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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 102 (2010)

Heft: 4

Artikel: Modelluntersuchungen zum Einlaufbauwerk und zur Kapazität des Hochwasser-Entlastungsstollens in Lyss

Autor: Rühli, Esther / Pfister, Michael / Lais, Adriano

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941669

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Modelluntersuchungen zum Einlaufbauwerk und zur Kapazität des Hochwasser-Entlastungsstollens in Lyss

Esther Rühli, Michael Pfister, Adriano Lais

Zusammenfassung

Um die Hochwassersicherheit der Gemeinde Lyss (BE) zu verbessern, ist zurzeit ein 2.5 km langer Entlastungsstollen im Bau. Sein Einlaufbauwerk fasst ein Hochwasser oberstrom von Lyss und führt es in gestreckter Linienführung zum Auslaufbauwerk unterstrom der Gemeinde. Mit einem regulierten Drosselwehr wird der Wasserabfluss bei Hochwasser im Siedlungsgebiet massiv reduziert und dem Entlastungsstollen zugeführt. Im Rahmen der Detailprojektierung durch den Kanton Bern wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) physikalische Modelluntersuchungen zur hydraulischen Optimierung des Gesamtkonzepts mit Drosselwehr, Einlaufbauwerk und Entlastungsstollen durchgeführt. Der Artikel beschreibt die Strömungssituation im Zulaufbereich, Einlaufbauwerk und Stollen für den Ausgangsentwurf und den erarbeiteten Ausführungsvorschlag.

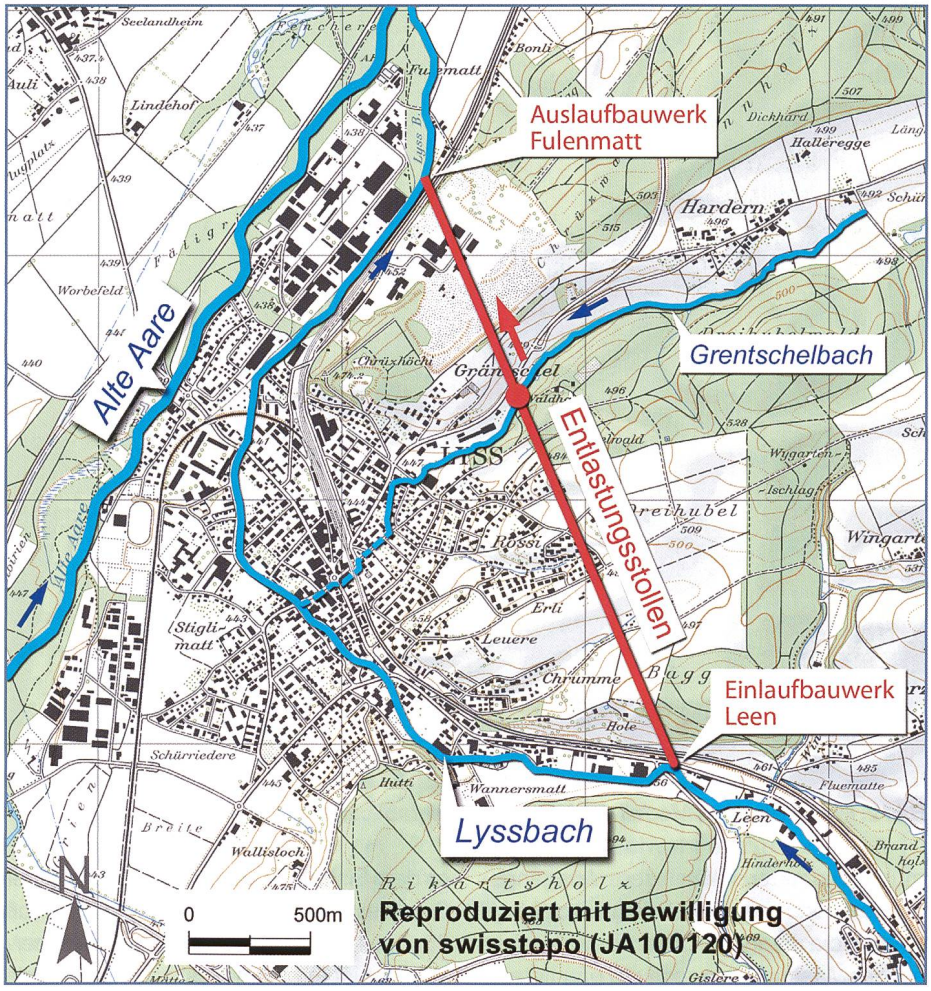


Bild 1. Projektgebiet mit dem geplanten Entlastungsstollen.

1. Einleitung

Die Gemeinde Lyss im bernerischen Seeland wurde in Vergangenheit wiederholt von Hochwassern des Lyssbachs überflutet. Allein im Sommer 2007 traten bei Starkniederschlägen drei Schadensereignisse auf. Ursache für die Überflutungen sind Kapazitätsengpässe des Gerinnes, einerseits verursacht durch eine dichte Besiedlungsstruktur im Dorf und anderseits durch enge Durchlässe unter Brücken. Da eine Kapazitätserhöhung des Gerinnes im Dorf technisch und finanziell zu aufwändig ist, wird künftig ein Entlastungsstollen die Hochwassergefahr am Lyssbach nachhaltig bannen *(Bild 1)*. Im Hochwasserfall wird über das Bachbett des Lyssbachs nur ein reduzierter Abfluss abgegeben, wozu ein reguliertes Drosselwehr errichtet wird.

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurde vom Tiefbauamt (TBA) des Kantons Bern, vertreten durch den Oberingenieurkreis III, beauftragt, Modellversuche zum Lyssbachstollen durchzuführen (VAW 2010). Die Notwendigkeit dafür ergab sich einerseits durch die mannigfachen komplexen hydraulischen Verhältnisse beim Drosselwehr und Einlaufbauwerk zum Stollen, da das Strömungsgeschehen an dieser Stelle von Rezirkulationen geprägt ist. Anderseits erzwingen die topographischen Verhältnisse und die Notwendigkeit der Unterquerung des Trassees der Bahnlinie Bern-Lyss im Einlaufbereich, den Stollen annähernd im hydraulisch kritischen Gefälle zu neigen, was bei knapper Bemessung ein Zuschlagen infolge stehender Wellen bewirken kann. Diese Gefahr ist insbesondere dadurch hoch, dass bei Hochwasser ein Nebenbach des Lyssbachs, der Grentschelbach, nach zwei Dritteln der Stollenstrecke über einen Vertikalschacht in den darunter liegenden Stollen eingeleitet wird. Diese Einleitung vermag die Strömung mit relativ kleinen Froudezahlen $0.9<F<1.5$ empfindlich zu stören.

Der vorliegende Artikel beschreibt den im Modell erarbeiteten Ausführungsvorschlag sowie ausgesuchte hydraulische Phänomene. Vergleiche der Strö-

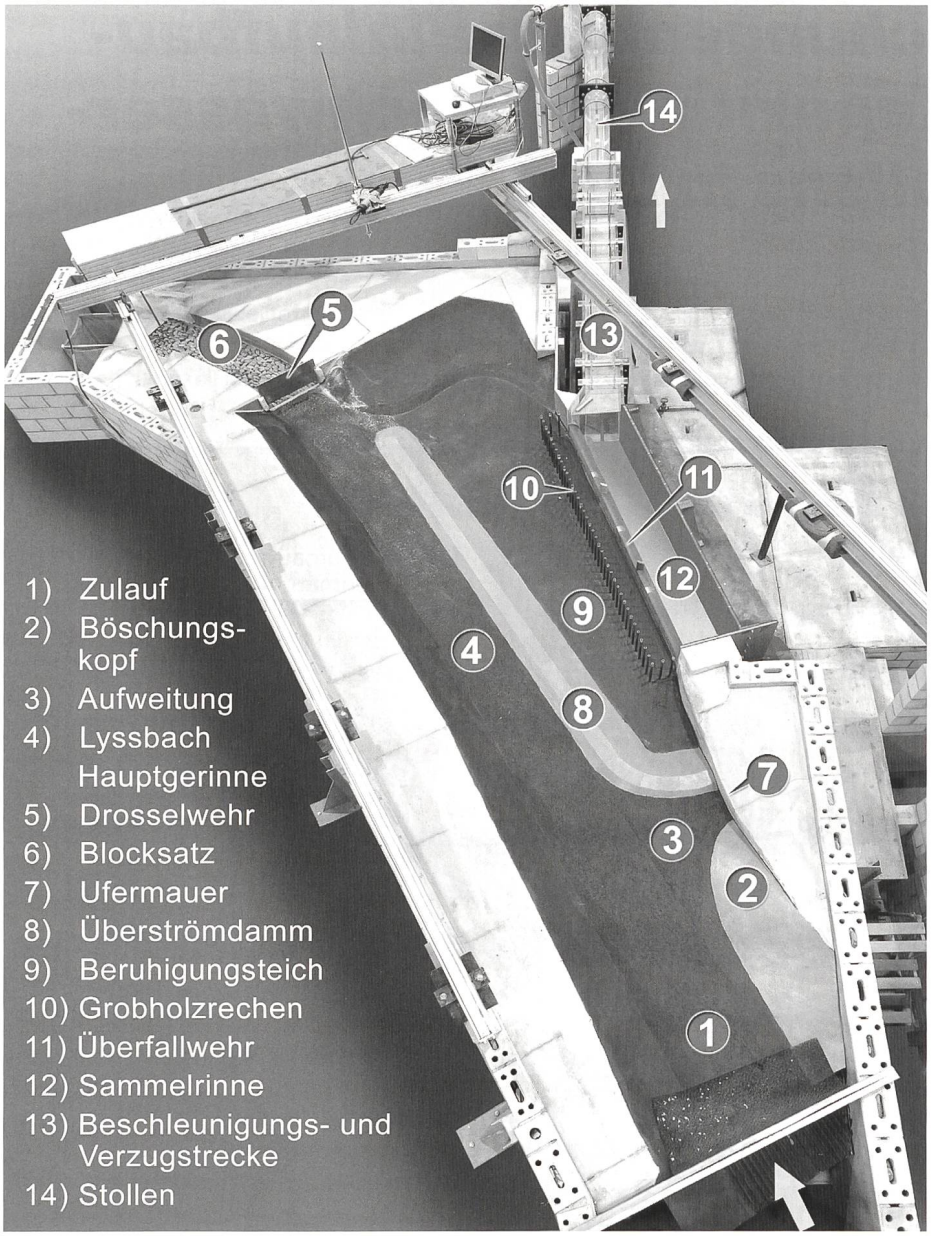


Bild 2. Physikalisches Modell der VAW im Massstab 1:16.

mungscharakteristiken des Ausgangsentwurfs und des Ausführungsvorschlags zeigen die hydraulischen Auswirkungen einiger Massnahmen.

2. Projekt

2.1 Übersicht

Das Einlaufbauwerk zum Entlastungsstollen ist im Ortsteil Leen eingangs der Gemeinde Lyss geplant und hat sich den engen Platzverhältnissen zwischen der Wiler- und der Bernerstrasse anzupassen. Bei Hochwasser wird der Lyssbach durch die Regulierschütze des Drosselwehrs gestaut, der Abfluss nach Lyss gedrosselt und der Grossteil des Abflusses durch den 2.5 km langen Stollen entlastet *(Bild 2)*. Durch den Aufstau wird die Strömung rechtsseitig über einen überströmbaren Damm aus dem Hauptgerinne in einen Beruhigungsteich geleitet, wonach es dem Einlaufbauwerk des Stollens, einer Sammelrinne mit seitlichem Überfall von 35.8 m Länge, zufliesst. Vor dem Überfallwehr ist in einem Abstand von 3 m ein Grobholzrechen angeordnet. Das System von reguliertem Drossel- und festem Überfallwehr wird im Folgenden auch als Trennbauwerk benannt.

Die Sammelrinne weist ein Rechteckprofil mit einer Breite von 4.68 m und ein Längsgefälle von 8‰ auf. Unterstrom der Sammelrinne ist eine 57 m lange und 4.40 m breite Beschleunigungsstrecke mit drei Gefällestufen angeordnet. Ihre Längsachse ist im Grundriss um 17° zur Sammelrinne abgewinkelt. Auf den letzten 20 Metern wird das Rechteckprofil der Beschleunigungsstrecke bei einem Gefälle von 4% auf das Kreisprofil des Stollens verzogen. Der Entlastungsstollen wird gemäss Unternehmervorschlag mit einem Innendurchmesser von 4.40 m mit Spritzbetonauskleidung und einem Bankett errichtet und weist ein Gefälle von 5.6‰ auf. Unterstrom des Stollens schliesst das Auslaufbauwerk Fulenmatt mit Tosbecken an.

Nach zwei Dritteln der Stollenstrecke erfolgt die Einleitung des Hochwasseranteils des Grentschelbachs im Firstbereich des Stollens.

Bei Niederwasser fliesst der Lyssbach ungehindert durch das Drosselwehr nach Lyss; der Beruhigungsteich ist dabei knietief geflutet.

2.2 Hydrologie, Dimensionierungsabfluss und Regulierung im Hochwasserfall

Der Hochwasserschutz für Lyss wird auf ein 100-jährliches Hochwasser entsprechend einem Zufluss von $HQ_{100} = 42.6\ m^3/s$ aus dem Lyssbach ausgelegt. Der Entlastungsstollen soll aber auch die Abfuhr eines Extremhochwassers EHQ sicherstellen. Das EHQ wird aus einer Multiplikation des HQ_{100} mit dem Faktor 1.5 abgeleitet und beträgt für den Lyssbach im Projektgebiet 63.9 m^3/s.

Für den Fall einer Verklausung der Regulierschütze muss die Hochwasserabfuhr allein durch den Stollen erfolgen. Die Sammelrinne, die Beschleunigungsstrecke und der Stollen müssen folglich im Extremfall das gesamte EHQ aufnehmen können. Der Dimensionierungsabfluss des Stollens beträgt, um das EHQ des Grentschelbachs von 5.1 m^3/s erhöht, somit 69.0 m^3/s.

Abflüsse, die kleiner sind als die maximale Abflusskapazität des Gerinnes im Dorf von 17 m^3/s, sollen voraussichtlich weiterhin komplett durch das Siedlungsgebiet geleitet werden.

Bei höheren Zuflüssen wird der Abfluss nach Lyss auf maximal 17 m^3/s begrenzt, im Fall eines Starkregens in Lyss muss auf 5 m^3/s gedrosselt werden, um im Lyssbach noch genügend Kapazität für die Aufnahme des Regenwassers verfügbar zu halten.

3. Hydraulische Modellversuche

3.1 Physikalisches Modell der VAW

Die VAW wurde beauftragt, das geplante Trennbauwerk – bestehend aus einer kurzen Fliessstrecke des Lyssbachs, dem Drosselwehr mit Regulierschütze, dem Beruhigungsteich und dem Überfallwehr – sowie die Sammelrinne, die Beschleunigungs- und Verzugsstrecke, 170 m des Stollens und die Einleitung des Grentschelbachs in den Stollen hydraulisch zu mo-

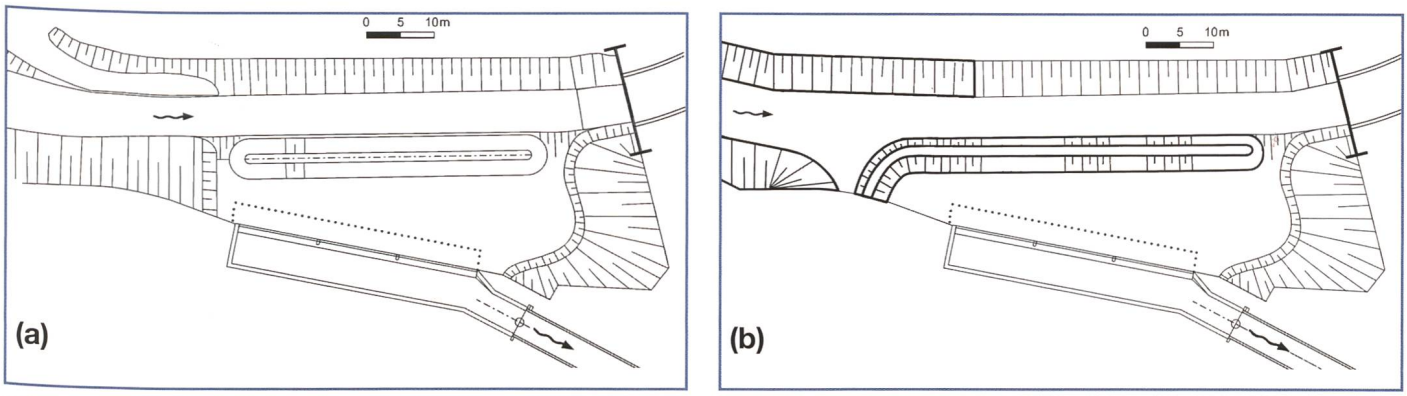


Bild 3. Schematischer Grundriss des Trennbauwerks, (a) Ausgangsentwurf und (b) Ausführungsvorschlag.

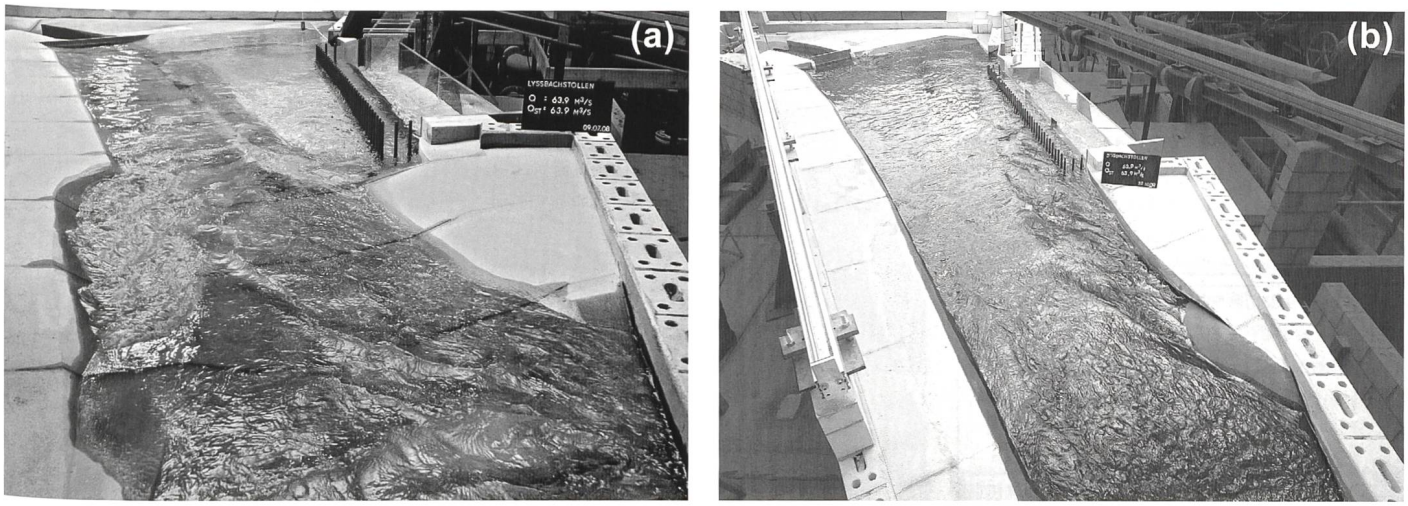


Bild 4. Strömungsbild beim Einlaufbauwerk bei EHQ mit geschlossenem Drosselwehr, (a) Ausgangsentwurf und (b) Ausführungsvorschlag.

dellieren *(Bild 2)*, die Funktionstüchtigkeit dieses Systems zu überprüfen und allenfalls unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen zu optimieren. Die geometrische Abbildung des strömungsrelevanten Projektgebiets erfolgte grösstenteils im Massstab 1:16. Erschwerend kam während der laufenden Untersuchung hinzu, dass sich der im Ausgangsentwurf angesetzte Innendurchmesser von 4.0 m mitunter aus hydraulischen und der Stollenausbau gemäss Unternehmervorschlag aus baulichen Gründen änderten. Beides hatte Einfluss auf die Modelluntersuchung. Anstatt den Modellstollen aus Acrylglas zu ersetzen, wurde in Abstimmung mit dem Kunden der geometrische Modellmassstab der Beschleunigungsstrecke und des Stollens angepasst (1:17.12) und ein fiktiver Stollendurchmesser von 4.28 m angesetzt. Der Massstabswechsel ist modelltechnisch zulässig, da sich die Strömungsverhältnisse in der Beschleunigungsstrecke und im Stollen und das Strömungsgeschehen in der Sammelrinne nicht gegenseitig beeinflussen, weil für Abflüsse bis zum Dimensionierungshochwasser ein Fliesswechsel zwischen Sammelrinne und Beschleunigungsstrecke auftritt. Der um 0.12 m grössere Prototyp-Stollendurchmesser soll gemäss einer Vorgabe des Kunden die erhöhten kontinuierlichen Strömungsverluste infolge der rauen Wandbeschaffenheit des Spritzbetons kompensieren. Im Modellstollen werden die Strömungsverhältnisse unverzerrt für eine äquivalente Sandrauhigkeit von 1.2 mm und einen fiktiven Stollendurchmesser von 4.28 m abgebildet.

3.2 Fragestellungen

Von zentralem Interesse sind u.a. folgende Aspekte:

- Trenncharakteristik des Trennbauwerks
- Anspringen der Entlastung in Funktion des Betriebs der Regulierschütze
- Breite des Drosselwehrs
- Lage der Krone des Überfallwehrs
- Kontur und Standort des Überströmdamms sowie der Furten ober- und unterstrom davon
- Abflusscharakteristik des Überfallwehrs
- Abflusskapazität der Sammelrinne
- Einleitung der Strömung in den Stollen unter Berücksichtigung von Stosswellen bei schiessendem Abfluss und der freien Luftzirkulation
- Abflusskapazität des Entlastungsstollens
- Luftzirkulation im Stollen, Notwendigkeit von Belüftungseinrichtungen
- Einleitung des Grentschelbachs in den Entlastungsstollen
- Verhalten des Bauwerks im Überlastfall

3.3 Drosselwehr und Trenncharakteristik

Das Drosselwehr wird mit einer regulierbaren Hubschütze ausgestattet. Seine Gestalt und die Kronenhöhe des Überfallwehrs bestimmen die Trenncharakteristik der Teilabflüsse und legen somit fest, bei welchem Zufluss der Entlastungsstollen spätestens in Betrieb geht. Bei vollständig geöffnetem Drosselwehr soll die Entlastung erst bei einem Zufluss von ungefähr 17 m^3/s selbständig anspringen. Dieser Abfluss tritt durchschnittlich etwa einmal pro Jahr auf und entspricht der maximalen Abflusskapazität des Lyssbachgerinnes im Siedlungsgebiet. Ein häufigeres selbständiges Anspringen der Entlastung bei kleineren Zuflüssen ist aufgrund der Unterhaltskosten nicht erwünscht. Durch Regulierung des Drosselwehrs kann die Entlastung aber auch bei kleineren Zuflüssen jederzeit in Betrieb genommen werden.

Der Ausgangsentwurf sah zu

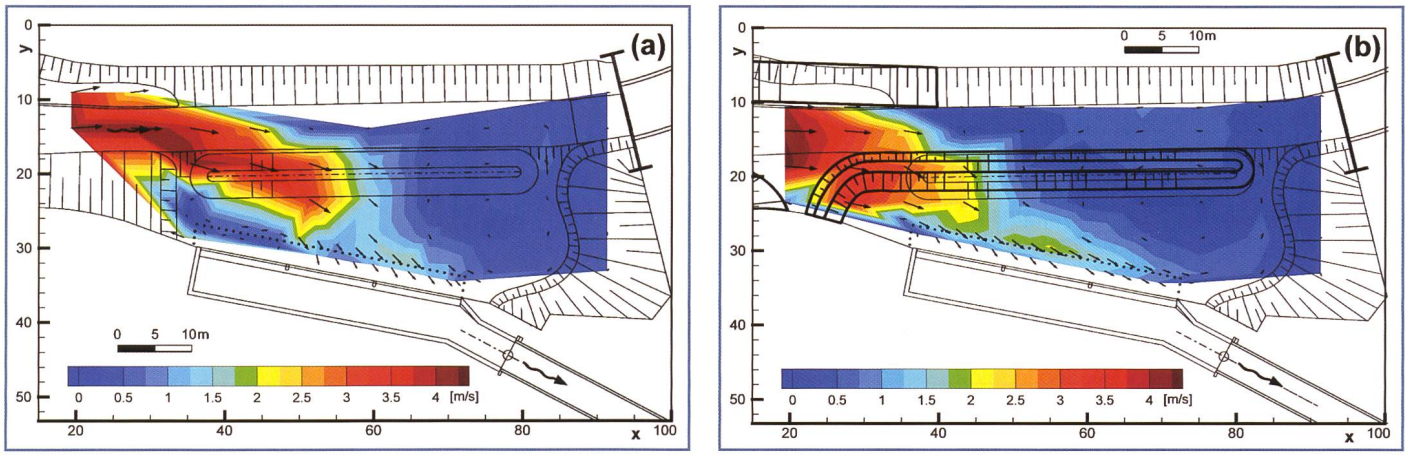


Bild 5. Horizontales Geschwindigkeitsfeld im Lyssbach und Beruhigungsteich bei EHQ mit geschlossenem Drosselwehr, (a) Ausgangsentwurf und (b) Ausführungsvorschlag.

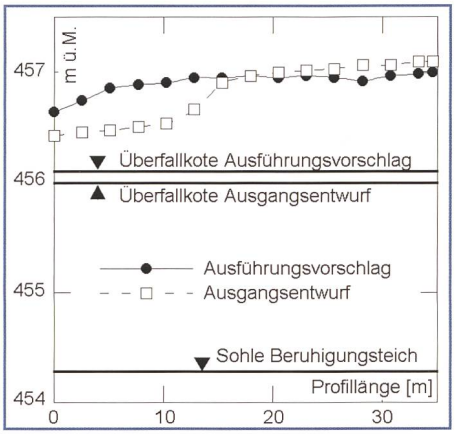


Bild 6. Wasserspiegellagen entlang des Überfallwehrs für EHQ mit geschlossenem Drosselwehr.

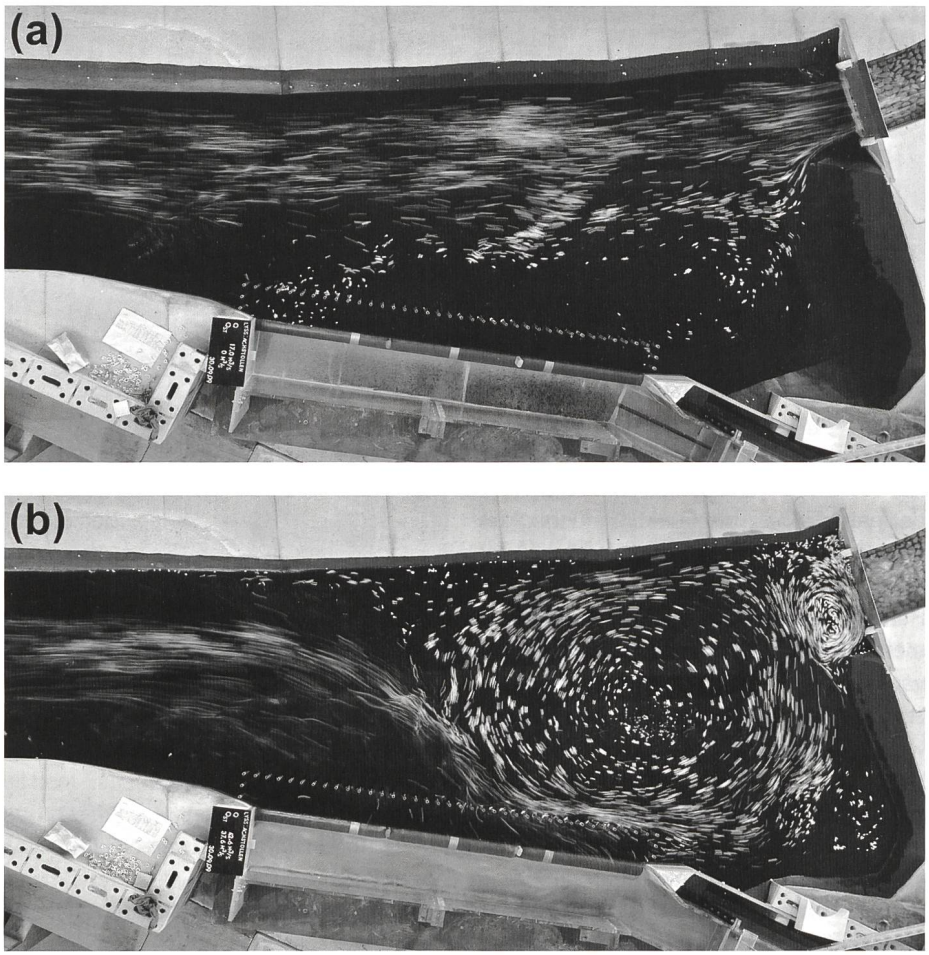


Bild 7. Oberflächenströmung bei einem Abfluss von (a) 17 m³/s (die Entlastung ist gerade nicht in Betrieb) und (b) HQ_{100} mit offener Drossel (5 m³/s), beide für den Ausführungsvorschlag.

Gunsten einer möglichst kleinen Regulierschütze eine Breite des Drosselwehrs von 4 m vor, wogegen die typische Sohlenbreite des Lyssbachs 6 bis 9 m beträgt. Das Drosselwehr engt das Gerinne folglich auch bei voll gezogener Schütze ein und erzeugt einen ausgeprägten Rückstau. Die Entlastung springt im Modellversuch dann bereits bei einem Zufluss von ca. 9 m³/s an. Durch eine Verbreiterung der Drossel auf 7 m (entsprechend der Breite des Durchlasses unter der nachfolgenden Brücke), der strömungstechnisch günstigen Profilform der Randpfeiler und einer Anhebung der Krone des Überfallwehrs um 10 cm auf 456.10 m ü.M. wird der Lyssbach im Ausführungsvorschlag wie gefordert ab 17 m³/s entlastet.

3.4 Zulauf und Beruhigungsteich

Im Einlaufbereich zum Stollen müssen sowohl für Hoch- als auch für Niederwasser hydraulisch günstige Strömungsverhältnisse erarbeitet werden. Bei Hochwasser soll das Überfallwehr möglichst homogen und frontal angeströmt werden. Dagegen soll der Lyssbach bei Niederwasser durch das Trennbauwerk möglichst unbeeinflusst in seinem Hauptgerinne abfliessen. Die Strukturvielfalt des Gewässers ist dabei zu gewährleisten, an einen Einstau gekoppelte Sedimentationen sind zu verhindern. Um beiden Anforderungen Rechnung zu tragen, sieht der Ausgangsentwurf den Aushub eines rechtsseitig angeordneten Beruhigungsteichs vor *(Bild 3a)*. Das rechte Ufer des Lyssbachs wird im Bereich des Teichs als überströmbarer Damm gestaltet, wobei die Dammkrone deutlich tiefer als das den Teich umgrenzende Gelände liegt. Je ein Durchbruch resp. eine Furt ober- und unterstrom des Dammes ermöglichen die Flutung des Beruhigungsteichs, was die Belastung der Sohle beim Überströmen des Damms zu Beginn eines Hochwassers reduziert. In der linken Uferböschung dient eine Berme als Fahrweg für Unterhaltsarbeiten.

In Bezug auf die Sicherstellung der geforderten gleichmässigen Anströmung des Überfallwehrs bei Hochwasser zeigen sich im Ausgangsentwurf Defizite. Der

leicht schiessende Zufluss folgt der abrupten Öffnung des Bachbetts bei der oberen Furt nicht und löst von der Böschung ab. Es folgt eine Strömungskonzentration auf die zweite, unterstrom gelegene Hälfte des Überfallwehrs, wie der Oberflächenstruktur und dem horizontalen Geschwindigkeitsfeld zu entnehmen ist (*Bild 4a* und *5a*). Im Strömungsschatten des zurückspringenden Ufers dreht im oberen Bereich des Beruhigungsteichs eine Walze im Uhrzeigersinn vor dem Überfallwehr. Infolge der Walzenbewegung wird dieser Bereich des Überfallwehrs durch eine schwache Rückströmung versorgt. Der Wasserspiegel liegt ca. 0.5 m niedriger als entlang der unterstrom gelegenen Hälfte des Überfallwehrs *(Bild 6)*. Damit einhergehend wird nur ein kleiner Teilstrom in den oberen Bereich der Sammelrinne entlastet.

Der Fuss des Überströmdamms wird durch einen langgestreckten Wechselsprung hydrodynamisch belastet, was in Kombination mit einer beweglichen Sohle Kolkungen begünstigt. Erosionstechnisch ebenfalls ungünstig sind die horizontalen Wirbel in der turbulenten Scherschicht, die sich linksseitig im Bereich der Berme ausbilden und auf das Bachbett einwirken.

Um eine gleichmässigere Anströmung des Überfallwehrs zu erreichen, wurden der Zulauf und der Beruhigungsteich mithilfe des Modells in einem umfangreichen Optimierungsprozess angepasst. *Bild 3b* zeigt den Ausführungsvorschlag. Folgende Massnahmen werden ergriffen:

(1) Rechtsseitige Aufweitung des Zulaufs 30 m oberstrom des Einlaufbauwerks
(2) Aufhebung der oberen Furt
(3) Verlängerung, Senkung und Anbindung des Überströmdamms an das rechte Ufer
(4) Anordnung einer rechtsseitigen, vertikalen Ufermauer
(5) Aufhebung der Berme im Zulaufbereich

Die Massnahme (1), wozu die Furt (2) aufzuheben ist und eine Einlaufmauer (4) benötigt wird, reduziert die Fliessgeschwindigkeiten und ermöglicht die Auffächerung der Strömung seitlich nach rechts. Dadurch strömt das Wasser bereits zu Beginn des Beruhigungsteichs in Richtung Überfallwehr (*Bild 4* und *Bild 5*). Durch das Abdrehen und den Anschluss des Überströmdamms an die rechte Ufermauer (3) kann der Überströmdamm zusätzlich gezielt als Leitbauwerk eingesetzt werden, da er in solcher Gestaltung analog zu einer Lenkbuhne wirkt. Der Überfall wird schräg, aber dennoch relativ gleichmässig auf seiner ganzen Länge angeströmt *(Bild 6)*. In guter Näherung wird die Abflusscharakteristik eines frontal angeströmten Überfalls erreicht; die mittleren, gemessenen Überfallhöhen können rechnerisch verifiziert werden. Der maximale Wasserspiegel im Beruhigungsteich konnte trotz der Anhebung der Überfallkrone um 10 cm im Vergleich zur Ausgangsvariante leicht gesenkt werden, was auf ein effizientes Abflussregime des Überfallwehrs und der Sammelrinne hinweist.

Die mit den ergriffenen Massnahmen erreichte Umlenkung der Strömung zum Überfall hin ist aber auch auf den Einstau und damit auf eine starke Drosselung des Lyssbachs angewiesen. Bei schwacher Drosselung fliesst der Lyssbach, insbesondere bei ansteigendem Hochwasser, im Hauptgerinne bis vor das Drosselwehr und wird erst bei der unteren Furt nach rechts der Entlastung zugeführt.

Die Krone des Überströmdamms weist in der optimierten Variante dasselbe Längsgefälle wie das Hauptgerinne auf und liegt mit ca. 0.45 m über dessen Sohle etwas niedriger als im Ausgangsentwurf. Die Kombination aus dem niedrigeren Damm und der gleichmässigeren Überströmung führt zu geringeren Strömungsturbulenzen. Anstelle eines voll ausgeprägten Wechselsprungs tritt nun lediglich bei EHQ ein ondulierender Wechselsprung über dem Damm auf *(Bild 4b)*.

Bild 7 zeigt die Oberflächenströmung. Bei Abflüssen bis 17 m^3/s, bei denen der Wasserspiegel zwar über der Dammkrone, aber unterhalb der Krone des Überfallwehrs liegt und der Entlastungsstollen folglich nicht in Betrieb ist, fliesst der Lyssbach in seinem Hauptgerinne ab. Bei starker Drosselung eines Hochwassers wird die Strömung jedoch in Richtung Überfallwehr umgelenkt. Im Beruhigungsteich bildet sich dann eine grossräumig im Gegenuhrzeigersinn zirkulierende Walze. Die Anströmung des Grobholzrechens vor dem Überfallwehr erfolgt unter einem Winkel von etwa 30° zur Achse des Überfallwehrs. Diese Schräganströmung wirkt sich bei Schwemmholzanfall positiv aus, wie von Pfister (2010) gezeigt ist.

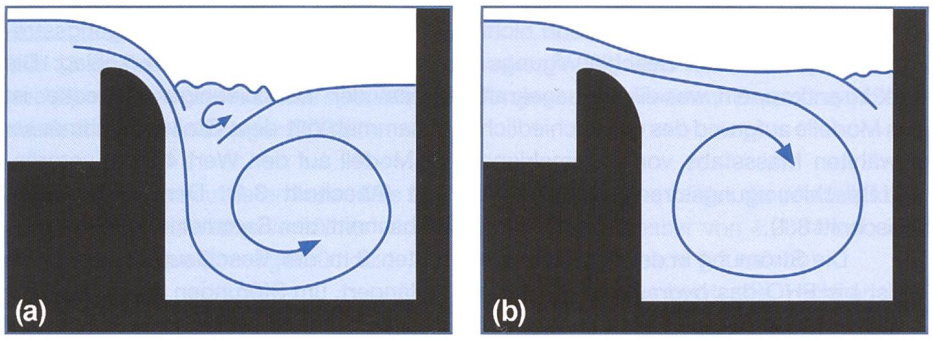


Bild 8. Abflussregimes in der Sammelrinne, (a) Tauchstrahl und (b) Oberflächenstrahl.

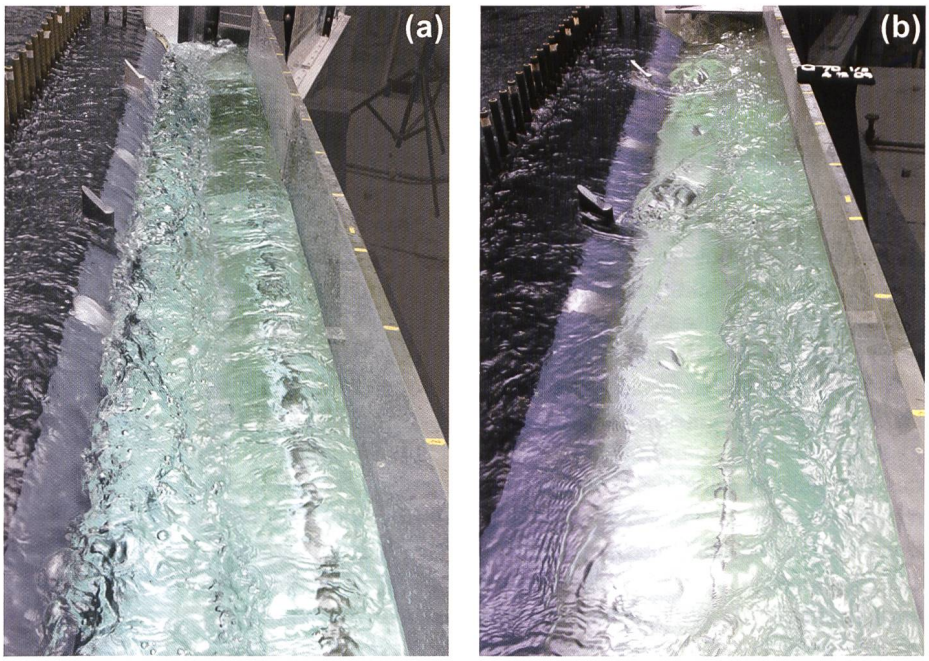


Bild 9. Strömungsmuster in der Sammelrinne für (a) EHQ mit Tauchstrahl und (b) Überlastfall mit Oberflächenstrahl. Blick in Fliessrichtung.

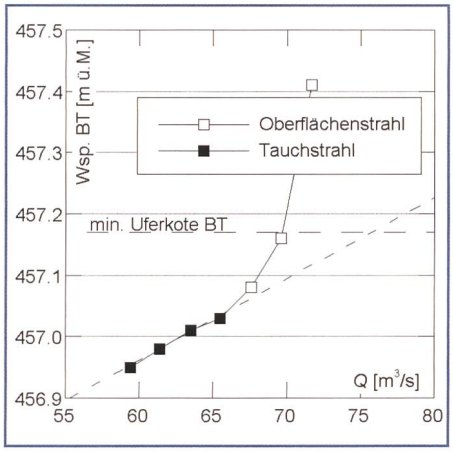


Bild 10. Wasserspiegellage im Beruhigungsteich bei geschlossenem Drosselwehr in Abhängigkeit von Q.

3.5 Sammelrinne

In der Sammelrinne liegt strömender Abfluss vor; für Abflüsse bis EHQ erfolgt beim Übergang von der Sammelrinne in die Beschleunigungsstrecke ein Fliesswechsel. Für grössere Abflüsse, wie sie im Rahmen der Versuche zum Überlastfall betrachtet werden, wird auch die Beschleunigungsstrecke im strömenden Abflussregime durchflossen. Die Fliessverhältnisse in der Sammelrinne lassen sich dann nicht mehr von jenen in der Beschleunigungsstrecke entkoppeln, was die Aussagekraft des Modells aufgrund des unterschiedlich gewählten Massstabs von Sammelrinne und Beschleunigungsstrecke einschränkt (Abschnitt 3.1).

Die Strömung in der Sammelrinne weist bis EHQ das hydraulisch günstige Abflussregime eines Tauchstrahls mit Walze auf (*Bild 8a* und *Bild 9a*). Dieses Regime weist darauf hin, dass die Sammelrinne effizient betrieben, d.h. günstig angeströmt, gleichmässig beaufschlagt und nicht vom Unterwasser her beeinflusst wird. Bei HQ_{100} erfolgt der Überfall vollkommen und an der Wasseroberfläche in der Sammelrinne zeigt sich die typische Struktur des dominanten Wirbels entlang der Rückwand mit glatter Wasseroberfläche sowie eines zweiten, kleinen Wirbels entlang des Überfallwehrs. Bei EHQ liegen im oberen Bereich die Wasserspiegel in der Sammelrinne auf gleicher Höhe wie im Beruhigungsteich und der Überfall erfolgt lokal entsprechend unvollkommen, das hydraulisch günstige Abflussregime mit Tauchstrahl bleibt jedoch erhalten. Das Umschlagen des Abflussregimes zum Oberflächenstrahl (*Bild 8b* und *Bild 9b*) erfolgt im Modell bei Abflüssen ab 68 m^3/s und ist mit einem markanten Anstieg des Wasserspiegels im Beruhigungsteich verbunden. Im Prototyp würde sich dieser Wechsel bei höheren Abflüssen abspielen. Gemäss einer einfachen Abschätzung sind Ausuferungen im Beruhigungsteich ab einem Abfluss von ca. 76 m^3/s zu erwarten *(Bild 10)*.

3.6 Beschleunigungsstrecke

Im Ausgangsentwurf ist die 4 m breite Beschleunigungsstrecke mit vier Gefällestufen geplant. Auf den ersten 8 m Fliessweg beträgt das Gefälle im Bereich der Richtungsänderung und der Breitenreduktion 4%, auf den folgenden 29.28 m 0.8% und in der 20 m langen Verzugsstrecke vor dem Stollen 9.3% (1. Hälfte) bzw. 0.56% (2. Hälfte).

Die Strömung wird in diesem Entwurf derart stark beschleunigt, dass sich zu Beginn des Stollens verzögerter, schiessender Abfluss einstellt. Dieser läuft auf Verhältnisse nahe dem kritischen Abflussregime im Stollen auf, womit ideale Voraussetzungen für die Ausbildung von stehenden Wellen geschaffen sind. Im Modell werden diese denn auch beobachtet, eine Optimierung des Ausgangsentwurfs war daher angezeigt.

Bild 11 zeigt das Längsprofil der Sammelrinne und Beschleunigungsstrecke für den Ausführungsvorschlag. Die Breite der Beschleunigungsstrecke ist zusammen mit dem Stollendurchmesser im Modell auf den Wert 4.28 m vergrössert (Abschnitt 3.1). Der flache Gefälleabschnitt der Sammelrinne ist um die ersten 8 m der Beschleunigungsstrecke verlängert, um Störungen durch die Strömungsumlenkung und die Breitenreduktion zwischen der Sammelrinne und der Beschleunigungsstrecke zu mindern. Im anschliessenden, 1.06% geneigten Abschnitt erfolgt die Beschleunigung und Überführung der Strömung auf Abflussverhältnisse annähernd jenen im Stollen für Normalabflussregime. Im letzten, 20 m langen Abschnitt findet der Verzug vom Rechteck- auf das Kreisprofil statt. Dieser Verzug ist mit einer Querschnittsreduktion verbunden, weshalb in diesem Abschnitt das Gefälle auf 4% erhöht wird. Damit wird der potenzielle Anstieg der Abflusstiefen infolge der Querschnittsreduktion durch eine Beschleunigung der Strömung verhindert. Der Verzug der Sohle und der Decke werden zudem räumlich voneinander getrennt. In den ersten 10 m der Verzugsstrecke findet der Übergang vom Rechteck- aufs Kreisprofil an der Sohle statt, auf den zweiten 10 m wird an der Sohle das Kreisprofil beibehalten, indes an der Decke der Verzug ausgeführt wird. Da bei EHQ knapp schiessende Verhältnisse vorliegen, bezweckt diese Aufteilung eine Reduktion von Stosswellen.

Mit diesen Anpassungen wird der Abfluss strömungstechnisch günstig in den Stollen eingeleitet *(Bild 12a)*. Im Modell werden selbst bei EHQ keine stehenden Wellen oder Rückstaueffekte beobachtet. Die Luft kann frei zirkulieren. Für den Abschnitt mit einem Gefälle von 1.06% stellt sich bei EHQ eine Abflusstiefe *h* von 2.6 m über dem Bankett ein. Die Fliessgeschwindigkeiten *v* in der Beschleunigungsstrecke liegen um 5.7 m/s und die Froudezahl F beträgt 1.15. Die Abflusstiefen anfangs Stollen betragen bei HQ_{100} und EHQ ca. 96% der entsprechenden Normalabflusstiefe im Stollen. Normalabflussverhältnisse stellten sich nach etwa 75 Stollenmetern ein.

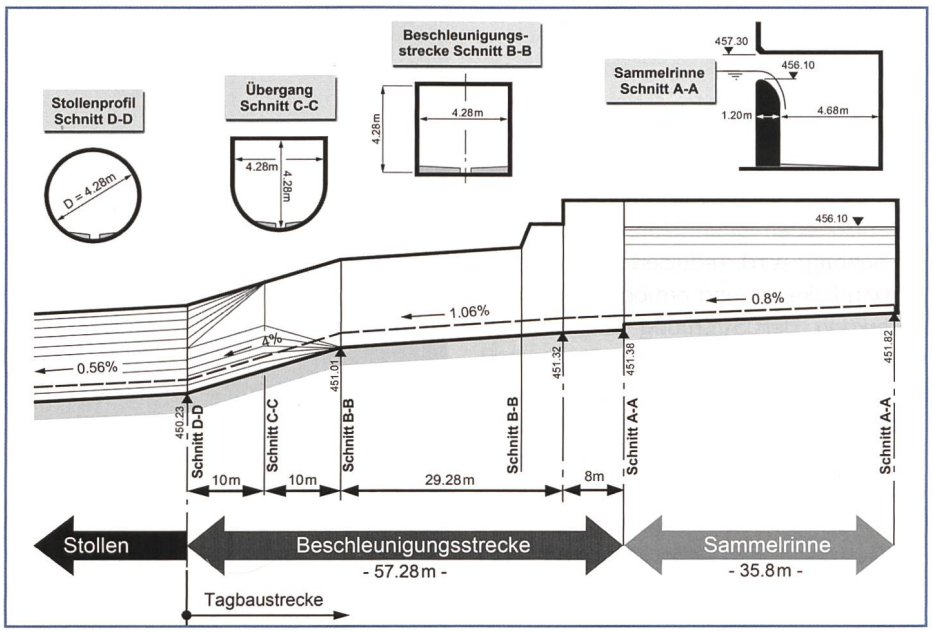


Bild 11. Längsschnitt durch Sammelrinne und Beschleunigungsstrecke des Ausführungsvorschlags, Fliessrichtung von rechts nach links.

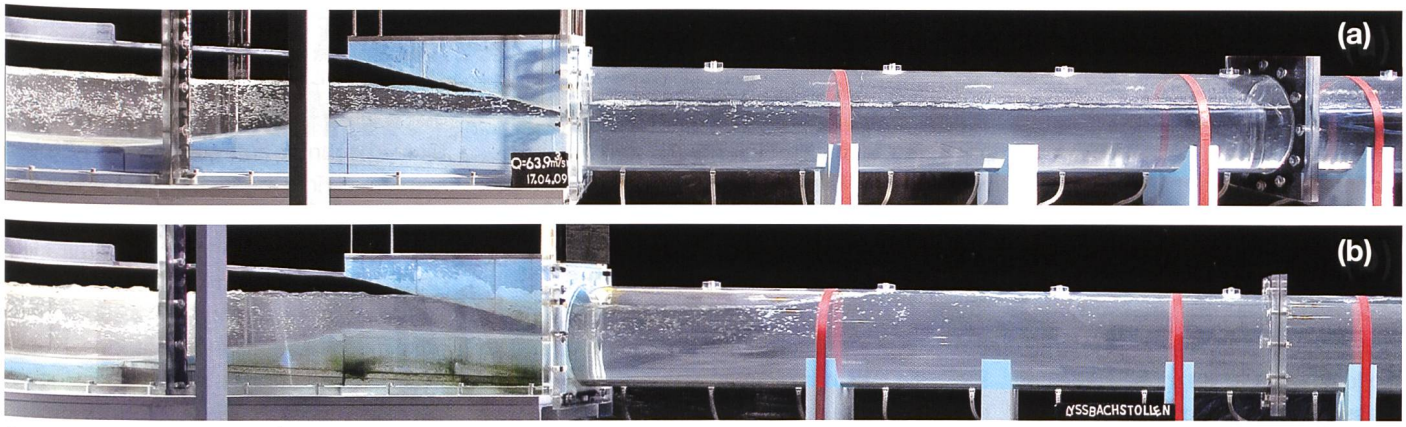


Bild 12. Abflussbild beim Übergang von Beschleunigungsstrecke zum Stollen im Ausführungsvorschlag bei (a) EHQ und (b) Überlastfall. In (b) schlägt die stehende Welle an, die Luftzirkulation ist lokal unterbrochen. Fliessrichtung von links nach rechts.

Bei Abflüssen grösser als EHQ bilden sich im Übergang zum Stollen stehende Wellen *(Bild 12b)*, die im Modell bei einem Abfluss von 76 m^3/s die Stollenfirste erreichen und die Luftzirkulation unterbinden. Eine Vollfüllung der Beschleunigungsstrecke stellt sich ab ca. 80 m^3/s ein.

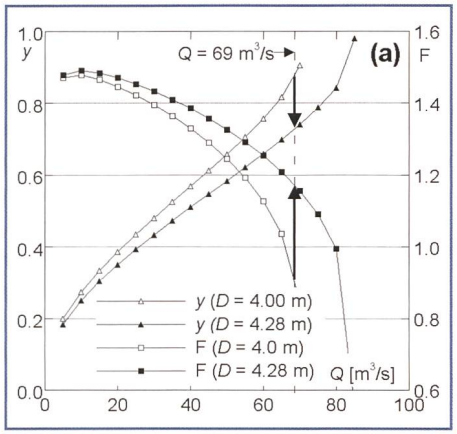
3.7 Stollen

Der Lyssbachstollen ist im Freispiegelabfluss zu betreiben. Wird die maximale Abflusskapazität des Stollens unter Freispiegelbedingungen überschritten, kommt es zum Zuschlagen. Dies ist bei Teilfüllungsverhältnissen $y = h/D$ grösser als 85% zu erwarten, kann jedoch auch schon früher eintreten. Selbst in einem prismatischen Gerinne muss aufgrund von Massabweichungen beim Bau, lokalen Störungen durch Ablagerungen oder kritischen Fliesszuständen mit der Tendenz zur Bildung stehender Wellen mit einem Zuschlagen bereits ab einem Teilfüllungsverhältnis von 55% gerechnet werden (Sauerbrey 1969). Mit dem Zuschlagen verbunden ist eine Reduktion der Abflusskapazität des Stollens. Verursacht wird diese durch die gegenüber der Zunahme des Fliessquerschnitts überproportional ansteigenden Berandungsfläche im voll gefüllten Fliessquerschnitt und damit erhöhten Reibungsverlusten. Zusätzlich kann beim Rohrscheitel Luft eingeschlossen und allenfalls akkumuliert werden, die ihrerseits den Fliessquerschnitt einengt.

Gargano und Hager (2002) geben für Kreisprofile abhängig von der Froudezahl, für runde Profile $F = Q/(gDh^4)^{0.5}$, ein maximales Teilfüllungsverhältnis y an, bei dem für ondulierende Abflussverhältnisse der Querschnitt gerade nicht zuschlägt

$$yF<0.9 \quad \text{für } 1<F<2 \qquad (1)$$

Sauerbrey (1969) gibt abhängig vom relativen Abfluss ein Grenzgefälle S_o an, bei



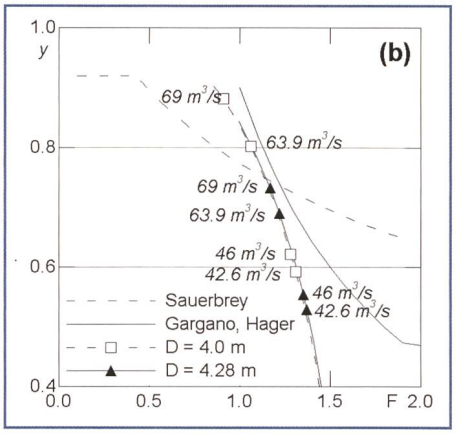


Bild 13. (a) Teilfüllungsverhältnis y[Q] und Froudezahl F[Q] für D = 4.00 m und 4.28 m, und (b) effektive und maximal erlaubte Teilfüllungsverhältnisse nach Sauerbrey (1969) sowie Gargano und Hager (2002).

dem Zuschlagen auftreten kann. Das entsprechende Teilfüllungsverhältnis wird in Abhängigkeit von S_o ausgedrückt zu

$$S_o[‰] = 20.5[q_D - 0.36] \text{ mit } q_D = Q/(gD^5)^{0.5} \qquad (2)$$

$$y = 0.92 - 0.03S_o \qquad (3)$$

Aus den Gln. (2) und (3) lässt sich eine Beziehung zwischen dem Teilfüllungsverhältnis y und der Froudezahl F herleiten. Der Stollen verfügt über ein Bankett, was bei der Abschätzung der Froudezahl berücksichtigt wurde.

Mithilfe der Modellversuche und der genannten theoretischen Betrachtungen konnte gezeigt werden, dass die Abflusskapazität des Lyssbachstollens im Ausgangsentwurf mit einem Durchmesser von 4.0 m und einer Tübbingauskleidung mit angenommener äquivalenter Sandrauigkeit k_S = 1.2 mm nicht ausreicht, um ein EHQ im Freispiegelabfluss abzuführen. Der Stollendurchmesser wurde daher im Verlauf der Projektierung auf 4.40 m erhöht, wobei im Gegenzug die Auskleidung mit Spritzbeton mit vergleichsweise rauer Oberfläche erfolgt (wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, bildet der Modellstollen einen Durchmesser von 4.28 m bei einer Sandrauhigkeit von 1.2 mm ab).

Bild 13a zeigt die rechnerische Beziehung zwischen dem Abfluss Q und dem Teilfüllungsverhältnis y resp. der Froudezahl F im Lyssbachstollen bei Normalabfluss für den Ausgangsentwurf und den Ausführungsvorschlag. Beim Stollendurchmesser von 4.00 m beträgt der Teilfüllungsgrad im Stollen nach der Bacheinleitung beim Dimensionierungsabfluss von Q = 69.0 m^3/s um y = 0.88 und F = 0.91. Für beide Abflüsse ist der maximale Teilfüllungsgrad gemäss den obenstehenden Bedingungen von Sauerbrey überschritten *(Bild 13b)*. Mit einer Vergrösserung des Stollendurchmessers können die oben genannten Kriterien erfüllt werden, ein Zuschlagen des Stollens ist für Abflüsse bis zum Dimensionierungsabfluss nicht zu erwarten.

Die maximale Abflusskapazität des Stollens im Freispiegelabflussregime ohne Einleitung des Grentschelbachs kann sowohl rechnerisch (allerdings unter Verletzung der nach Sauerbrey erlaubten Teilfüllungsverhältnisse) wie auch im Modellversuch auf ca. Q = 80 m^3/s bei einem

Teilfüllungsverhältnis von 85% abgeschätzt werden. Im Bereich des Stollenanfangs wird im Modell ab $Q = 72\ m^3/s$ eine stehende Welle beobachtet, die bei einem Abfluss von $Q = 76\ m^3/s$ die Stollenfirste erreicht, zum lokalen Zuschlagen führt und die Luftzirkulation unterbricht. Im zugeschlagenen Bereich treten kleine Unterdrücke von ca. 0.3 m WS auf. Bei sichergestellter Belüftung schlägt der Stollen unterstrom der Welle bis zu einem Abfluss von ca. 80 m^3/s wieder auf. Ein massgeblicher Druckabflusszustand, der die Kapazität wiederum erhöhen würde, kann sich aufgrund der topographischen Randbedingungen nicht aufbauen, da der Beruhigungsteich ab einem Abfluss von ca. 76 m^3/s ausufert (Abschnitt 3.5).

4. Schlussfolgerungen

In Lyss werden künftig Hochwasser mittels eines Entlastungsstollens abgeleitet, damit die Abflusskapazität des Lyssbachs im Dorf nicht mehr überschritten wird. Grosse Schäden wie in den letzten Jahren sollen dadurch künftig vermieden werden. Beim Fassungsbauwerk oberstrom der Gemeinde und bei der Einleitung in den Stollen treten komplexe hydraulische Verhältnisse auf, die das TBA des Kantons Bern genauer untersuchen liess. Es hat die VAW beauftragt, grosse Teile des Entlastungsstollens mit seinem Fassungsbauwerk zu modellieren und zu optimieren.

Der Beruhigungsteich beim Einlaufbauwerk ist ein Schlüsselelement des Bauwerks. Mithilfe der Modellversuche konnten insbesondere die Trenncharakteristik und die Anströmung des Überfallwehrs verbessert werden. Dazu wurden das Gerinne im Zulauf verbreitert und Massnahmen zur Abflusslenkung ergriffen. Namentlich das Zurücksetzen der rechtsseitigen Böschung oberstrom des Überfallwehrs und der Anschluss des Überströmdamms an die Ufermauer bewirken im Hochwasserfall eine Strömungslenkung zum Überfallwehr hin. Die Umlenkung der Strömung aus dem Hauptgerinne ist dennoch auf einen Einstau angewiesen, der durch eine Drosselung des Teilabflusses nach Lyss erwirkt wird. Bei Niederwasser ist hingegen die Führung des Lyssbachs im Hauptgerinne sichergestellt.

Die Vermeidung von Ausuferungen im Siedlungsgebiet resp. die Begrenzung des tolerierbaren Abflusses ist von der Regulierung des Drosselwehrs abhängig.

Der Abfluss in der Sammelrinne erfolgt für Abflüsse bis EHQ effizient und im Tauchstrahlregime, was auf eine gleichmässige Anströmung des Überfallwehrs und ausbleibende Unterwassereinflüsse hinweist. Die verschiedenen Sohlengefälle entlang der Beschleunigungsstrecke wurden so gewählt, dass der Abfluss dem Stollen ungefähr mit dessen Normalabflussbedingungen zugeführt wird und die freie Luftzirkulation sichergestellt ist. Ein zentraler Punkt war dabei die Ausbildung der Verzugsstrecke, um ein Zuschlagen der ersten Stollenmeter zu vermeiden. Dazu wurde das Sohlengefälle in diesem Bereich verkleinert und der Verzug der Sohle und der Decke räumlich getrennt.

Mithilfe der Modellversuche und theoretischer Überlegungen konnte zudem gezeigt werden, dass ein Stollendurchmesser von mindestens 4.28 m bei einer äquivalenten Sandrauhigkeit von 1.2 mm erforderlich ist, um für das Dimensionierungshochwasser die maximal zulässigen Teilfüllungsverhältnisse nicht zu überschreiten und damit ein Zuschlagen des Stollens zu vermeiden. Der Kunde hat sich entsprechend dem Unternehmervorschlag für eine Ausführungsvariante mit Innendurchmesser von 4.40 m und Spritzbetonauskleidung entschieden.

Im Überlastfall liegt die abgeschätzte Kapazität des Systems Sammelrinne und Beruhigungsteich bei einem ähnlichen Grenzabfluss wie diejenige des Stollens bei Freispiegelabfluss. Höhere Zuflüsse führen in erster Linie zu Ausuferungen im Beruhigungsteich; der Abfluss in den Stollen wird sich nicht erhöhen, da sich infolge der Ausuferung die notwendige Druckhöhe für höhere Stollenabflüsse nicht einstellen kann. Mit einem Belüftungskonzept, das sicherstellt, dass auch bei Unterbruch der Luftzirkulation durch eine stehende Welle keine unbelüfteten Abschnitte auftreten, wird der Stollen somit auch im Überlastfall über weite Abschnitte im Freispiegelabfluss betrieben.

Insgesamt konnte somit mit Hilfe der im hydraulischen Modellversuch getätigten Anpassungen die Funktionstüchtigkeit und Abflusskapazität des Hochwasser-Entlastungsstollens Lyss nachgewiesen werden. Die Kosten für diesen Nachweis und die Optimierung des Bauwerks belaufen sich auf knapp 3‰ der totalen Projektkosten.

Danksagung

Die VAW bedankt sich beim TBA des Kantons Bern (Oberingenieurkreis III), insbesondere bei Herrn Jörg Bucher, für den Auftrag und die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Literatur

Gargano R., Hager W.H. (2002). Undular hydraulic jumps in circular conduits. Journal of Hydraulic Engineering 128(11): 1008–1013.

Pfister, M. (2010). Schwemmholzrückhalt beim Einlaufbauwerk zum Lyssbachstollen. «Wasser Energie Luft»102(4), 275–280.

Sauerbrey, M. (1969). Abfluss in Entwässerungsleitungen unter besonderer Berücksichtigung der Fliessvorgänge in teilgefüllten Rohren. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis 1. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld.

VAW (2010). Entlastungsstollen Lyssbach, Hydraulische Modellversuche. VAW-Bericht 4266, ETH Zürich (unveröffentlicht).

Anschrift der Verfasser

Esther Rühli, Dr. *Michael Pfister** und *Adriano Lais,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
CH-8092 Zürich, ruehli@vaw.baug.ethz.ch
*Aktuelle Adresse: Laboratoire de constructions hydrauliques, EPFL Lausanne, CH-1015 Lausanne. michael.pfister@epfl.chbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW).