach sowohl in Bonn-Mehlem als auch auf dem Gebiet der Gemeinde Wachtberg zu teilweise gravierenden Schäden geführt. Hier sind insbesondere sowohl ein Unwetter am 3. Juli 2010, bei dem in der Spitze $54,1 \text{ m}^3/\text{s}$ in Bonn Mehlem abflossen, als auch ein vergleichbares Ereignis 3 Jahre später am 20. Juni 2013 mit großflächigen Überflutungs- und auch Erosionsschäden zu nennen. Die Ursache lag in Extremniederschlägen in der Gemeinde Wachtberg (03.06.2010: 130 mm in 2 h), welche das bis dato maximal gemessene Niederschlagsereignis (93 mm in 2 h) weit überschritten.

Diese beiden Extremereignisse innerhalb von 3 Jahren führten dazu, dass das Tiefbauamt der Stadt Bonn und die Gemeinde Wachtberg eine Hochwasserpartnerschaft vereinbarten. Ziel dieser Partnerschaft war es, den Hochwasserschutz im Einzugsgebiet des Mehlemer Baches zu verbessern und so die Anlieger künftig besser vor Überflutungen zu schützen.

Der Mehlemer Bach hat eine Einzugsgebietsfläche von $18,3 \text{ km}^2$ und erstreckt sich von Werthoven und Oedingen im Süd-Osten bis zur Gemeinde Bonn-Mehlem, wo er in den Rhein fließt. Er ist durch einen sehr naturnahen Oberlauf sowie einen stark urban geprägten Unterlauf gekennzeichnet.

Innerhalb einer Studie zur Verbesserung der Hochwassersituation wurde ein Schutzkonzept entwickelt, welches die Anlieger zukünftig besser vor solchen Extremereignissen schützt.

Kompakt

- Die im Mehlemer Bach in Bonn aufgetretenen Hochwasserabflüsse erfordern eine Entlastungsleitung zur Vermeidung zukünftiger Überflutungsschäden.
- Die besondere Formgebung des schießend angeströmten Trennbauwerks einschließlich Rechen wird mit Hilfe physikalischer Modellversuche entwickelt.

zen soll. Das erarbeitete Schutzkonzept sieht ein Trennbauwerk am Mehlemer Bach auf Höhe der Bachemer Straße vor. Vom Mehlemer Bach abgeschlagenes Wasser wird über eine Entlastungsleitung mit einer Länge von $1\,066 \text{ m}$ direkt dem Rhein zugeführt (**Bild 1**). Die Entlastungsleitung ist für eine Leistungsfähigkeit von $39 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt und wird, abgesehen von einem 305 m langen offen Bauabschnitt im Drachensteinpark, im Rohrvortrieb erstellt. Der Abfluss ins Unterwasser des Mehlemer Baches wird durch den Durchlass an der Bachemer Straße auf $15 \text{ m}^3/\text{s}$ begrenzt, um zukünftig Hochwasserschäden unterhalb des Durchlasses zu vermeiden. Mit diesem Konzept sollen zukünftig die Anlieger bis zu einem Abfluss von ca. $53 \text{ m}^3/\text{s}$ (entspricht einem $HQ_{1\,000}$) vor Hochwasser geschützt werden.

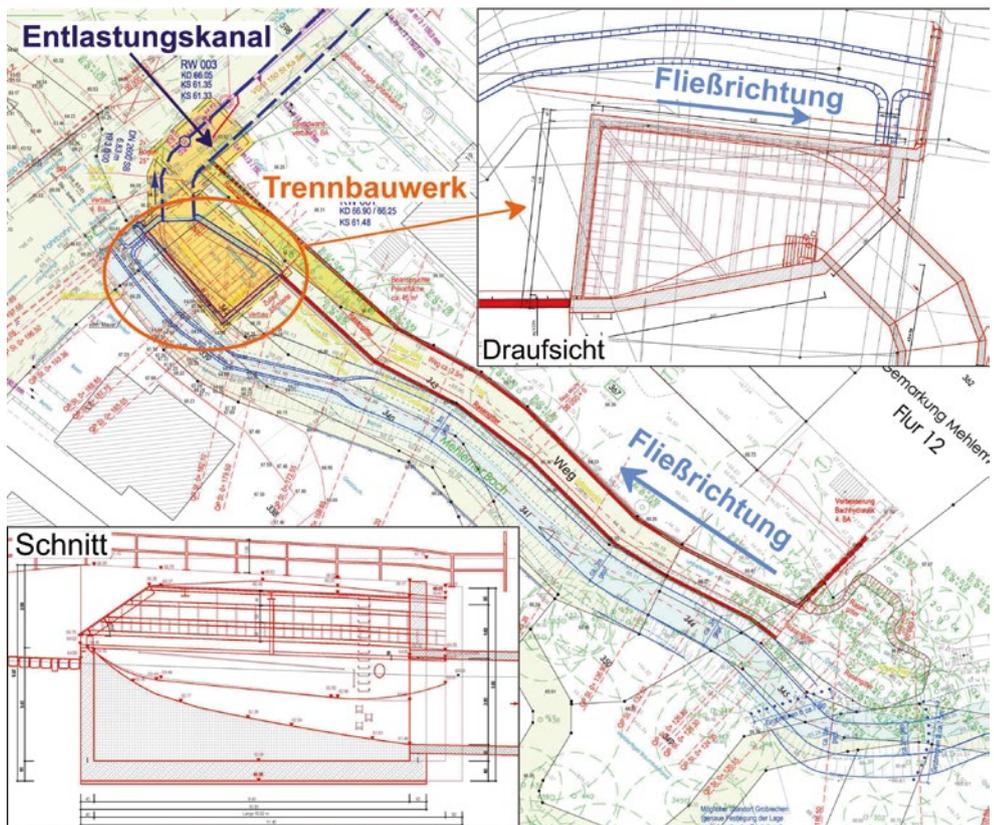
2 Bauwerksplanungen

Die Bauwerksplanung, erstellt durch das Planungsbüro Schumacher, Wiehl, in Zusammenarbeit mit der Hydrotec Ingenieurgesellschaft mbH, Aachen, beruht auf hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Voruntersuchungen. Neben der konstruktiven Auslegung und statischen Berechnung des Trennbauwerkes einschließlich der geplanten Rechenanlage beinhaltet dies die Durchführung der erforderlichen hydraulischen Nachweise zur Überprüfung und Optimierung der Leistungsfähigkeit. Hierzu gehört u. a.:

- 1-D-Strömungssimulation des Gewässers im Zulauf zum Trennbauwerk,
- 1-D-Kanalnetzrechnung der Entlastungsleitung,
- 2-D-Simulation zur Optimierung des Trennbauwerkes.

Der sich daraus ergebene Grundentwurf der Anlage ist in **Bild 1** mit den wesentlichen Größen dargestellt. Die wesentlichen Abmessungen und Größen:

- Bauwerk:
L = $10,90 \text{ m}$, B = $6,80 \text{ m}$, Schwellenhöhe = $64,50 \text{ bis } 64,10 \text{ m ü. NHN}$
- Entlastungsleitung:
Durchmesser D = $2,60 \text{ bis } 3,00 \text{ m}$, L = $1\,066 \text{ m}$



© Stadt Bonn und Ing.-Büro Schumacher

Bild 1: Projektübersicht (oben) sowie ursprüngliche Detailplanung des Trennbauwerkes

- Rechen:
 - Unten: Stababstand = 25 cm, Neigung = ca. 35°
 - Mitte: Stababstand = 50 bis 200 cm, Neigung = 35°
 - Oben: Stababstand = 50 cm, Neigung = 0°
bzw. parallel zur Überfallkante
- Hydrologie/Hydraulik:
 - $HQ_{1\,000;Zu,179,5} = 52,97 \text{ m}^3/\text{s}; WSP_{HQ_{1\,000;179,5}} = 65,34 \text{ m ü. NHN}$
 - $HQ_{100;Zu,179,5} = 27,61 \text{ m}^3/\text{s}; WSP_{HQ_{100;179,5}} = 64,95 \text{ m ü. NHN}$
 - $Q_{1\,000,Ent} = 37,97 \text{ m}^3/\text{s} (HQ_{1\,000;Zu} - Q_{max,UW})$
 - $Q_{100,Ent} = 12,61 \text{ m}^3/\text{s} (HQ_{1\,000;Zu} - Q_{max,UW})$
 - $Q_{max,UW} = 15 \text{ m}^3/\text{s} (\text{max. Drosselabfluss})$

Das Trennbauwerk weist eine Länge $L = 10,90 \text{ m}$ und Breite $B = 6,80 \text{ m}$ auf, wobei die horizontale Überfallschwelle der Stirnseite auf Kote $64,50 \text{ m ü. NHN}$ liegt. Die Schwelle der Streichseite fällt in Fließrichtung von $64,50 \text{ m ü. NHN}$ auf Kote $64,10 \text{ m ü. NHN}$ ab. Die Entlastungsleitung hat einen Durchmesser von $D = 2,60 \text{ m}$; der Kreisquerschnitt mündet übergangslos scharfkantig in das Trennbauwerk.

Ein räumlicher Rechen, der das gesamte Einlaufbauwerk überdeckt, soll einerseits sperriges Treibgut von der Rohrleitung fernhalten und somit ein Verstopfen der Entlastungsleitung vermeiden. Andererseits darf die hydraulische Leistungsfähigkeit durch die Rechenverluste nicht übermäßig beeinträchtigt werden. Daher beträgt zunächst der geplante Stababstand direkt oberhalb der Überfallschwelle 25 cm und im oberen Bereich 50 cm bis zu 200 cm . Die Rechenneigung liegt im unteren und mittleren Bereich bei 35° , im oberen Bereich wird der Winkel auf 0° abgeflacht, so dass Treibgut aufgeschoben werden kann. Weiterhin fällt der obere Bereich zum Einlauf hin parallel zur Streichwehrseite ab.

Eine Tauchwand am Durchlass an der Bachemer Straße ermöglicht die Drosselung des Abflusses auf $Q_{max,UW} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ zur Sicherstellung des Hochwasserschutzes im Unterwasser. Dementsprechend ergeben sich für die beiden Bemessungsabflüsse $HQ_{1\,000,Zu} = 52,97 \text{ m}^3/\text{s}$ und $HQ_{100,Zu} = 27,61 \text{ m}^3/\text{s}$ eine erforderliche Leistungsfähigkeit von $Q_{1\,000,Ent} = 37,97 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $Q_{100,Ent} = 12,61 \text{ m}^3/\text{s}$ für die Entlastungsleitung.

Die 2-D-Berechnungen ergeben im direkten Zulauf zum Trennbauwerk (Profil 179,50) eine Wasserspiegellage von ca. $64,34 \text{ m ü. NHN} (HQ_{1\,000})$. Die Zuströmung zur gesamten Anlage erfolgt schießend. Die Anströmgeschwindigkeit zur Stirnseite des Bauwerkes liegt bei etwa $v_{max} \approx 5 \text{ m/s}$. Das Schluckvermögen der Entlastungsleitung ist danach ausreichend, wobei sich im Einlaufbereich durchgehend ein Freispiegelabfluss einstellt.

Aufgrund der dreidimensionalen, hochturbulenten Strömungsverhältnisse im Trennbauwerk sowie der schießenden Anströmung des Rechens und der Drossel erschien der Stadt Bonn eine weitergehende Überprüfung der hydraulischen Auslegung des Bauwerkes mittels physikalischer Modellversuche erforderlich und beauftragte damit die Technische Hochschule Köln.

3 Modellplanung

Mit dem Bau des Modells und der Durchführung der physikalischen Modellversuche wurde das Labor für Wasser und Umwelt (LWU) der Technischen Hochschule Köln (TH Köln) von der Stadt Bonn beauftragt.

Ausgehend von den bereits durchgeführten Planungen und 2-D-Berechnungen wurde für das gesamte Modell mit dem Teil-

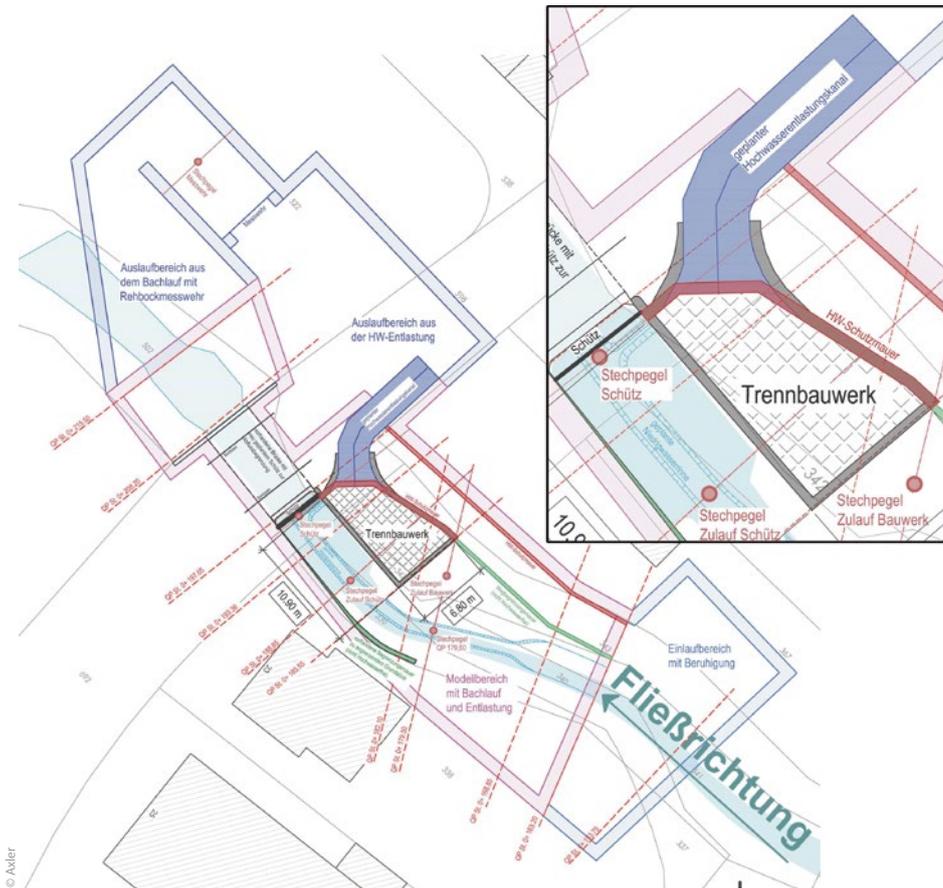


Bild 2: Grundriss des hydraulischen Modells, Übersicht und Detailausschnitt

abschnitt des Mehlemer Baches, dem Trennbauwerk sowie der sich anschließenden Entlastungsleitung von einem Freispiegelabfluss ausgegangen. In einem solchen Fall überwiegen die Trägheits- und Schwerkkräfte, so dass das Froudesche-Modellgesetz Anwendung findet. Aus dem unter Berücksichtigung des Rechens gewählten Längenmaßstab $ML = 1 : 10$ ergeben sich die zu betrachtenden Durchflüsse zu:

$$\begin{aligned} HQ_{100, \text{Natur}} &= 27,607 \text{ m}^3/\text{s}; & HQ_{100, \text{Modell}} &= 87,3 \text{ l/s} \\ HQ_{1000, \text{Natur}} &= 52,973 \text{ m}^3/\text{s}; & HQ_{1000, \text{Modell}} &= 167,5 \text{ l/s} \end{aligned}$$

Der für das Modell verfügbare Volumenstrom aus zwei Pumpen mit insgesamt 185 l/s gewährleistet gut ausreichende Durchflüsse.

In **Bild 2** ist der Grundriss des Modells mit einem Modellausschnitt gegeben. Im Oberwasser ist eine Zulaufstrecke von ca. 16 m oberhalb des Entlastungsbauwerkes als Modellgrenze vorgesehen (Querprofil 163,20). Im Unterwasser deckt das Modell unterhalb der Drossel noch eine Strecke von ca. 8 m ab (Querprofil 215,50). Die seitlichen Begrenzungen ergeben sich aus den neu geplanten Hochwasserschutzmauern an beiden Ufern des Gewässers sowie auf der Bachemer Brücke, welche die direkt dahinterliegenden Grundstücke sowie die anschließende Ortslage Bonn-Mehlem schützen soll.

Für das Modell wurde im Zulaufbereich ein ca. 2,5 m³ großes Beruhigungsbecken gestaltet und die beiden Zuläufe mit gelochten Rohren versehen, um dort die Geschwindigkeitsverteilung mit Hilfe von Einbauten möglichst naturnah anzustreben und eine Naturähnlichkeit zwischen den Querprofilen 179,50 und 208,10 zu erreichen.

Der Zufluss wurde mit zwei magnetisch-induktiven Durchflussmessern und der im Mehlemer Bach verbleibende Abfluss unter der Drossel mittels eines scharfkantigen Rechteckwehres bestimmt. Die Wasserstandsmessung erfolgte mit Stechpegeln und Ultraschallsensoren. Weiterhin wurden nach Umbau des Modells Druckmessungen an 2 Querschnitten der Entlastungsleitung vorgenommen. Aufgrund der hochturbulenten Fließzustände sowie der starken Wellenbildung lag die Messgenauigkeit der Wasserstände bei ca. 0,5 bis 1,0 cm (d. h. 5 bis 10 cm in Natur).

4 Modellversuche

4.1 Modelluntersuchungen ohne Rechen

Messergebnisse für die ursprüngliche Planung

Die Modellversuche ohne Rechen dienten der Überprüfung der bei der Modellkonzeption getroffenen Annahmen, wie beispielsweise dem Abfluss mit freier Oberfläche im gesamten Bereich und um erste Erkenntnisse über die Abflussaufteilung zu erhalten. Dabei sollte ein maximaler Abflussanteil von 15 m³/s im Mehlemer Bach verbleiben und der übrige Zufluss in der Hochwasserentlastungsleitung abgeführt werden. Ferner war die Rauheit des Gerinnebettes durch Kalibrierung festzulegen.

Um die Anströmung des Bauwerkes hinreichend genau nachzubilden, wurde die Zuführung des Wassers in das oberwasserseitige Bachbett durch Leitelemente optimiert und die Rauheit



Bild 3: Anströmung des Trennbauwerks bei einem Zufluss von ca. 31 m³/s mit Blick gegen die Fließrichtung

durch aufgeklebte Steine soweit erhöht, dass die Wasserstände am Eintritt in das Trennbauwerk den Werten aus dem 2-D-Modell entsprachen. Diese Vorgehensweise ist erforderlich, da in dem nachgebildeten Bereich sonst keine mit Abflüssen verknüpften Wasserstände bekannt sind. Mit den aufgeklebten Steinen wurde gleichzeitig die Turbulenz für den Fließvorgang im Modell erhöht, was bei Froudeschen Modellen grundsätzlich anzustreben ist. Als wesentliche Ergebnisse der Versuche ohne Rechen sind zu nennen:

- Bereits ab einem Zufluss von rund 32 m³/s schlägt der Einlaufquerschnitt der Hochwasserentlastungsleitung zu. Damit ist dort kein Freispiegelabfluss mehr gegeben.

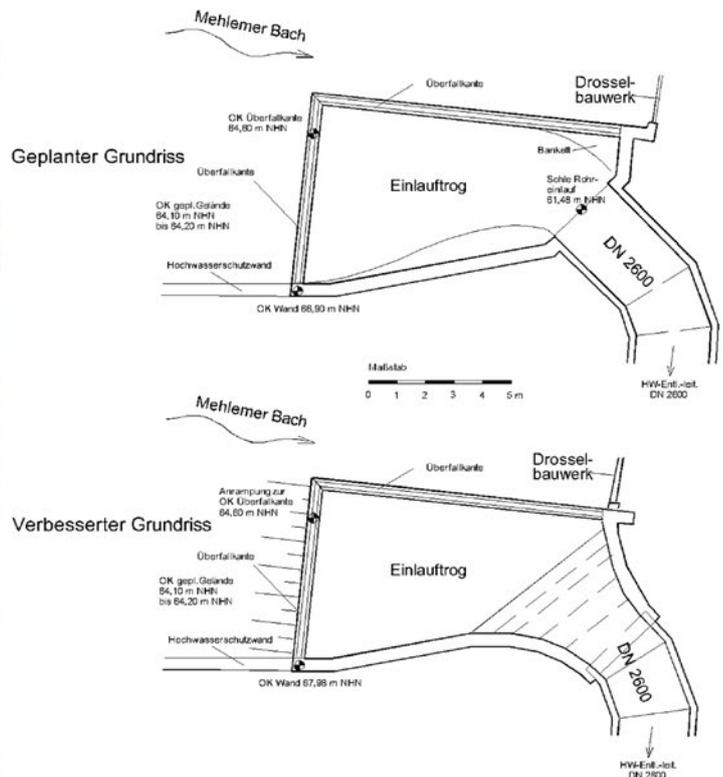
- Bei einem Zufluss von ca. 44 m³/s steigt das Oberwasser so stark an, dass die im Bereich der Drossel den Mehlemer Bach querende Straßenbrücke überströmt wird. In die Entlastungsleitung fließen dabei ca. 28 m³/s statt der angestrebten 38 m³/s.
- Aufgrund der geringen Überdeckung des Eintrittsquerschnitts der Hochwasserentlastungsleitung treten Luft eintragende Wirbel auf.
- Der im Mehlemer Bach verbleibende Durchfluss übersteigt das angestrebte Maximum von 15 m³/s schon bei Zuflüssen deutlich unterhalb des für die Planung maßgebenden HQ₁₀₀₀.
- Die vertikale Stirnseite der quer angeströmten Überfallschwelle führt zu einem steil ansteigenden Strahl in diesem Bereich (**Bild 3**).
- Bei einem Zufluss von ca. 50 m³/s bildet sich der durch den Aufstau bedingte Wechselsprung schon deutlich oberwasserseitig des Trennbauwerks aus.

Eine rechnerische Überprüfung mit den im Oberwasser vorhandenen Energiehöhen zeigte, dass die im Modell auftretenden Fließzustände der Großausführung entsprechen. Die Ergebnisse führten zu folgenden Änderungen:

- Das Bauwerk wurde an der stirnseitigen Einlaufschwelle durch eine Anrampung so umgestaltet, dass der dort beobachtete Fließvorgang ähnlich dem an einer Sprungschanze vermieden wird.
- Der Einlaufbereich der Entlastungsleitung wurde mit möglichst großem Krümmungsradius trompetenartig ausgebildet. Dabei wird angestrebt, die Strömungsumlenkung schon im Bereich mit weniger hohen Fließgeschwindigkeiten zu bewirken und gleichzeitig die Bildung von Einlaufwirbeln zu vermindern.



Bild 4: Ursprünglich geplanter und verbesserter Grundriss des Einlaufbauwerks



Allerdings wurde erwartet, dass trotz der Umgestaltung ein etwas höherer Oberwasserstand als ursprünglich geplant für die Abführung von $38 \text{ m}^3/\text{s}$ durch die Entlastungsrohrleitung erforderlich wird.

Umgestaltung des Bauwerks und des Modells

Aufgrund des während der Modellversuche schon vorhandenen Baufortschritts herrschte für die Umplanung extremer Zeitdruck mit Beschränkungen hinsichtlich der noch möglichen Planänderungen. Durch intensiven Gedankenaustausch von aus hydraulischer Sicht günstigen und bautechnisch ausführbaren Varianten erfolgten innerhalb von gut zwei Wochen die wesentlichen Festlegungen der neuen Abmessungen für das Einlaufbauwerk der Hochwasserentlastungsleitung, wobei der Durchmesser der Hochwasserentlastungsleitung unverändert blieb. **Bild 4** zeigt den ursprünglichen und neu gestalteten Grundriss.

Wesentliches Ziel der neuen Formgebung für den Einlaufbereich war die Einleitung von $38 \text{ m}^3/\text{s}$ in die Hochwasserentlastungsleitung bei einem möglichst geringen zusätzlichen Rückstau für den Mehlemer Bach. Die ursprünglich scharfkantige Einlaufausbildung wurde deshalb durch große Ausrundungsradien ersetzt. Die relativ geringe Wasserüberdeckung des Einlaufs, die zwangsläufig zu starker Wirbelbildung mit erheblichem Luftereintrag führen würde, wurde durch eine strömungsgünstig ausgebildete Abdeckung ausgeglichen. Bei der Umgestaltung wurde berücksichtigt, dass aufgrund des Zeitdrucks nicht mehrere unterschiedliche Formgebungen im Modell nachgebildet und untersucht werden können.

Druckverhältnisse im Eintrittsbereich des Entlastungskanals

Da in der Hochwasserentlastungsleitung entgegen der Annahmen aus der Bauwerksplanung kein Freispiegel-, sondern ein

Druckabfluss vorherrscht, war zu überprüfen, ob trotz der Verwendung des Froudeschen Modellgesetzes (gilt für Freispiegelabflüsse!) eine Übertragbarkeit der Modellergebnisse gegeben ist, d. h. ob die Druckverhältnisse im Bereich des Einlaufbauwerks etwa denen der Großausführung insbesondere für den extremen Bemessungsfall mit dem Zufluss $HQ_{1.000}$ entsprechen. Berechnungen von Fließverlusten, zu erwartenden Strömungseinschnürungen [2] und daraus resultierenden Drücken stimmten mit den im Modell beobachteten Drücken überein. Damit war sichergestellt, dass die im Modell für den extremen Bemessungsfall beobachteten Fließverhältnisse auf die Großausführung übertragen werden können.

Versuchsergebnisse nach Modellumbau

Die Umgestaltung führt dazu, dass die Anströmung des Einlaufs und auch die des Rohreintrittsquerschnitts deutlich verbessert wurde. Der für die Abführung des Bemessungshochwassers $HQ_{1.000}$ im Oberwasser erforderliche Wasserstand lag trotz des dort auftretenden Wechselsprungs ca. $0,90 \text{ m}$ und die zugehörige Energiehöhe ca. $0,50 \text{ m}$ niedriger als im ursprünglichen Planungszustand. Die angestrebte Drosselung des im Mehlemer Bach verbleibenden Durchflusses auf $15 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde nach geringfügiger Anpassung der Drosselöffnungshöhe erzielt. Der zusätzliche Rückstau konnte auf knapp drei Dezimeter begrenzt werden. Damit wurden die Entwicklung der neuen Formgebung und die Versuche ohne aufgesetzten Rechen abgeschlossen.

4.2 Modellversuche mit aufgesetztem Rechen

Die im Rahmen der Vorbereitung der Untersuchungen geführten Diskussionen ergaben, dass die Zugangssicherung für das Trennbauwerk durch eine Einfriedung und nicht durch entsprechend enge Stababstände des Rechens erfolgt, da sonst eine



Bild 5: Einlaufbauwerk mit aufgesetztem Rechen sowie Wechselsprung und stehende Wellen in Zustrom zum Trennbauwerk

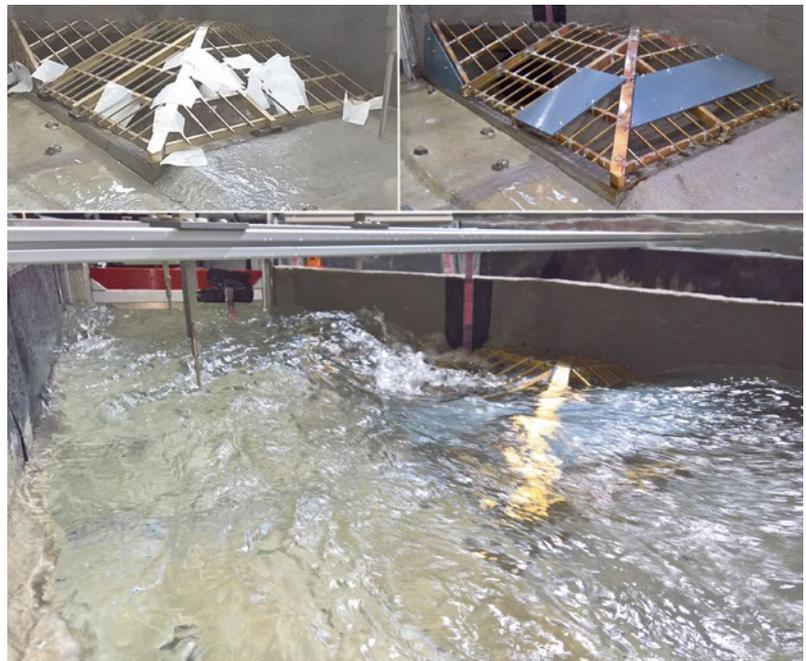


Bild 6: Geschwemmselversuch für $Q_{zu} = 31,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (oben links) und Verschluss entsprechender Teilflächen (oben rechts) sowie Fließverhältnisse bei Anströmung des Trennbauwerks bei $HQ_{1.000} \approx 53 \text{ m}^3/\text{s}$

frühe und umfassende Verlegung des Rechens im Hochwasserfall zu erwarten ist. Die aktualisierte Planung sieht einen Rechen vor, der eine Verklausung der Entlastungsleitung sicher vermeidet. Das grobe Gitter (**Bild 5**) aus horizontalen und vertikalen Stäben lässt eine Berechnung der hierdurch bedingten Fließverluste mit den vorhandenen Formeln nicht zu. Insgesamt wurde eine stabile Rechenkonstruktion gewählt, die bei Anprall von Baumstämmen allenfalls geringe Schäden aufweist.

Ähnlichkeitsuntersuchungen von Rechenstäben [1] zeigen, dass der vom Rechenstab ausgeübte Strömungswiderstand von der stabbezogenen Reynolds-Zahl abhängt:

$$Re_s = \frac{v \cdot s}{\nu} \quad (1)$$

- mit v Anströmgeschwindigkeit der Rechenstäbe [m/s]
 s Rechenstabdicke [m]
 ν kinematische Viskosität des Wassers [m²/s]

Für den Bereich der Reynolds-Zahlen im Modell und in der Großausführung $500 < Re_s \leq 200\,000$ darf die Übertragbarkeit der Fließverluste mit hinreichender Genauigkeit vorausgesetzt werden. Die Großausführung führt mit einer Stabdicke von 40 mm und Fließgeschwindigkeiten zwischen 2 m/s und 4 m/s zu $6,2 \cdot 10^4 < Re_s \leq 1,2 \cdot 10^5$, während im Modell

$1,9 \cdot 10^3 < Re_s \leq 3,9 \cdot 10^3$ auftreten. Sowohl die in der Großausführung als auch die im Modell auftretenden Reynolds-Zahlen liegen im vorgenannten Bereich. Daher darf die Übertragbarkeit der Ergebnisse vorausgesetzt werden.

Messergebnisse mit unverlegtem Rechen

Die Fließverhältnisse führten auch bei aufgesetztem Rechen zu stehenden Wellen und einem oberwasserseitig des Trennbauwerks auftretenden Wechselsprung bei einer Beaufschlagung mit $HQ_{1.000}$ (**Bild 5**).

Bei nicht verlegtem Rechen erhöht sich der Oberwasserstand gegenüber der Ausführung ohne Rechen erst mit einem drastischen Anstieg ab einem Zufluss von über 50 m³/s. Bei $HQ_{1.000}$ erreicht die Erhöhung des Wasserstands knapp 0,80 m.

Versuche mit verlegtem Rechen

Zur Untersuchung des verlegten Rechens waren zunächst die Bereiche zu ermitteln, die von diesem Vorgang besonders betroffen werden. Dazu wurden zwei Annahmen getroffen:

- Für den sicheren Betrieb sind die bei häufiger auftretenden Hochwasserereignissen mit kleineren Wiederkehrintervallen verlegten Bereiche bedeutend.
- Bei einem Extremereignis werden sich insbesondere die im Laufe des Hochwasseranstiegs von der Verlegung betroffenen

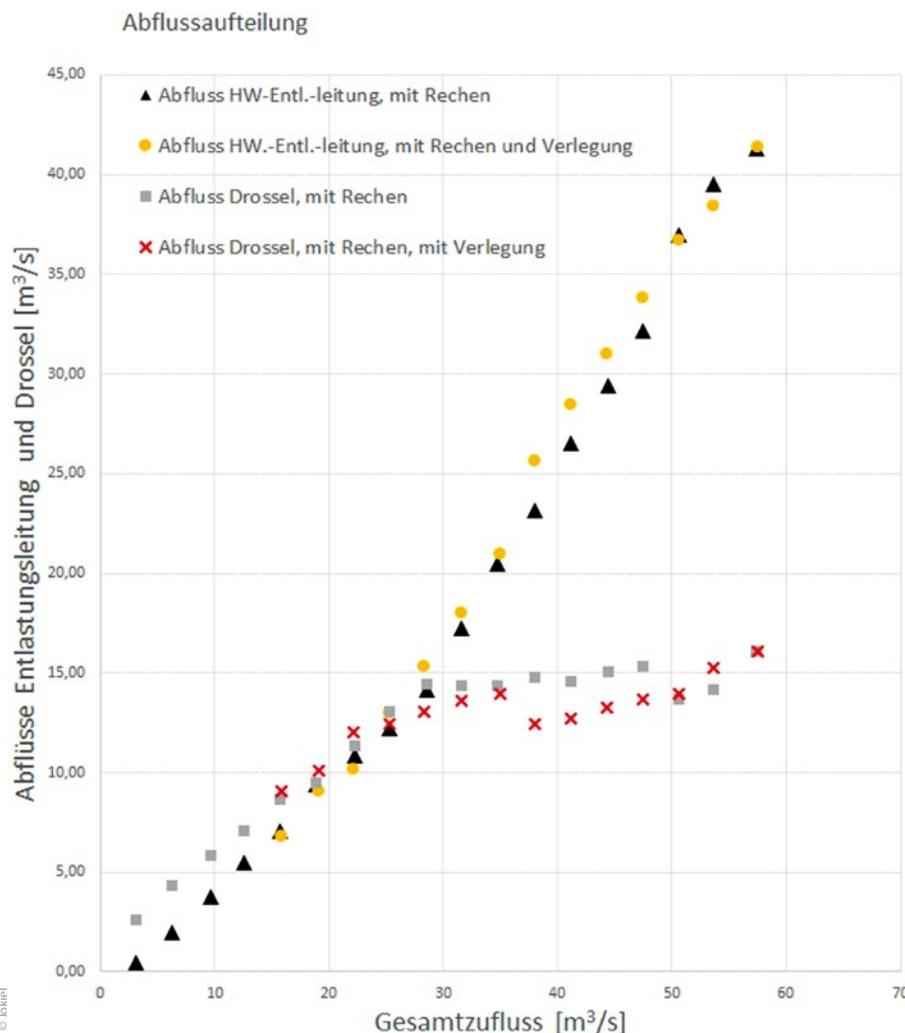


Bild 7: Abflussaufteilung zwischen der Entlastungsleitung und der Drossel für die Zustände „mit Rechen“ und „mit verlegtem Rechen“ in Abhängigkeit des Gesamtzuflusses

Tabelle 1: Ergebnisse für Bemessungsabfluss $HQ_{1.000} \approx 53 \text{ m}^3/\text{s}$ (Quelle: Jokiel)

	Ohne Verlegung	Mit Verlegung
Abführung Entlastungsleitung	39,03 m ³ /s	37,96 m ³ /s
Abführung Drossel	13,97 m ³ /s	15,04 m ³ /s
Mittlerer WSP Profil +179,5	66,39 m ü. NHN	66,46 m ü. NHN
Maximaler WSP oberhalb Einlauf	66,54 m ü. NHN	66,44 m ü. NHN
Maximaler WSP vor Drossel	67,17 m ü. NHN	67,27 m ü. NHN

Flächenanteile auswirken, da sie zeitlich länger beaufschlagt werden als die nur vom Hochwasserscheitel benetzten Bereiche. Vor diesem Hintergrund wurden zur Ermittlung der relevanten Teilflächen Versuche mit Zuflüssen (Naturmaß) von 19 m³/s (70 % von HQ_{100} bzw. 36 % von $HQ_{1.000}$) und von 31,6 m³/s (60 % von $HQ_{1.000}$) durchgeführt. Als Geschwemmsel wurden rechteckige Folienabschnitte mit Kantenlängen von 8-10 cm aus LDPE (weiß, 225 µm, 0,93 g/cm³) und PVC-P (orange, 450 µm, 1,2 g/cm³) verwendet, um sowohl Stoffe etwas leichter als auch etwas schwerer als Wasser einzubeziehen. Die Versuche mit ständiger Geschwemmselzugabe wurden soweit ausgedehnt, bis kein Anwachsen der verlegten Flächenanteile mehr beobachtet werden kann. Das dann noch zugegebene Geschwemmsel wurde entweder unter der Unterkante der Drossel oder zwischen den

Rechenstäben abgesaugt. Als Beispiel ist die bei $Q_{zu} = 31,6 \text{ m}^3/\text{s}$ entstandene Verlegung wiedergegeben (**Bild 6**).

Sowohl die während der Versuche beobachteten Zustände als auch das nach Ablassen des Wassers sich bietende Bild wurden herangezogen, um den verlegten Flächenanteil aufgerundet festzulegen. Die bei $Q_{zu} = 19 \text{ m}^3/\text{s}$ verlegten Flächen wiesen eine geringere Ausdehnung auf und wurden deshalb nicht weiter berücksichtigt. Als Ergebnis wurden die betroffenen Flächen mit Kunststoffplatten verschlossen (**Bild 6**) und damit die Verlegung für unterschiedliche Zuflüsse simuliert (**Bild 6**).

Die Versuche zeigten, wie auch die vorangegangenen Experimente, Wechsellprungbildung und stehende Wellen. Überraschender Weise wurden durch die Verlegung zwar andere Rechenflächen stärker durchströmt als vorher, allerdings erfolgte durch die insgesamt sehr große Rechenfläche kein messbarer zusätzlicher Aufstau.

Ergebnisübersicht

Im **Bild 7** sind die Ergebnisse der Modellversuche graphisch zusammengefasst. Dargestellt ist die Abflussaufteilung zwischen der Entlastungsleitung und der Drossel für die Zustände „mit Rechen“ und „mit verlegtem Rechen“ in Abhängigkeit des Gesamtzuflusses.

Weiterhin wurden die Wasserspiegellagen entlang der Hochwasserschutzmauern auf beiden Gewässerseiten für den Bemessungsabfluss $HQ_{1.000} \approx 53 \text{ m}^3/\text{s}$ bestimmt, um die notwendigen Höhen der rechts- und linksseitigen Hochwasserschutzwände



Bild 8: Errichtung des Trennbauwerks: Fertig gestellte Überlaufkante und Einlauftrög (oben) sowie Vergleich Einlauftrompete in Natur und Modell (unten)

festlegen zu können. Aufgrund der benannten Messunsicherheiten sowie zur Gewährleistung eines ausreichenden Freibords wurde ein Aufschlag von 60 cm auf die gemessenen Wasserspiegellagen zur Festlegung der notwendigen Höhe der Hochwasserschutzmauern empfohlen.

Die wesentlichen Ergebnisse für den Bemessungsfall $HQ_{1.000}$ sind in **Tabelle 1** gegeben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Abschluss der Bautätigkeiten war im Frühjahr 2019. Das Trennbauwerk wurde entsprechend der Ergebnisse der physikalischen Modellversuche umgesetzt. **Bild 8** zeigt das erstellte Trennbauwerk vor und nach der Ausformung des Einlauftröges sowie einen Vergleich des Trennbauwerks in Natur und im Modell.

Die Versuche haben gezeigt, dass aufgrund der schießenden Anströmung und komplexen 3-D-Geometrie des Trennbauwerkes und der aufgesetzten Rechenanlage eine numerische 2-D-Simulation der Strömungszustände nicht zielführend ist. Die physikalischen Modellversuche ergaben, dass eine Umgestaltung des Bauwerks erforderlich ist, um die geforderte Leistungsfähigkeit von $Q_{1.000,Ent} = 37,97 \text{ m}^3/\text{s}$ bei gleichzeitiger Begrenzung des Abflusses ins Unterwasser auf $Q_{max,UW} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ zur Sicherstellung des Hochwasserschutzes zu gewährleisten.

Aufgrund des vorhandenen Baufortschrittes waren Anpassungen an den äußeren Abmessungen des Bauwerkes nicht möglich. Unter diesen Randbedingungen war die wesentlichste Änderung die strömungsgünstige Formgebung des Einlaufes in den Entlastungskanal, d. h. eine trompetenförmige Ausbildung mit möglichst großem Krümmungsradius. Im Vergleich zur ursprünglich scharfkantigen Ausbildung werden die Strömungsumlenkungen bereits in Bereichen mit geringeren Fließgeschwindigkeiten initiiert und die Strömungsablösungen,

welche zu großen Fließverlusten führen, deutlich reduziert. Zur Verringerung des Lufteintrages und der Wirbelbildung wurde die Abdeckung des Einlaufbereiches ebenfalls ausgerundet.

Der Entwurf der aufgesetzten Rechenanlage ist ein Kompromiss aus der notwendigen Stabilität gegenüber Anprall (z. B. von Baumstämmen) und der erforderlichen hydraulischen Leistungsfähigkeit. Somit wurden die Stababstände des Rechens so gewählt, dass keine umfassende Verlegung des Rechens im Hochwasserfall zu erwarten ist. Im Gegenzug erfolgt die Zugangssicherung für das Trennbauwerk durch eine Einfriedung. Die Modellversuche belegen, dass selbst bei einer teilweisen Verlegung der Rechenanlage die geforderte Leistungsfähigkeit erreicht wird. Dabei stellt sich für den Bemessungsabfluss $HQ_{1.000} \approx 53 \text{ m}^3/\text{s}$ ein maximaler Wasserspiegel von 67,27 m ü. NHN im Bereich der Drossel ein. Es ist vorgesehen, durch teilweise durchsichtige Schutzwände einen ausreichenden Freibord auch bei extremem Hochwasser in diesem Bereich sicherzustellen.

Autoren

Mario Axler, M. Eng.

Prof. Dr.-Ing. Christian Jokiel

Dipl.-Ing. Roman Martzinek

Lehr- und Forschungsgebiet für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Labor für Wasser und Umwelt (LWU)

Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser (BGVW)

Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik

Betzdorfer Str. 2

50679 Köln

mario.axler@th-koeln.de

christian.jokiel@th-koeln.de

roman.martzinek@th-koeln.de

Dipl.-Ing. Matthias Franke

Bundesstadt Bonn Tiefbauamt 66-20

Stadthaus, Berliner Platz

53111 Bonn

matthias.franke@bonn.de

Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Heinemann

Rolshover Kirchweg 60a

51105 Köln (Poll)

ek.heinemann@arcor.de

Literatur

- [1] Meusburger, H.: Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken. VAW, Zürich, 2002.
- [2] Richter, H.: Rohrhydraulik. 5. A. Heidelberg: Springer Verlag, 1971.

Mario Axler, Matthias Franke, Ekkehard Heinemann, Christian Jokiel and Roman Martzinek

Hydraulic layout of diversion structure with supercritical flow

In recent years, torrential rainfalls lead frequently to storm-water runoff and respective flooding by a creek passing residential areas of the city of Bonn-Mehlem asking for measures to protect the citizens against future damages. Solution was sought by erecting a diversion structure, which deviates approx. 70 % of the total discharge into a tunnel, reducing the downstream creek flow to an acceptable limit. Due to a supercritical approaching flow, complex three-dimensional flow conditions at the intake and unknown head losses at the spatial trashrack mounted on the diversion structure, physical model tests were required to firstly verify the hydraulic performance of the present layout and subsequently improve the design of the diversion structure to increase its hydraulic capacity to the required level. Main design adjustments include (i) the shaping of the inlet trough and orifice transition into the pressure tunnel and (ii) new layout of the trashrack, which partial blockage by debris was simulated by feeding plastic sheets to the approaching flow until no further blockage was observed. The results proved the new design to be capable to handle the design flow of $53 \text{ m}^3/\text{s}$ even with a partial blockage of the trashrack.



SpringerProfessional.de

Starkregenabfluss



Eichendorff, P.; Schlenkhoff, A.: Messung des Starkregenabflusses auf Straßen mittels Videoauswertung. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 7-8/2019. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. www.springerprofessional.de/link/17044872

Assmann, A.: Starkregen und Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten — Auswirkungen und Vorsorgemaßnahmen. In: Wasser und Abfall, Ausgabe 9/2018. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. www.springerprofessional.de/link/16104892