

Hochwasserschutz am Würzenbachstollen : hydraulische Modellversuche in Luzern

Autor(en): **Röber, Isabel / Hinkelammert-Zens, Florian / Weitbrecht, Volker**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **111 (2019)**

Heft 3

PDF erstellt am: **14.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-941526>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Hochwasserschutz am Würzenbachstollen

Hydraulische Modellversuche in Luzern

Isabel Röber, Florian Hinkelammert-Zens, Volker Weitbrecht, Michael Auchli, Tobias Schläfli

Zusammenfassung

Zum Schutz vor Überflutungen wurde 1978 oberhalb des Luzerner Stadtgebiets ein Entlastungsstollen errichtet, durch welchen im Hochwasserfall überschüssige Wassermengen vom Würzenbach in den Vierwaldstättersee abgeleitet werden sollen. Bei einem Hochwasserereignis im Juni 2015 (ca. ca. HQ₃₀ bis HQ₅₀) führte eine Verklausung des Einlaufbauwerks zu starken Überschwemmungen mit einer Schadenssumme im Stadtgebiet von rund 1 Million CHF. Daraufhin beschloss der Kanton Luzern einen Umbau des bestehenden Bauwerks mit folgenden Vorgaben: Die Abflusskapazität des Würzenbachs im Stadtgebiet von 2.5 m³/s soll bis zu einem 300-jährlichen Hochwasser mit rund 30 m³/s nicht überschritten werden. Bei Hochwasser muss somit ein Grossteil des Abflusses durch den Entlastungsstollen abgeleitet werden, wobei dieser auch bei massivem Schwemmholz- und Geschiebeaufkommen betriebsbereit bleiben muss. Die projektierten Massnahmen wurden an der VAW der ETH Zürich mittels hydraulischer Modellversuche geprüft und optimiert. Die Untersuchungen bestätigten die generelle Funktionalität und korrekte hydraulische sowie geschiebetechnische Dimensionierung des projektierten Bauwerks. Der Schwemmholzurückhalt wurde im Rahmen einer umfassenden Variantenstudie detailliert untersucht und konnte durch eine Kombination aus Tauchwand und Rechen deutlich verbessert werden. Der Eintrag kritischer Schwemmholzfraktionen, welche zur Verklausung des Entlastungsstollens und in weiterer Folge zu einer starken Reduktion der Abflusskapazität führen könnten, wurde nahezu komplett unterbunden. Gleichzeitig konnte mit dieser Variante ein robustes Verhalten bei sämtlichen getesteten Überlastfällen erzielt werden.

1. Einleitung

1978 wurde oberhalb des Würzenbachquartiers der Stadt Luzern ein Entlastungsstollen errichtet, welcher im Hochwasserfall zum Schutz des Stadtgebiets überschüs-

sige Wassermengen des Würzenbachs direkt in den Vierwaldstättersee ableiten soll (siehe Bild 1 für Lage sowie Tabelle 1 für Kenndaten des Einzugsgebiets). Ein Rechen vor dem Stolleneinlauf soll den

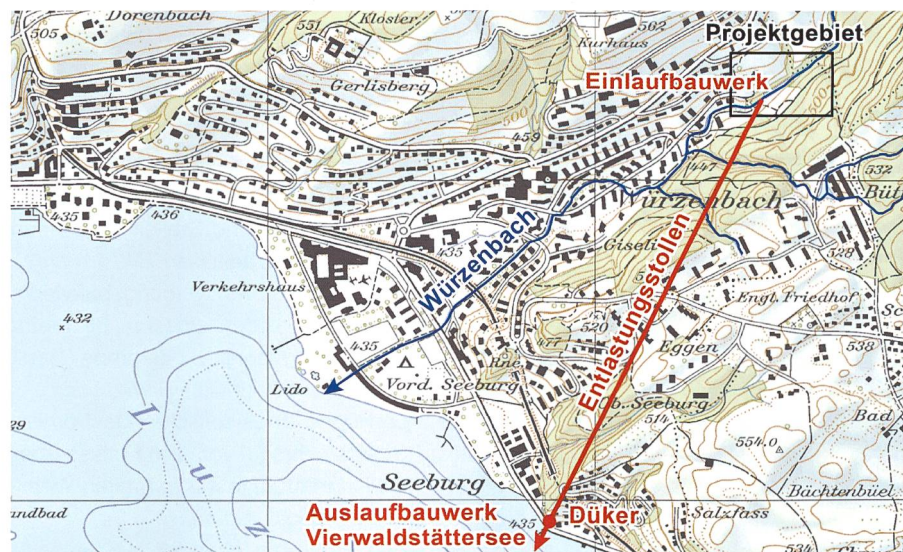


Bild 1. Lage des Würzenbachs sowie des Entlastungsstollens im Stadtgebiet Luzern (nach swisstopo, 2018).

Eintrag von Schwemmholz und anderem Treibgut verhindern. Seit Inbetriebnahme des Bauwerks kam es dennoch während verschiedener Hochwasserereignisse zu Verklausungen des Rechens; im Juni 2015 entstanden durch Überschwemmungen im Luzerner Würzenbachquartier Schäden in Höhe von rund 1 Million CHF. Dieses Ereignis verdeutlichte den dringenden Handlungsbedarf zur Verbesserung des Hochwasserschutzes. Die Dienststelle Verkehr und Infrastruktur des Kantons Luzern (vif) beauftragte daraufhin das Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner (HZP) mit einem Hochwasserschutzprojekt zur Adaptierung des bestehenden Bauwerks.

Durch den kombinierten Rückhalt von Geschiebe und Schwemmholz und die hohen Anforderungen an die Trenncharakteristik weist das Projekt eine hohe Komplexität auf, da die Entlastungskapazität des Würzenbachstollens für eine Vielzahl von Lastfällen gesichert sein muss. Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurde daher mit der vertieften Untersuchung und Optimierung des Projektzustands mittels hydraulischer Modellversuche beauftragt.

2. Bestehendes Bauwerk

Der Einlauf in den Entlastungsstollen ist in einem Verzweigungsbauwerk angeordnet, welches mit einer Staumauer ([1] Bild 2, oben) abgeschlossen ist. Während eines Hochwasserereignisses reguliert eine in die Staumauer integrierte Drosselblende (2) den Abfluss in das Gerinne des Würzenbachs unterstrom. Vor dem leicht erhöhten Stolleneinlauf ist ein Rechen (3) angeordnet, um das Eindringen von Schwemmholz und anderem Treibgut zu verhindern. Eine Fischtreppe (4) soll die Passierbarkeit des Bauwerks auch bei Niederwasser gewährleisten. Oberwasserseitig ist ein Überfallwehr ([5] Bild 2, unten) angeordnet, welches einen Geschieberückhalteraum mit einer Kapazität von rund 100 m³ abschliesst. Direkt im Anschluss an das Hochwasser-

ereignis 2015 wurde in diesem Geschieberückhalteraum ein Grobrechen als Sofortmassnahme installiert (6).

Der Entlastungsstollen wurde auf eine Wassermenge von 27 m³/s dimensioniert und leitet das Wasser im Freispiegelabfluss über eine Länge von rund 1460 m mit einem Gefälle von 1.175 % in den Vier-

waldstättersee. Das Rechteckprofil im Einlaufbereich geht nach ca. 30 m in ein Kreissegmentprofil (Stolldurchmesser 3.08 m) über (Desserich, 1980). Im Auslaufbereich des Entlastungsstollens wird das Wasser durch zwei Düker mit Rechteckquerschnitt in den Vierwaldstättersee geleitet (Bild 1 und Bild 10, rechts).

3. Hochwasser 2015

Am 7. Juni 2015 wurden durch ein Unwetterereignis grosse Mengen Schwemmholz und Geschiebe mobilisiert und verklauten den Einlaufbereich des Entlastungsstollens (Bild 3). Das Wasser konnte nicht mehr ausreichend durch den Entlastungsstollen abgeführt werden, überströmte infolgedessen die Staumauer und führte im Stadtgebiet zu Überschwemmungen. Dieses Unwetterereignis wird mit maximalen Abflusswerten zwischen 16 und 20 m³/s in der Grössenordnung HQ₃₀ bis HQ₅₀ eingeordnet (Scherrer AG, 2016). Diese relativ hohe Auftretenswahrscheinlichkeit verdeutlichte das vorhandene Schutzdefizit und führte zur Entwicklung des Hochwasserschutzprojekts «Einlaufbauwerk Würzenbachstollen».

4. Hochwasserschutzprojekt «Einlaufbauwerk Würzenbachstollen»

Zu Beginn der Projektierung im Jahr 2016 wurde – entsprechend dem Schutzziel für Siedlungsgebiete des Kantons Luzern (Kanton Luzern, 2013) – das HQ₁₀₀ mit einem Spitzenabfluss von rund 30 m³/s als Bemessungsereignis gewählt. Eine zeitgleich durchgeführte hydrologische Studie (Scherrer AG, 2016) stufte das bis anhin verwendete HQ₁₀₀ neu als HQ₃₀₀ ein. Der Kanton Luzern entschied, das Bemessungsereignis des Projekts aufgrund des grossen Schadenpotenzials nicht unter HQ₃₀₀ anzusetzen und somit die Kapazität des bestehenden Stollens mit dem neuen Einlaufbauwerk ausschöpfen zu können.

Das Gerinne des Würzenbachs hat im Stadtgebiet eine minimale Abflusskapazität von 2.5 m³/s. Im Hochwasserfall muss somit ein Grossteil des Abflusses durch den Entlastungsstollen abgeleitet werden, wobei der Stollen auch bei massivem Schwemmholz- und Geschiebeaufkommen betriebsbereit bleiben muss. Das von HZP u. a. auf Basis von numerischen 2-D-Simulationen entwickelte Hochwasserschutzprojekt sieht folgende Massnahmen vor:

- Staumauer (a) und Stollen (b) werden im Ist-Zustand belassen (Bild 4, rechts).
- Abbruch des Verzweigungsbauwerks und Ersatz durch eine ca. 35 Meter lange fischgängige Blockrampe (1) mit Niederwasserrinne (2) (Bild 4, links).
- Erstellung eines seitlich angeströmten Streichwehrs (3) vor dem Entlastungsstollen mit fünf je 4.8 m breiten Wehrfeldern (Bild 4, rechts).
- Ersatz des bestehenden Rechens vor dem Stolleneinlauf durch einen vorgeetzten Grobrechen (4).

Würzenbach	
Fliesstrecke gesamt	9.3 km
Mittleres Gefälle im Projektgebiet oberhalb Stollen	ca. 2%
Einzugsgebiet gesamt, oberhalb Stollen	10.0 km ² , 8.51 km ²
Nutzungsflächen: Landwirtschaft, Wald, Siedlung	40%, 30%, 30%
Stollen	
Länge Entlastungsstollen	1460 m
Durchmesser Entlastungsstollen	3.08 m
Gefälle Entlastungsstollen	1.175%
Grundlagen Lastfälle	
MQ	0.23 m ³ /s
HQ ₃₀	ca. 14 m ³ /s
HQ ₃₀₀	ca. 30 m ³ /s
HQ ₁₀₀₀	ca. 39.0 m ³ /s
Geschiebefracht HQ ₃₀	ca. 300 m ³
Geschiebefracht HQ ₃₀₀	ca. 600 m ³
Geschiebefracht HQ ₁₀₀₀	ca. 1000 m ³
Schwemmholzfracht HQ ₃₀	ca. 50 m ³
Schwemmholzfracht HQ ₃₀₀	ca. 100 m ³
Schwemmholzfracht HQ ₁₀₀₀	ca. 150 m ³

Tabelle 1. Kenndaten des Würzenbachs, des Stollens sowie Dimensionierungsgrundlagen (Quellen: Pfaundler [2013], Scherrer AG [2016], HZP).

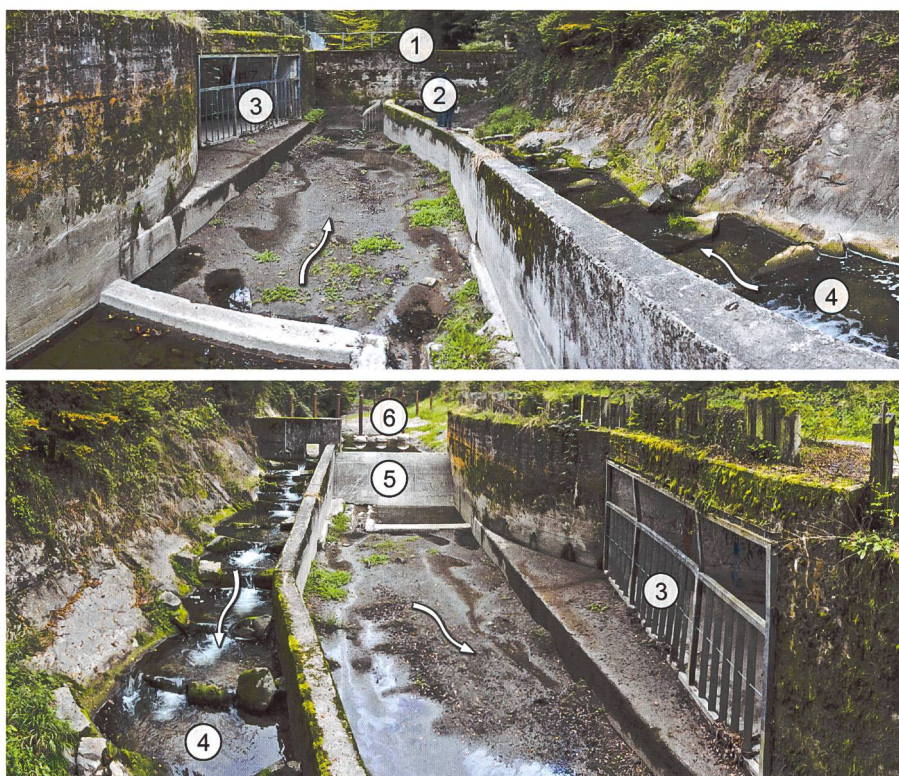


Bild 2. Bestehendes Verzweigungsbauwerk mit Einlauf zum Entlastungsstollen. Oben: Blick in Flieissrichtung; unten: Blick von der Staumauer gegen die Flieissrichtung.

- Bau einer an das Streichwehr anschließenden Sammelrinne (5) mit Beschleunigungsstrecke (6) (siehe auch Bild 11).

Die Errichtung der Blockrampe und der Niederwasserrinne führen neben einer deutlichen Vergrößerung des Rückhaltterraums für Geschiebe zu einer besseren Längsvernetzung des Gerinnes. Durch die erhöhte Lage des Streichwehrs gegenüber dem Ist-Zustand sollen der Eintrag von Geschiebe verhindert und die benötigte Abflusskapazität auch bei einer Teilverklausung des Rechens garantiert werden. Mithilfe des Grobrechens sollen ein bestmöglicher Schwemmholzurückhalt erzielt und die Gefahr von Verklausungen im Stollen reduziert werden. Im Überlastfall werden Staumauer und Einlaufbauwerk überströmt. Ein auf beiden Bauwerken installierter zusätzlicher Rechen soll in diesem Fall ein schlagartiges Auftreten von Schwemmholztransport ins Würzenbachquartier verhindern. Das überschüssige Wasser gelangt im Überlastfall direkt unterstrom des Einlaufbauwerks wieder in den Würzenbach.

5. Hydraulisches Modell

Die VAW wurde beauftragt, die projektierte Geometrie, das Gesamtsystem und das Optimierungspotenzial mittels hydraulischer Modellversuche zu prüfen. Der Fokus der Modellversuche wurde auf die Parameter Trenncharakteristik, Schwemmholz- und Geschieberückhalt sowie auf hydraulische Aspekte im Stolleneinlauf gelegt.

5.1 Experimenteller Aufbau

Das Modell im Massstab 1:15 (Modellähnlichkeit nach Froude) bildete mit Laborabmessungen von rund 11 x 2 m in Natur ca. 170 m Fließstrecke des Würzenbachs sowie 45 m des Entlastungsstollens ab (Bild 5). Die Ufer des Würzenbachs bestehen aus Fels und wurden im Modell daher nicht beweglich nachgebildet. Im Bereich zwischen Blockrampe und Einlaufbauwerk liegt die projektierte Sohle auf der Höhe des anstehenden Felshorizonts und wurde im Modell ebenfalls fest nachgebildet. Oberstrom der Blockrampe bleibt eine bewegliche Kiessohle bestehen, welche im Modell entsprechend umgesetzt wurde.

Die Modellsteuerung erfolgte automatisiert und erlaubt die präzise Regelung der Zuflussmenge sowie der zugegebenen Geschiebemenge für stationäre und instationäre Szenarien. Die Abflussmengen im Entlastungsstollen sowie im Gerinne des Würzenbachs unterstrom der Staumauer (Trenncharakteristik) wurden kontinuierlich gemessen. Fest installierte Ultraschallsen-



Bild 3. Links: Rechenverklausung beim Einlauf in den Stollen. Rechts: Auflandungen im Verzweigungsbauwerk (mod. nach oeko-b Fotodokumentation, 2015).

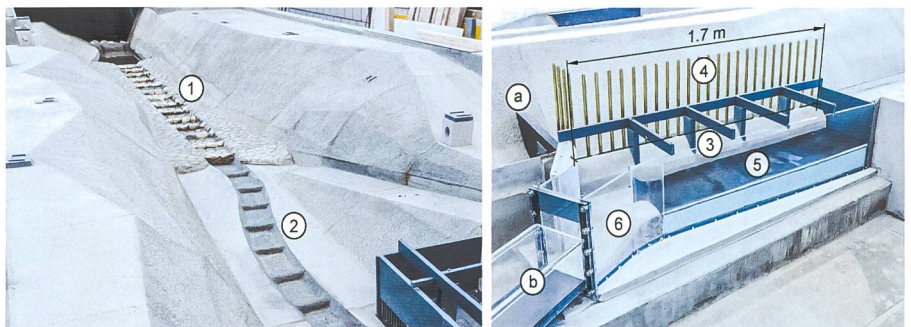


Bild 4. Links: Blockrampe (1) und Niederwasserrinne (2) im hydraulischen Modell. Blick gegen die Fließrichtung. Rechts: Einlaufbauwerk auf Grundlage des Vorprojekts mit für Modellbetrieb überhöhtem Grobrechen (4).

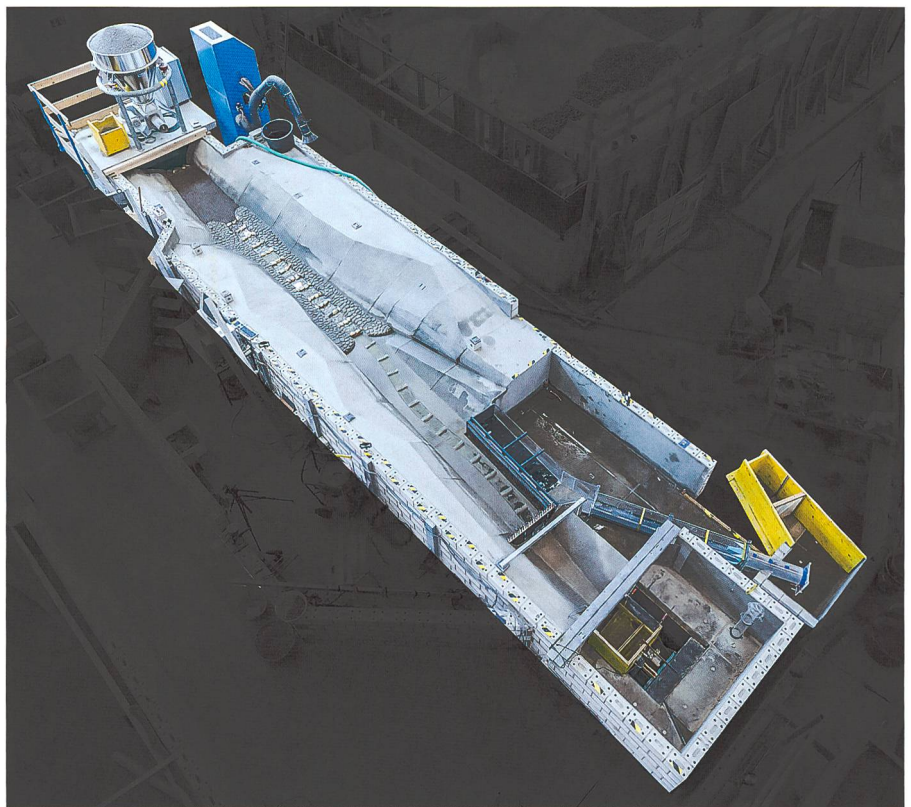


Bild 5. Hydraulisches Modell des Einlaufbauwerks Würzenbachstollen im Massstab 1:15. Fließrichtung von links nach rechts.

	Stammholz	Grosses Astholz	Kleines Astholz	Feinanteile	Wurzelstöcke
Volumenanteil [%]	5	25	50	15	5
Länge Natur [m]	2.5(-4.0)	1.5–2.5	0.5–1.5	0.25–0.5	0.5–0.8
Länge Modell [mm]	167(-267)	100–167	33–100	17–33	33–50
Durchmesser Natur [m]	0.3–0.4	0.15–0.3	0.1–0.2	< 0.1	0.5–0.8
Durchmesser Modell [mm]	20–27	10–20	7–13	< 7	33–50

Tabelle 2. Fraktionen und Zusammensetzung des im Modell verwendeten Schwemmholzes.

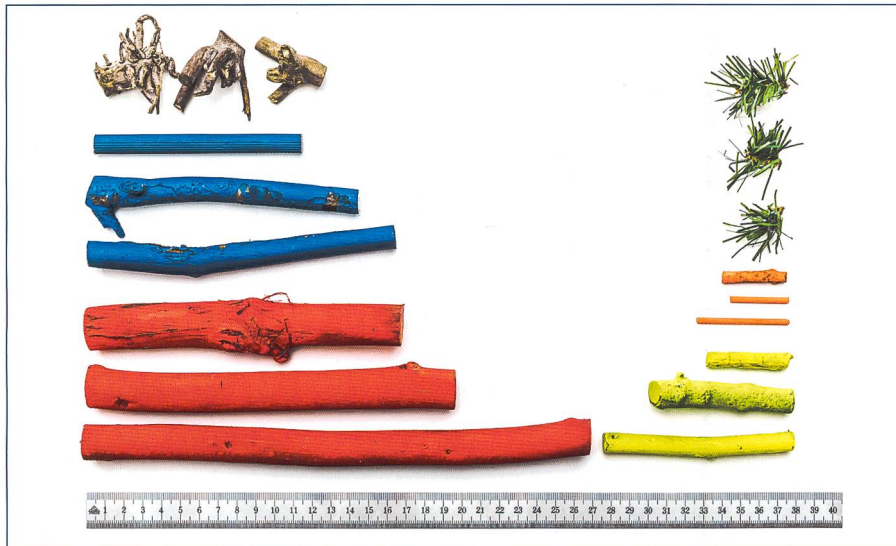


Bild 6. Unterschiedlich eingefärbte Klassen des Modellschwemmholzes: Stammholz (rot), grosses Astholz (blau), kleines Astholz (gelb), Feinanteile (orange, grün), Wurzelstöcke (naturlas).

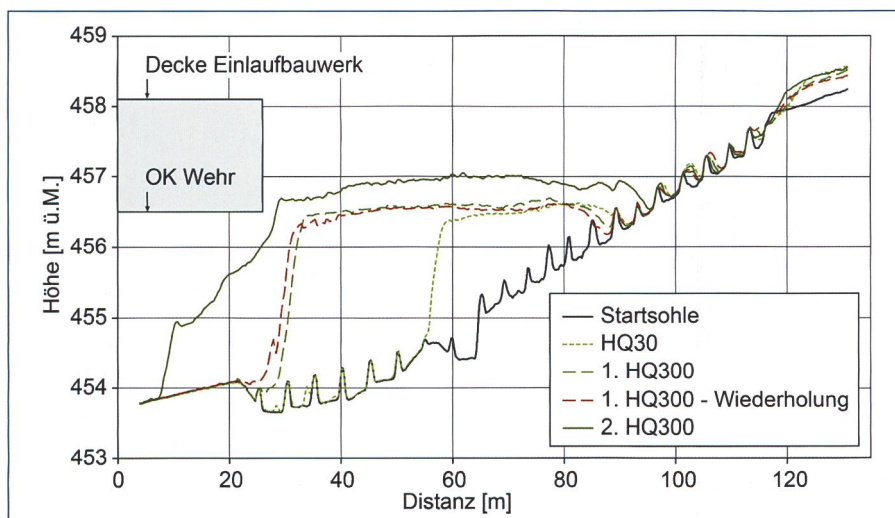


Bild 7. Längenprofile der kumulierten Auflandungskörper eines HQ₃₀- mit zwei aufeinanderfolgenden HQ₃₀₀-Versuchen sowie eines ersten HQ₃₀₀-Wiederholungsversuchs in Relation zur Lage des Einlaufbauwerks (Schnittführung entlang Fließachse, lokal im Talweg).

soren zeichneten die Wasserspiegellagen im Gerinne während der Versuche auf.

Das im Modell verwendete Geschiebe entsprach dem skalierten Sohlmaterial des Würzenbachs für die Simulation von Hochwasserereignissen mit aufgerissener Deckschicht. Für die Auswertung der Sohlveränderungen wurde die Modellsohle vor sowie nach jedem Versuch mit Ge-

schiebezugabe mittels Laserscanner vermessen. Durch die Gegenüberstellung der Vermessungsdaten konnten Auflandungs- und Erosionsflächen sowie Ablagerungsvolumina bestimmt werden. Der Vergleich mit den zugegebenen sowie den durch die Staumauer und den Stollen ausgetragene Geschiebemengen ermöglichte die Ermittlung einer Gesamtbilanz.

Das Schwemmh Holz wurde am Modelleinlauf manuell zugegeben. Die am Grobrechen vor dem Einlaufbauwerk zurückgehaltenen und in den Stollen eingetragenen Schwemmh Holzvolumina wurden getrennt entfernt und gewogen. Die Nutzung von bis zu drei Unterwasserkameras mit Beleuchtung ermöglichte eine detaillierte Analyse des Schwemmh Holzverhaltens im Stauraum und infolgedessen eine gezielte Optimierung des Einlaufbauwerks.

5.2 Schwemmh Holz

Der Schwemmh Holzeintrag in das Projektgebiet wurde von HZP anhand einer Einzugsgebietsanalyse abgeschätzt und für HQ₃₀₀ auf rund 100 m³ festgelegt. Der Schwemmh Holzeintrag des HQ₁₀₀₀ wurde auf 150 m³ definiert. Basierend auf Begehungen sowie Bilddokumentationen des Einzugsgebiets und des Hochwasserereignisses von Juni 2015, wurde die Zusammensetzung des Schwemmh Holzes durch die VAW in fünf Klassen eingeteilt (Tabelle 2). Im hydraulischen Modell wurde das Schwemmh Holz mittels geometrisch skalierten Schnittholzes nachgebildet und entsprechend der jeweiligen Klasse eingefärbt (Bild 6).

Um die Abflusskapazität im Stollen aufrechtzuerhalten, muss der Eintrag von grossem Astholz und Stammholz vermieden werden. Diese «kritischen Fraktionen» könnten den Stollen sowie das Dükerbauwerk mit einem massgebenden Durchmesser von 1.4 m (Bild 10, rechts) nicht gefahrlos passieren. Ziel der Untersuchungen war daher, den Eintrag von Stammholz (Bild 6, rot) vollständig zu verhindern und den Eintrag von grossem Astholz (blau) bestmöglich zu reduzieren.

Das Transport- und Ablagerungsverhalten von Schwemmh Holz reagiert sehr sensitiv auf dessen Dichte. Eine höhere Dichte führt dazu, dass Schwemmh Holz in Rückhalteräumen früher absinkt, wodurch es vor Rechenstäben abgelagert wird und dort zu Verkläuerungen führen kann. Trockenes Holz schwimmt in Form eines Teppichs vor Rechenanlagen. Aus diesem Grund wurde die Dichte des anfallenden Schwemmh Holzes bei den Untersuchungen zum Würzenbach speziell berücksichtigt.

Das Einzugsgebiet des Würzenbachs verfügt im Gerinne über wenige Ablagerungsmöglichkeiten für Schwemmh Holz. Daher kann davon ausgegangen werden, dass im Hochwasserfall primär Grünholz (800 ± 170 kg/m³ nach Ruiz-Villanueva [2016]) und tendenziell weniger Totholz im Gewässer (660 ± 200 kg/m³) mobilisiert wird. Das Modellschwemmh Holz wurde, aufbauend auf vorausge-

henden Versuchen zum Verhältnis von Wässerungsdauer zu Dichte, vor jedem Versuch bis zum Erreichen der Dichte von Grünholz gewässert.

6. Prüfung Gesamtsystem

Als Dimensionierungsereignis wurde eine Ganglinienabfolge mit einem HQ_{30} sowie zwei aufeinanderfolgenden HQ_{300} -Ereignissen festgelegt. Das vorgeschaltete HQ_{30} diente der Ausbildung einer Referenzsole, die HQ_{300} -Ereignisse zur Prüfung der Dimensionierung des entsprechend ausgelegten Rückhalterums.

6.1 Trenncharakteristik

Die angestrebte Trenncharakteristik mit einem Maximalabfluss in das Stadtgebiet von $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde bei sämtlichen Versuchen mit dem Dimensionierungsereignis erfolgreich nachgewiesen. Die hydraulischen Kennwerte, wie z. B. die Wasserspiegellagen im Rückhalteraum, wurden in der vorangegangenen 2-D-Modellierung von HZP korrekt definiert und konnten für die Untersuchungen der VAW übernommen werden. Auch während der untersuchten Überlastfälle (s. Kapitel 8.2) kam es lediglich zu einer Überschreitung des im Stadtgebiet zulässigen Maximalabflusses von rund $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.2 Geschieberückhalt und -bewirtschaftung

Bild 7 zeigt im Modellversuch ermittelte und mittels Laserscan vermessene Auflandungskörper für das Dimensionierungsereignis ($1 \times HQ_{30}$ und $2 \times HQ_{300}$). Die Höhe der Verlandungskörper bildet sich ungefähr in der Höhe des Streichwehrs aus. Zum Ende des ersten HQ_{300} erreicht die Verlandungsfront nahezu das Einlaufbauwerk (Bild 8, links). Kurz nach Beginn des zweiten HQ_{300} erreicht die Verlandungsfront das Einlaufbauwerk und es kommt zum Eintrag von Geschiebe in die Sammelrinne und in weiterer Folge in den Entlastungsstollen. Während des zweiten HQ_{300} schreitet die Verlandungsfront bis zum dritten Wehrfeld voran (Bild 8, rechts) und verlegt infolgedessen ungefähr die Hälfte der durchströmten Rechenfläche.

Die Modellversuche bestätigten, dass der Rückhalteraum ausreichend dimensioniert wurde, um die Geschiebefrachten eines HQ_{30} sowie eines nachfolgenden HQ_{300} aufnehmen zu können, ohne dass es zum Eintrag von Geschiebe in den Stollen kommt. Darüber hinaus verdeutlichen diese Ergebnisse die gute Reproduzierbarkeit der ablaufenden Prozesse im hydraulischen Modell bei Wiederholung der entsprechenden Versuche (Bild 7).

6.3 Schwemmholzurückhalt/ Zwischenfazit

Die Trenncharakteristik sowie der Geschieberückhalt waren bereits im projektierten Zustand sehr gut dimensioniert und wurden daher im Rahmen der Modellversuche nicht weiter optimiert. Allerdings konnte mit der ursprünglichen Rechengeometrie lediglich

ein Schwemmholzurückhalt von rund 75 % erzielt werden, wobei beträchtliche Mengen der kritischen Fraktionen Stammholz und grosses Astholz in den Stollen eingetragen wurden. Der Schwemmholzurückhalt war somit nicht zufriedenstellend und wurde im Folgenden durch eine Reihe von Variantenuntersuchungen optimiert.



Bild 8. Links: Auflandungskörper und Lage der Verlandungsfront nach Ende eines ersten HQ_{300} -Versuchs. Rechts: Auflandungskörper nach Ende eines zweiten HQ_{300} -Versuchs mit massivem Geschiebeeintrag in den Stollen. Blick jeweils gegen die Fliessrichtung.

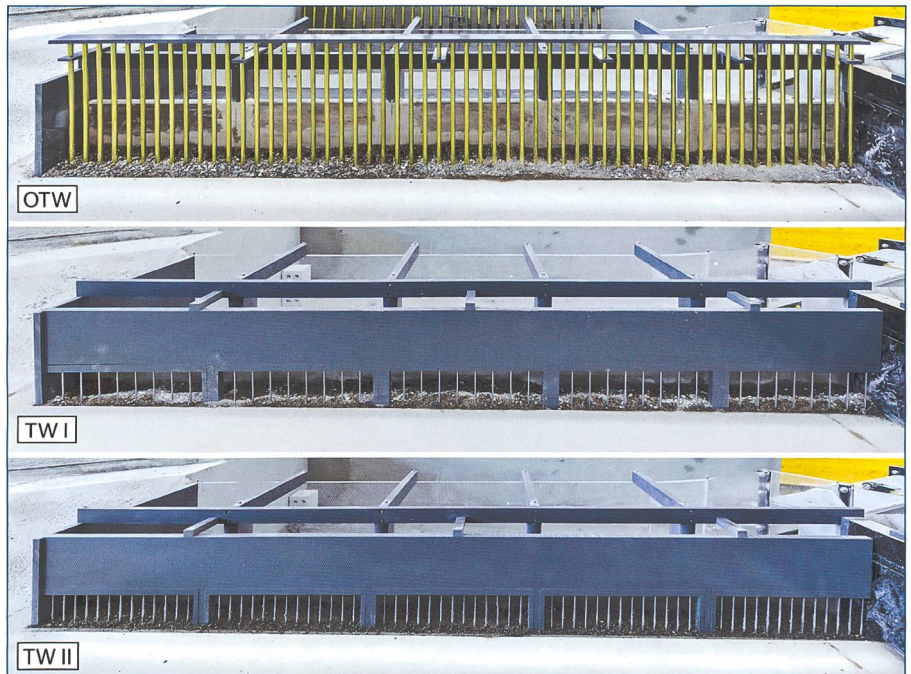


Bild 9. Ansichten Einlaufbauwerk. Oben: Variante «OTW» – Rechen ohne Tauchwand, lichter Stababstand (LSA) = 0.3 m , Stabdicke = 0.16 m . Mitte: Variante «TW I» – Rechen mit Tauchwand I, LSA = 0.5 m , Stabdicke = 0.06 m . Unten: Variante «TW II» – Rechen mit Tauchwand II, LSA = 0.3 m , Stabdicke = 0.06 m .

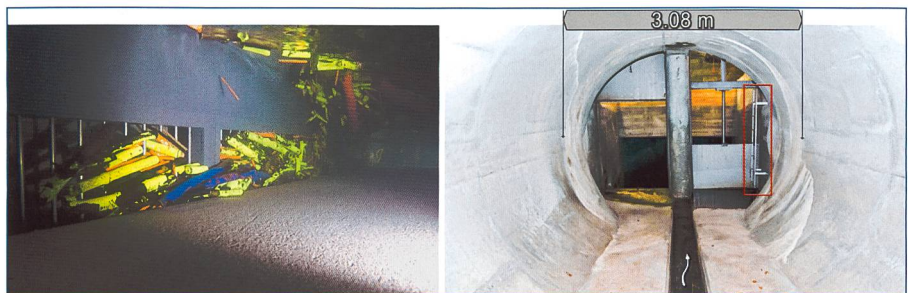


Bild 10. Links: Starke Verkläusung des Einlaufbauwerks bei einem Versuch mit Variante TW II. Rechts: Übergang des Stollens in zwei rechteckige Düker, die jeweils mit einem Schütz ausgestattet sind. Im rechten Bereich des Stollens ist eine Leiter montiert (rot markiert), welche die Verkläusungsgefahr zusätzlich erhöht.

7. Optimierung Schwemmholzrückhalt

Die Ganglinienversuche zur Prüfung des Gesamtsystems zeigten, dass das Schwemmholz zuerst im Bereich vor der Staumauer abgelagert wird und sich anschliessend von dort gegen die Fliessrichtung ein Schwemmholzteppich ausbildet. Die Geschiebefront erreicht diesen Bereich erst während eines zweiten HQ₃₀₀. Der Schwemmholzrückhalt ist somit bis zu

diesem Zeitpunkt von den Geschiebeablagernungen entkoppelt. Aus diesem Grund konnten diverse Varianten zur Optimierung des Schwemmholzrückhalts zuerst mittels stationärer HQ₃₀₀-Versuche ohne Geschiebezugabe geprüft werden. Die auf diese Weise ermittelten Lösungsansätze wurden anschliessend mit HQ₃₀₀-Ganglinienversuchen geprüft.

Im Rahmen der stationären Versuche zeigte sich, dass sowohl die Reduk-

tion des Rechenstababstands als auch die Anbringung einer Tauchwand am projektierten Grobrechen (lichter Stababstand 0.75 m, Stabdicke 0.3 m) zu einer Verbesserung des Schwemmholzrückhalts führen. Es folgte ein iterativer Prozess zur Bestimmung des optimalen lichten Rechenstababstands sowie der vertikalen Ausrichtung der Tauchwand am Grobrechen, wobei die in *Bild 9* dargestellten Bauformen entwickelt wurden.

Alle Varianten erreichten sehr gute Resultate bezüglich des Schwemmholzrückhalts, wiesen aber spezifische Vor- und Nachteile auf (*Tabelle 3*).

- Bei Variante oTW besteht besonders beim Anspringen des Bauwerks die Gefahr, dass Schwemmholz der kritischen Fraktionen in den Stollen eingetragen wird.
- Bei Variante TW I wurden noch vereinzelt Stammhölzer in den Stollen eingetragen. Diese Fraktion muss unbedingt zurückgehalten werden.
- Variante TW II erzielte die besten Resultate hinsichtlich des Schwemmholzrückhalts. Es zeigte sich jedoch eine starke Verklauungsanfälligkeit (siehe *Bild 10*) mit der Gefahr, dass die geforderte Trenncharakteristik nicht aufrechterhalten bleibt.

Die Versuchsergebnisse zeigten, dass keine der getesteten Varianten ausreichend robust ist. Der Einbau einer Tauchwand führt zu einem sehr guten Schwemmholzrückhalt, erhöht allerdings das Verklauungsrisiko (*Bild 10, links*) und infolgedessen die Gefahr der Kapazitätsreduktion des Entlastungsbauwerks. Der Verzicht auf eine Tauchwand resultiert wiederum in einem höheren Schwemmholzeintrag in den Stollen. Die aktuelle Gestaltung des Dükers (*Bild 10, rechts*) weist jedoch eine grosse Anfälligkeit für Verklauungen auf. Durch das Eintreten kritischer Fraktionen in den Stollen kann es an dieser Stelle zu massiven Schwemmholzansammlungen und in weiterer Folge zu einer starken Reduktion der Abflusskapazität kommen.

Variante	Rückhalt gr. Astholz [%]	Gemittelter Gesamtrückhalt [%]	Vor- und Nachteile
oTW	98	89	+ Robust gegen Verklauung - Fehlende Barrierewirkung
TW I	98	90	+ Barrierewirkung - Eintrag von Stammholz
TW II	99	94	+ Barrierewirkung + Bester Rückhalt - Starke Verklauungsanfälligkeit

Tabelle 3. Vergleich der erzielten Ergebnisse zum Schwemmholzrückhalt sowie der Vor- und Nachteile der drei Varianten oTW, TW I und TW II. Die kritische Fraktion Stammholz wurde, abgesehen von Versuchen mit Variante TW I, zu 100% zurückgehalten.

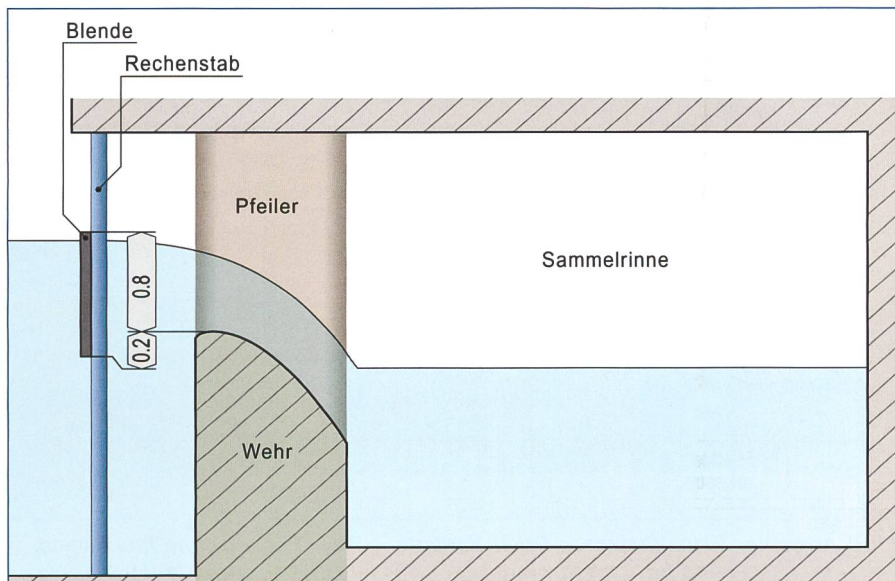


Bild 11. Querschnitt der Variante «Rechen mit Blende», Blick gegen die Fliessrichtung.



Bild 12. Ansicht des adaptierten Einlaufbauwerks der Variante «Rechen mit Blende» – LSA = 0.3 m, Stabdicke = 0.06 m.

8. Bestvariante: Rechen mit Blende

Die entwickelte Bestvariante (*Bild 11* und *Bild 12*) stellt eine Kombination der drei Varianten aus Kapitel 7 dar, die deren Vorteile zur Erhöhung der Systemrobustheit vereint. Durch den Einbau einer verkürzten Tauchwand (Blende) wird die Rechenfläche im Vergleich zu den Varianten TW I und TW II deutlich vergrössert (+ 47 %). Dies führt zu einer höheren Robustheit des Systems gegenüber Verklauungen. Die Funktion der

Tauchwand, den Schwemmholzeintrag beim Anspringen des Streichwehrs auch bei nicht verlegtem Rechen zu verhindern, bleibt bei der Variante «Rechen mit Blende» erhalten. Der Eintrag von Stammholz wird durch den lichten Rechenstababstand von 0.3 m (analog zu oTW und TW II) verhindert.

8.1 Prüfung Gesamtsystem

Erste Prüfungen mittels stationärer HQ₃₀₀-Versuche bestätigten die Verbesserung des Schwemmholzurückhalts bei gleichzeitiger Reduktion der Nachteile der zuvor getesteten Varianten. Die kritischen Fraktionen Stammholz und grosses Astholz wurden vollständig zurückgehalten, der Gesamtrückhalt lag bei 88 %. Die Bilder der Unterwasserkameras (Bild 13) zeigen die deutlich reduzierte Verklauungsanfälligkeit. Diese Ergebnisse konnten mit den Ganglinienversuchen (HQ₃₀+HQ₃₀₀) bestätigt werden (Rückhalt von grossem Astholz > 99 %, Gesamtrückhalt 87 %). Im Vergleich zu Variante TW II verdoppelte sich somit der Gesamteintrag. Aufgrund der signifikant gesteigerten Robustheit wurde die Variante «Rechen mit Blende», trotz dem reduzierten Gesamtrückhalt, als Bestvariante weiterverfolgt und im Rahmen von Überlastversuchen vertiefend geprüft.

8.2 Überlastfall

Als Überlastfälle wurden folgende Szenarien im Modell untersucht:

- HQ₃₀ ohne Schwemmholzentnahme + HQ₃₀₀
- (HQ₃₀ ohne Schwemmholzentnahme + HQ₃₀₀) bei Verschluss von drei der fünf Wehrfelder (n-3)
- HQ₁₀₀₀

Der Eintrag der kritischen Fraktion grosses Astholz konnte bei allen Überlastszenarien weitestgehend unterbunden werden (Rückhalt > 94 %). Stammholz wurde zu 100 % zurückgehalten. Der Gesamtrückhalt war stabil (> 86 %), solange der Wasserspiegel im Rückhalteraum unterhalb der Blendenoberkante lag und somit die Barrierewirkung gegeben war. Auch bei der Reduktion der durchflossenen Rechenfläche um 60 % (n-3) kam es zu keiner Beeinträchtigung der Systemfunktionalität. Der geforderte Maximalabfluss in das Stadtgebiet wurde nur unwesentlich überschritten (2.8 m³/s anstatt 2.5 m³/s) (vgl. Kapitel 6.1).

Basierend auf diesen Ergebnissen, wurde die Variante «Rechen mit Blende» als Bestvariante für die Umsetzung im Hochwasserschutzprojekt «Einlaufbauwerk Würzenbachstollen» gewählt.

9. Hydraulische Optimierungen

Der Stollen wurde in der ursprünglichen Projektierung von 1978 auf einen Maximalabfluss von rund 27 m³/s dimensioniert. Im neuen Hochwasserschutzprojekt wird dessen Abflusskapazität bei der Spitze des HQ₃₀₀ somit leicht (um ca. 1 m³/s) und während des Spitzenabflusses des HQ₁₀₀₀ von rund 39 m³/s deutlich (um ca. 9 m³/s) überschritten. Um das Schadenpotenzial oder gar das Versagensrisiko des Stollens bis zum HQ₁₀₀₀ zu minimieren, wurden grundlegende hydraulische Untersuchungen für die drei Bereiche Sammelrinne, Beschleunigungsstrecke und Stollen (Bild 14) im Rahmen stationärer Versuche durchgeführt.

9.1 Optimierung Sammelrinne

Die Sammelrinne wurde mit einer konstanten Breite von 5 m projektiert. Die Untersu-

chungen zeigten, dass deren Abflusskapazität beim Spitzenabfluss des HQ₃₀₀ nicht ausgenutzt wird. Durch eine Reduktion der Breite oberstrom auf 2.5 m und eine konische Aufweitung auf 4.5 m (Bild 15) kann die Sammelrinne derart optimiert werden, dass die Kapazitätsgrenze während des Spitzenabflusses des HQ₁₀₀₀ erreicht wird. Weiterhin kann hierdurch die für Sammelrinnen charakteristische Rotationsströmung erzeugt werden. Neben der hydraulischen Optimierung führt diese Anpassung ebenfalls zu einer Reduktion der Baukosten.

9.2 Optimierung Beschleunigungsstrecke

Ab Ende der Sammelrinne bis in den Stollen kam es zur Ausbildung von Stosswellen, die den Wasserspiegel lokal erhöhten. Der lokal erhöhte, schwankende Wasserspiegel er-

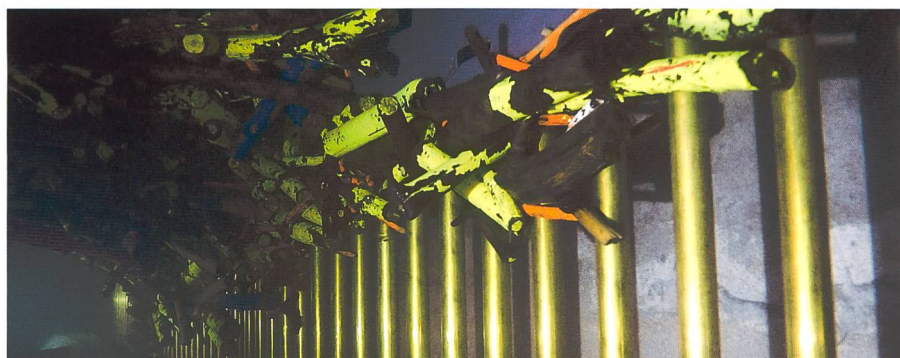


Bild 13. Im Vergleich zu Variante TW II (vgl. Bild 10) deutlich reduzierte Verklauungsanfälligkeit der Bestvariante «Rechen mit Blende». Blick gegen die Fließrichtung.

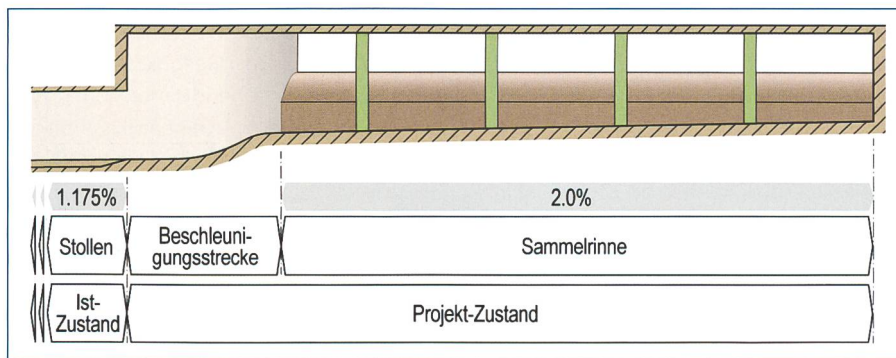


Bild 14. Längsschnitt der Sammelrinne und der Beschleunigungsstrecke. Flussrichtung von rechts nach links.



Bild 15. Strömungsbild in der Sammelrinne mit Rotationsströmung und Luftschlauch im Wirbelkern während des Spitzenabflusses des HQ₃₀₀.

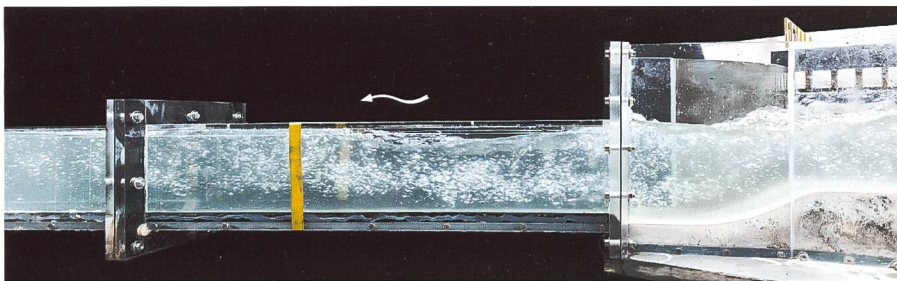


Bild 16. Strömungsbild mit Stosswellen im Bereich der Beschleunigungsstrecke und des Stolleneinlaufs sowie stirnseitiges Anschlagen am Stolleneinlauf bei HQ₃₀₀.

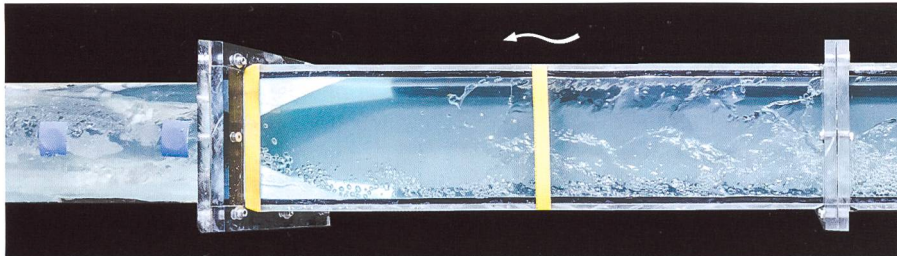


Bild 17. Sicht auf den Stollen im Bereich des Übergangs von Rechteck- auf Kreis-segmentstollen bei HQ₃₀₀.

zeugte beim Spitzenabfluss des HQ₃₀₀ ein regelmässiges stirnseitiges Anschlagen am Stolleneinlauf (Bild 16). Optimierungen, die zu einer Reduktion der Stosswellen führten, resultierten jedoch in der Entstehung eines ausgeprägten Wechselsprungs im Rechteckstollen. Da es im Bereich des Wechselsprungs zu einer höheren dynamischen Belastung kommt, wird gemäss HZP auf Anpassungen der Beschleunigungsstrecke verzichtet. Es ist lediglich am Stolleneinlauf eine Ausrundung vorgesehen, um die Energieverluste durch das stirnseitige Anschlagen zu reduzieren.

9.3 Optimierung Stollen

Eine freie Luftzirkulation im Stollen ist insbesondere bei hohen Teilfüllungsgraden relevant und eine Voraussetzung für kontrollierte Abflussverhältnisse, welche frei von Pulsationen und grossen hydrodynamischen Belastungen der Stollenauskleidung sein sollen. Im Bereich des Spitzenabflusses des HQ₃₀₀ wurde im Stollen der Übergang von Teil- zu überdruckloser Vollfüllung beobachtet. An der Decke des Rechteckstollens entwickelte sich eine elongierte Blasenströmung (Bild 16 und Bild 17). Beim Spitzenabfluss des HQ₁₀₀₀ lag über die gesamte Länge des Rechteckstollens Vollfüllung vor. Der Luftbedarf der Strömung konnte bei beiden Abflüssen durch das offene Stollende im hydraulischen Modell gedeckt werden. In Natur wird der Stollen auf einer Länge von über 1 km weitergeführt. Im Ausführungsprojekt wird daher ein zusätzlicher Belüftungsschacht zur Sicherstellung einer ausreichenden Belüftung und

zur Gewährleistung kontrollierter Abflussverhältnisse vorgesehen.

10. Fazit

Durch die an der VAW durchgeführten hydraulischen Modellversuche konnten die Dimensionierung des Vorprojekts und die Zweckmässigkeit der geplanten Umbauten bestätigt werden. Die für den Hochwasserschutz Luzerns zwingend einzuhaltende Trenncharakteristik war bei sämtlichen untersuchten Szenarien inklusive der Überlastfälle stabil. Der Geschieberückhalte- raum wurde ausreichend dimensioniert, um die Geschiebefrachten eines HQ₃₀₀- mit anschliessendem HQ₃₀₀- sowie eines HQ₁₀₀₀- Ereignisses auffangen zu können, ohne dass es zum Eintrag von Geschiebe in den Stollen kommt. Im Ausführungsprojekt wird daher ein zusätzlicher Belüftungsschacht zur Sicherstellung einer ausreichenden Belüftung und zur Gewährleistung kontrollierter Abflussverhältnisse vorgesehen.

Der mit dem Einlaufbauwerk gemäss dem Vorprojekt erzielte Schwemmholzurückhalt von rund 75 % war für die Sicherstellung der Systemfunktionalität jedoch unzureichend. Mit der Bestvariante «Rechen mit Blende» konnte ein – auch im Überlastfall überwiegend stabiler – Gesamtrückhalt von rund 87 % erzielt werden. Der Rückhalt der für Verklausungen kritischen Fraktionen grosses Astholz und Stammholz konnte auf 99 % und im Überlastfall auf mindestens 94 % optimiert werden.

Infolge der hydraulischen Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass bei Sicherstellung einer ausreichenden Belüf-

tung bis zum HQ₁₀₀₀ keine kritischen Strömungszustände im Einlaufbauwerk oder im Stollen auftreten. Ebenso konnten Optimierungen bei der Ausgestaltung der Sammelrinne ermittelt werden, die sich positiv auf die Baukosten auswirken.

Die im Rahmen der Modellversuche konzipierten Anpassungen ermöglichen, das Projekt entscheidend zu optimieren und zu einem gesamtheitlich robusten System weiterzuentwickeln.

Literatur

- Desserich, M. (1980). Hochwasser-Entlastungsstollen Würzenbach Luzern: technischer Betrieb und hydraulische Probleme. Schweizer Ingenieur und Architekt 35.
- Kanton Luzern (2013). Planungsbericht des Regierungsrates an den Kantonsrat – über den Schutz vor Naturgefahren in den Jahren 2014–2016. Luzern. https://www.lu.ch/downloads/lu/kr/botschaften/2011-2015/b_092.pdf, Stand: 26.04.2019.
- oeko-b (2015). Unwetter 7. Juni 2015, Kanton LU, Ereignisdokumentation, Fotodokumentation. Schüpfheim (unveröffentlicht).
- Pfaundler, M., Schönenberger, U., BAFU, 2013: Datensatz MQ-GWN-CH, modellierte mittlere natürliche Abflüsse für das Gewässernetz der Schweiz.
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gaertner, V., Perret, F., Stoffel, M. (2016c). Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers. *Catena* (140): 182–194.
- Scherrer AG (2016). Überprüfung der hydrologischen Grundlagen für den Würzenbach und den Mühlebach (Adligenswil). Reinach. Bericht 16/214. https://vif.lu.ch/-/media/VIF/Dokumente/Download/Hydrologiestudien/Adligenswil_Wuerzenbach_Muehlebach_NOV2016.pdf?la=de-CH. Stand: 26.04.2019.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Beauftragung und Finanzierung des Projekts durch die Dienststelle Verkehr und Infrastruktur des Kantons Luzern sowie bei dem Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner für die gute und zielgerichtete Zusammenarbeit.

Anschrift der Verfasser

- Isabel Röber, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, roeber@vaw.baug.ethz.ch
- Florian Hinkelammert-Zens, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, hinkelammert-zens@vaw.baug.ethz.ch
- Dr. Volker Weitbrecht, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch