

Hybride Modellierung der Flussaufweitung Hänggelgiessen

Robert Boes

Peter Seitz

Thomas Berchtold

David Vetsch

Volker Weitbrecht

1. Einleitung

Am Linthkanal ist im mittleren Abschnitt auf der orographisch rechten Seite die neue Flussaufweitung Hänggelgiessen realisiert worden. Diese naturnah gestaltete Aufweitung, wo sich Auenwald und Riedvegetation entwickeln werden, bindet einen ehemaligen Altarm der Linth wieder ins Gerinne ein und führt zu einer ökologischen Aufwertung. Im Überlastfall wird aus der gefluteten Aufweitung Wasser über ein regelbares Klappenwehr in einen Vorfluter entlastet. Hierdurch wird eine mögliche Überströmung der unterstrom von Hänggelgiessen gelegenen Dämme des Linthkanals verhindert. Der Vorfluter für das entlastete Wasser, «Sumpf Uslauf» genannt, dient normalerweise der Entwässerung der Schänner Ebene.

Während der Planungsphase erfolgten diverse Einsprachen gegen das Projekt, u.a. aus der Befürchtung, die geplante Flussaufweitung Hänggelgiessen könne negative Auswirkungen auf die Wasserspiegel im Linthkanal haben und somit den Hochwasserschutz der Linthebene beeinträchtigen. Daneben bestanden auch Bedenken, das entlastete Wasser aus der Linth würde die Schänner Ebene überfluten.

Zur Untersuchung dieser Thematik wurde die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich mit einer hybriden Modellierung eines Teils des Linthkanals, der Aufweitung sowie des Entlastungsbauwerks beauftragt. Während der interessierende Kanalabschnitt mit einem 2D-numerischen Modell untersucht wurde, wurde die Notentlastung in Form eines Wehrbauwerks mit Stauklappe inkl. einem Teil des Sumpf Uslaufs in einem physikalischen Modell überprüft und optimiert [1]. Das hybride Modell war somit in der Lage, weiträumige Ergebnisse im Bereich der Kanalstrecke zu simulieren und gleichzeitig lokale Effekte der Strömung im Bereich der Entlastungsanlage darzustellen.

2. Motivation für die Notentlastung und Konzept

Vom Walensee bis zur Aufweitung Hänggelgiessen liegt die Kanalsohle des Linthkanals tiefer als das ihn umgebende Terrain (Einschnittbereich). Im weiteren Verlauf bis zur Mündung in den Zürichsee hingegen befindet sich der Linthkanal oberhalb des umliegenden Geländes und wird durch Dämme begrenzt (Dammbereich) (Abb. 1).

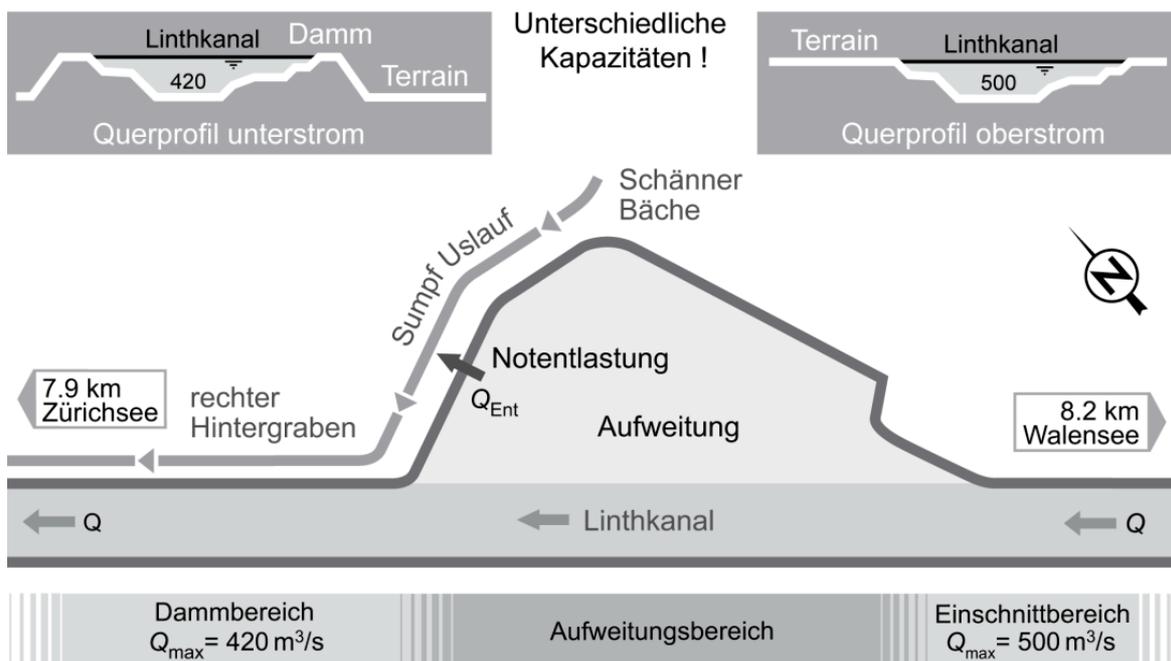


Abb. 1: Lage der Flussaufweitung am Übergang zwischen Einschnitt- und Dammbereich.

Im Dammbereich hätte ein auftretendes Dammversagen grossflächige Überschwemmungen der Linthebene zur Folge. Dank der durchgeführten Dammsanierungen verringert sich die Gefahr eines Dammversagens infolge Durchsickerung oder hydraulischen Grundbruchs. Übersteigt der Abfluss im Überlastfall die Ausbauwassermenge von $Q_A = 360 \text{ m}^3/\text{s}$, muss eine Dammüberströmung zur Vermeidung von Dammbürchen infolge Oberflächenerosion unter allen Umständen verhindert werden. Die für das Projekt wichtigen Durchflüsse gehen aus Tabelle 1 hervor.

Eingruppierung	Ereignis	Q [m ³ /s]
Bemessungsabfluss	HQ ₁₀₀	360
Überlastfall	HQ ₃₀₀	420
Überlastfall	EHQ = HQ ₁₀₀₀	500
Mittlerer Abfluss	MQ	54.7

Tab. 1: Relevante Durchflüsse für den Dammbereich des Linthkanals.

Im Überlastfall ist vorgesehen, Abflüsse bis $420 \text{ m}^3/\text{s}$ bei reduziertem Freibord im Linthkanal abzuführen [2]. Darüber hinausgehende Abflüsse müssen vor dem Dammbereich aus dem Linthkanal entlastet werden. Dies geschieht über ein regelbares Klappenwehr, das an der Aufweitung Hänggelgiessen entsteht. Je nach Szenario müssen so im Überlastfall bis zu $80 \text{ m}^3/\text{s}$ in den erwähnten Sumpf Uslauf abgeführt werden.

3. Ziele der hybriden Modellierung

Für die Fragestellungen in Bezug auf die Aufweitung kam eine numerische 2D-Simulation zum Einsatz. Sie sollte die weiträumige Auswirkung der Aufweitung auf die Wasserspiegellagen im Linthkanal und die Abflusskapazität des Linthkanals unter Berücksichtigung der neu projektierten Dammkoten überprüfen. Die berechneten Wasserspiegellagen und Strömungsrichtungen in der Aufweitung dienten als Randbedingungen für das physikalische Modell. Auch allenfalls erforderliche Sohl-sicherungsmaßnahmen der Kanalsohle am oberen Ende der Aufweitung sollten durch die berechneten Sohl-schubspannungen aufgedeckt, sowie der Einfluss von auftretendem Bewuchs in der Aufweitung auf die Notentlastung aufgezeigt werden. Zur Beantwortung der Fragen im direkten Zusammenhang mit der Notentlastung wurde ein physikalisches Modell gewählt, dem das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz zugrunde lag. Letzteres diente zur Überprüfung der Kapazität des Klappenwehres und des Sumpf Uslaufs (Rechter Hintergraben). Ausserdem sollte es Aufschluss über die Energieumwandlung im Tosbecken und die zur Ufer- und Sohl-sicherung benötigten Blockgrössen geben, sowie eventuelle Auswirkungen der Entlastungs-einbauten im Sumpf Uslauf auf die Entwässerung der Schänner Ebene aufdecken. Abb. 2 zeigt den Verschneidungsbereich numerisches/physikalisches Modell.

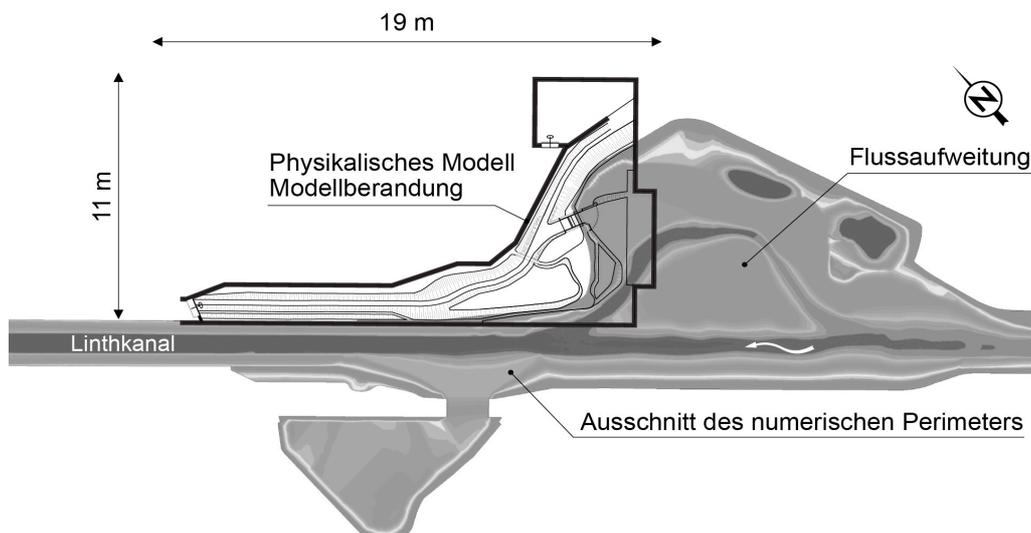


Abb. 2: Kopplung des physikalischen Modells mit der numerischen Untersuchung; der numerische Modellperimeter ist nur partiell abgebildet.

4. Numerische Simulation

Für die zweidimensionale numerische Modellierung des 4.2 km langen Teilstücks des Linthkanals und der Aufweitung wurde das an der VAW entwickelte Software-tool *BASEplane* der Simulationsumgebung *BASEMENT* verwendet [3]. Das Rechengitter setzte sich aus ca. 47'000 Dreiecks- und Vierecks-Zellen von 2.3 m² bis 12 m² zusammen. Das Modell wurde mittels früheren, eindimensional berechneten Wasserspiegellagen kalibriert, denen aufgenommene Hochwasserspuren zugrunde lagen [2]. Die Kalibrierung erfolgte durch die Veränderung der Rauigkeitsbeiwerte in den verschiedenen Querprofilbereichen Sohle, Böschung und Vorland für die Topographie des Ist-Zustands (Kanal ohne Aufweitung). Da der Linthkanal den Walensee entwässert und keine massgebenden geschiebeführenden Zuflüsse hat, ist nicht mit relevantem Geschiebetrieb zu rechnen. Die Simulationen berücksichtigten daher keinen Sedimenttransport.

4.1. Hydraulische Wirkung der Aufweitung

Die numerischen Modellierungen zeigen, dass es infolge der Aufweitung im Kanal weder unterstrom noch oberstrom der Aufweitung zu einer Erhöhung der Wasserspiegel kommt. Im Zulauf zur Aufweitung bildet sich eine Senkkurve aus, durch die die Wasserspiegellagen und die Energielinien sogar tiefer als im Ist-Zustand zu liegen kommen. Durch den Rückstauereffekt am Aufweitungsende bei Wiederverengung auf das Kanalgerinne und aufgrund der geringen Aufweitungslänge von knapp 500 m kommt es in der Aufweitungsstrecke zu geringfügig höheren Wasserspiegellagen als im vergleichbaren Ist-Zustand. Dafür wurden in diesem Bereich entsprechend höhere Dammkoten projektiert. Die aus Sicht des Hochwasserschutzes massgebende Energielinie liegt im Projektzustand stets tiefer als im Ist-Zustand (Abb. 3).

Die numerischen Simulationen bestätigen, dass die geforderten Abflusskapazitäten für die projektierte Situation mit Aufweitung, Notentlastung und angepassten Dammhöhen unter Einhaltung des geforderten Freibords gewährleistet sind.

4.2. Hydraulische Wirkung der Notentlastung

Infolge der Entlastung kommt der Wasserspiegel im Zulaufkanal und in der Aufweitung tiefer zu liegen als ohne Notentlastung. Mit dem Betrieb der Notentlastung werden die Geschwindigkeiten im Initialgerinne in der Aufweitung erhöht. Im übrigen Bereich der Aufweitung bleiben die Fliessgeschwindigkeiten unter 0.5 m/s. Das Strömungsmuster verändert sich durch die Notentlastung nicht wesentlich. Die rechtsseitige Rotationsströmung in der Aufweitung bleibt bestehen (Abb. 4). Die Hauptströmung verbleibt im Hauptkanal und wird durch die Notentlastung kaum beeinflusst.

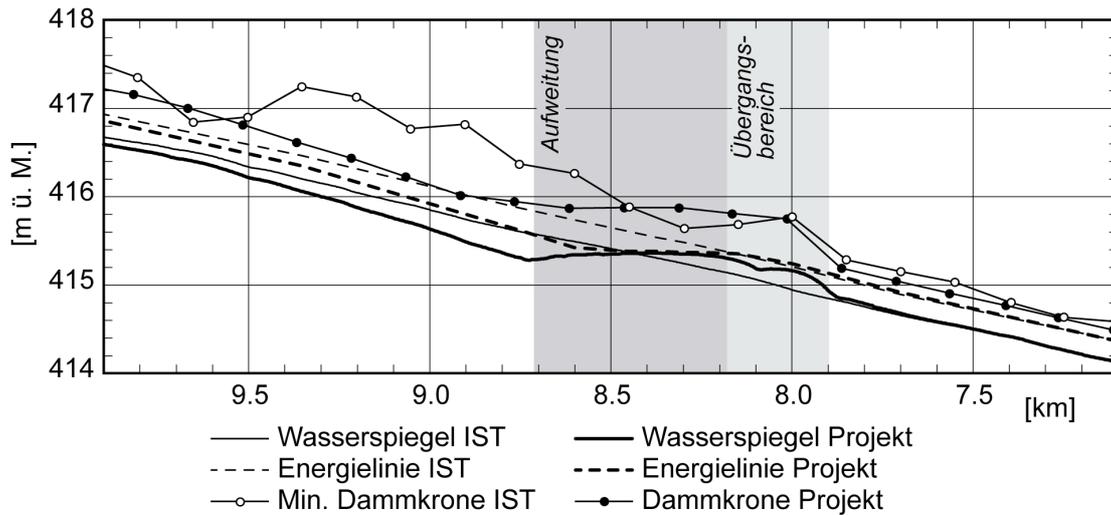


Abb. 3: Auswirkung der Aufweitung auf den Wasserspiegel im Linthkanal bei einem $HQ_{300} = 420 \text{ m}^3/\text{s}$.

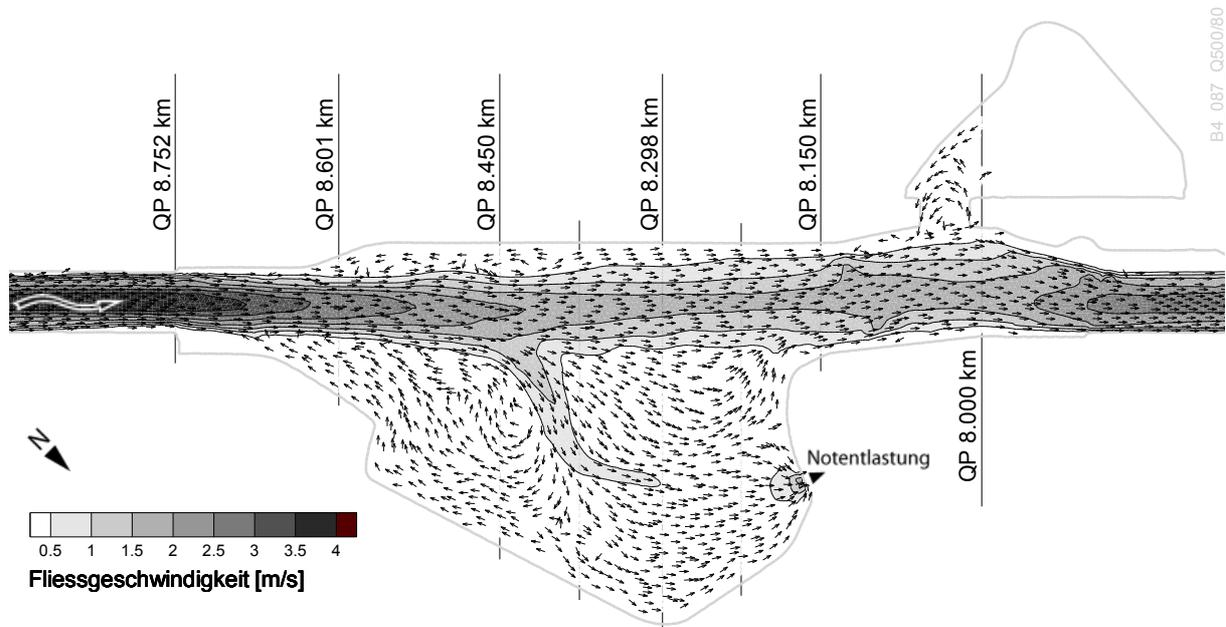


Abb. 4: Fließgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen in der Aufweitung bei einem $EHQ = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ mit Notentlastung von $Q_E = 80 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.3. Sensitivitätsstudie Bewuchs

Die nur bei Hochwasser geflutete Aufweitung soll unterschiedliche Bewuchszonen aufweisen. Diese wurden im numerischen Modell vereinfacht mittels unterschiedlicher Sohlrauigkeiten (Rauigkeitswerte k_{St} nach Strickler) abgebildet. Die Bewuchsflächen wurden unterteilt in Auenwaldzonen ($k_{St} = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) und Riedvegetationszonen ($k_{St} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$). Der Einfluss des Bewuchses auf die Strömungszustände im übergeordneten hydraulischen System und somit auf die Eingangs-

randbedingungen für das physikalische Modell wurde mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht. In zwei Extremszenarien wurde von «starkem» und «schwachem» Bewuchs ausgegangen, wobei der Rauigkeitsbeiwert in beiden Bewuchszonen jeweils auf $k_{St} = 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ reduziert resp. auf $k_{St} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ erhöht wurde.

Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten in der Aufweitung vor der Notentlastung wurden kaum relevante Auswirkungen des Bewuchses ermittelt (Abb. 5). Das Projekt sieht aus Sicherheitsgründen dennoch einen Abflusskorridor zum Entlastungsbauwerk vor, der von grösserem Bewuchs freigehalten werden soll.

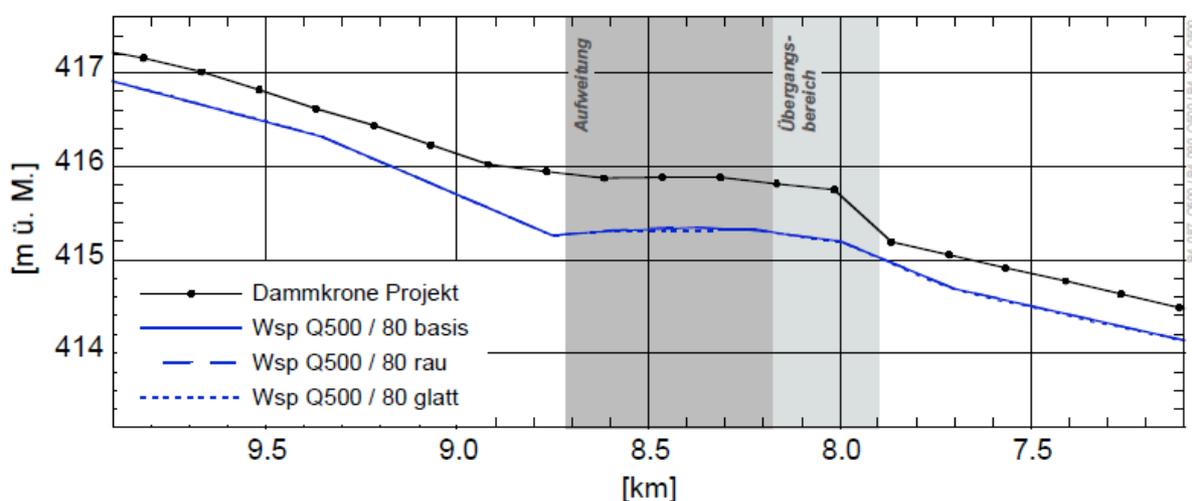


Abb. 5: Vergleich des Wasserspiegelverlaufs auf der Kanalachse für den Lastfall EHQ für die drei Bewuchsvarianten «Basis», «rau» und «glatt».

5. Physikalisches Modell

Das physikalische Modell wurde im Massstab 1:30 errichtet und deckte einen Teil der Aufweitung, das einfeldrige Entlastungsbauwerk mit anschliessendem Tosbecken und den Sumpf Uslauf bzw. Rechten Hintergraben ab (Abb. 6). Aus den in Kapitel 4 genannten Gründen ist nicht mit Sedimenttransport zu rechnen. Der Linthkanal und die Aufweitung wurden deshalb mit fester Topographie und ohne Geschiebetransport modelliert. Der Sumpf Uslauf, der an das Tosbecken anschliesst, wurde mit beweglicher Sohle modelliert. Dies ermöglichte eine direkte Abschätzung der Uferstabilität und eine Prüfung der geplanten Blockgrössen. Aus modelltechnischen Gründen wurde jedoch auf Filterschichten zwischen dem Blocksatz und dem Untergrundmaterial verzichtet. Daher sind die Beobachtungen im Modell und die damit verbundenen Aussagen hinsichtlich der Ufer- und Sohlstabilität eher auf der sicheren Seite gegenüber dem Naturzustand anzusehen.

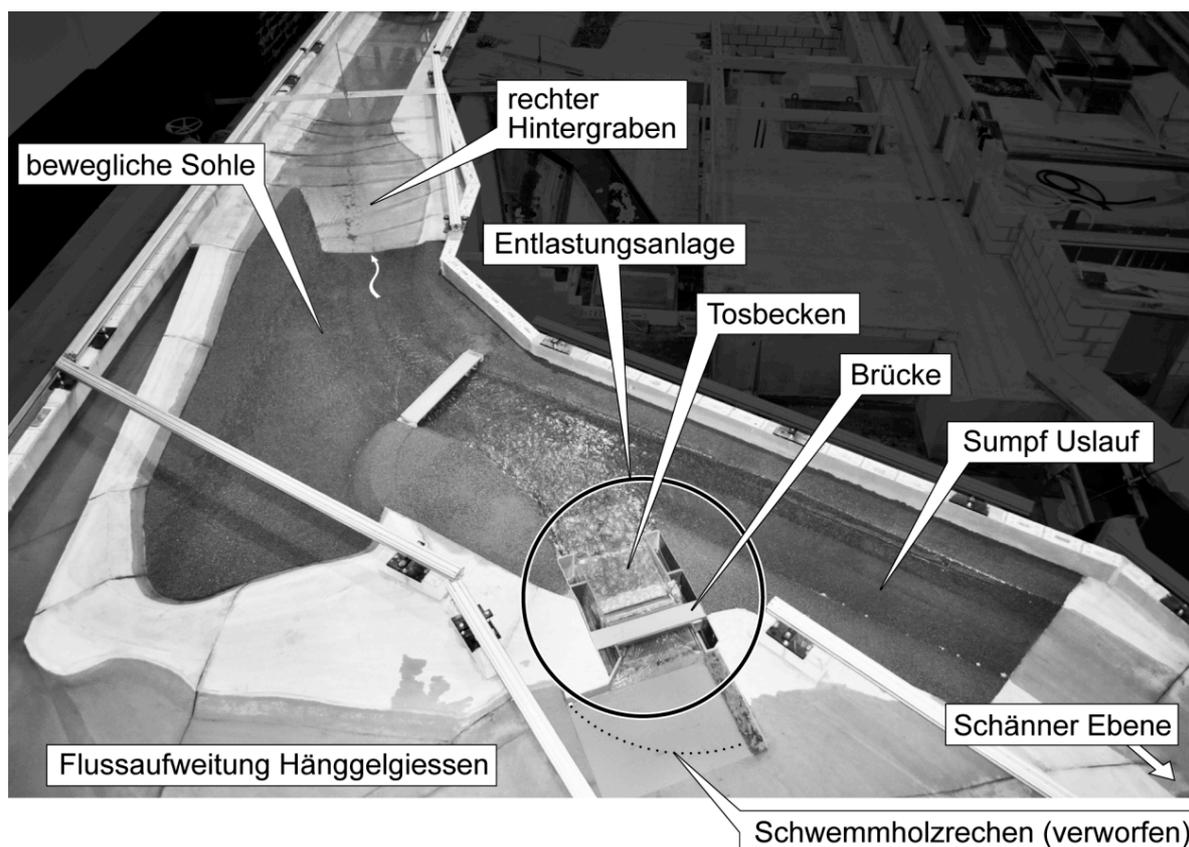


Abb. 6: Physikalisches Modell im Massstab 1:30 mit Blick in Fliessrichtung auf das Entlastungsbauwerk und den anschliessenden Sumpf Uslauf.

Aufgrund der Nachbildung zweier Fliessgewässer, Linthkanal und Sumpf Uslauf, wurden zwei voneinander unabhängige Wasserkreisläufe installiert. Von einem Hochbehälter mit konstanter Druckhöhe erfolgte die Wasserzuführung in die jeweiligen Einlaufbecken, die der Beruhigung der Modellzuflüsse dienten. Der Zufluss wurde jeweils mittels magnetisch induktivem Durchflussmesser (MID) gemessen, die Einstellung wurde über computergesteuerte, pneumatische Schieber vorgenommen. Die Wasserspiegel- und Kolkiefenmessungen erfolgten mittels Stechpegeln, zur Aufnahme von Fließgeschwindigkeiten kam ein Messflügel zum Einsatz.

Alle Versuche im physikalischen Modell wurden stationär durchgeführt, da im Linthkanal keine ausgeprägten Hochwasserspitzen auftreten. Vielmehr handelt es sich aufgrund der Retentionswirkung des dem Linthkanal vorgelagerten Walensees um langanhaltende Hochwasserabflüsse. Dies hat zur Folge, dass der für die Notentlastung massgebende Wasserspiegel in der Aufweitung in den Versuchen konstant ist.

Die Versuche lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Versuche mit und ohne Entlastung des Linthkanals. Während bei ersteren die Funktionalität der Entlastung im Vordergrund stand, wurden letztere benötigt, um die Auswirkungen des Projekts auf die Schänner Ebene abzuschätzen (Vergleich Ist-Zustand mit Projekt).

5.1. Untersuchung Entlastungsbauwerk

Für die verschiedenen Entlastungsabflüsse von $Q_E = 20, 40, 60$ und $80 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde die Stauklappe jeweils so weit abgesenkt (Abb. 7), dass die aus den numerischen Berechnungen vorgegebenen Wasserspiegellagen in der Aufweitung korrekt wiedergegeben wurden. Hierauf wurden die Senkungskurven zur Klappe hin und die Wasserspiegel im Sumpf Uslauf bzw. Rechten Hintergraben gemessen. Ein Abfluss von $Q_E = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einem $\text{EHQ} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ im Linthkanal stellt den maximal zu entlastenden Durchfluss bei gleichzeitig grösstmöglichem Abfluss im Linthkanal dar. Darüber hinausgehende Abflüsse können oberstrom von Hänggelgiessen nicht mehr im Kanal abgeführt werden und würden dort zu Ausuferungen führen. Für den Wasserspiegel bei der maximal erforderlichen Entlastungsmenge von $Q_E = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde ausserdem die grösstmögliche Wehrkapazität bei vollständiger Absenkung der Klappe ermittelt.

Nach den jeweiligen Versuchen wurden die Auswirkungen auf die Blöcke im Anschluss an das Tosbecken und eventuell auftretende Kolkerscheinungen im Sumpf Uslauf aufgenommen. Bei ersten Versuchen mit Entlastung stellte sich heraus, dass das Wehrfeld leicht redimensioniert werden konnte. Von anfänglich 15 m Feldbreite wurde es auf 14 m verringert. Ausserdem wurde die linke Wangenmauer strömungsgünstiger ausgeformt. Bei der untersuchten Feldbreite von 14 m ergab sich immer noch eine Kapazitätsreserve von 7%. Diese wurde nicht weiter reduziert, da sowohl das physikalische Modell als auch die numerisch berechneten Wasserspiegel eine gewisse Unschärfe besitzen.

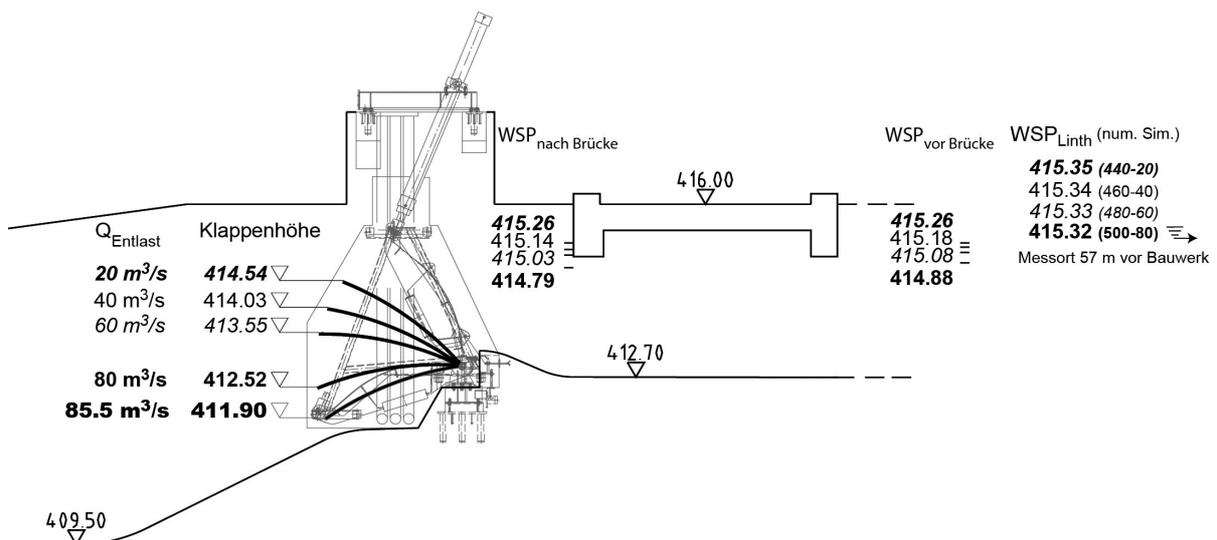


Abb. 7: Klappenstellungen bei 14 m Breite, entlastete Wassermengen und zugehörige Wasserspiegellagen im Bereich der Brücke (noch nicht optimiert) und in der Linth.

Anhand der gemessenen Wasserspiegellagen vor der Brücke konnte die Gefahr einer Verklauung des Entlastungsbauwerks abgeschätzt werden. Eine strömungsgünstigere Ausführung der Brücke über die Notentlastung wurde empfohlen. Von

einem anfänglich geplanten Schwemmholzrechen vor dem Bauwerk wurde bereits im Vorfeld abgeraten. Mögliche Verklausungen am Rechen könnten die nötigen Abflüsse am Entlastungsbauwerk reduzieren. Dies würde aber die Funktion des Überlastfallkonzeptes gefährden. Sollte sich ohne Rechen wider Erwarten Schwemmholz an der Klappe stauen, kann dieses dort leichter entfernt werden (kurzzeitige Klappensenkung, Intervention mit Bagger) als an einem separat angeordneten Schwemmholzrechen.

Die Sohlen- und Uferbefestigungen im Sumpf Uslauf verhielten sich bei den Versuchen genügend stabil, was auf eine ausreichende Energieumwandlung im Tosbecken schliessen lässt. Es kam zwar zu Ausschwemmungen des zwischen den Blöcken liegenden Sandes, jedoch blieben die Blöcke in ihrer Lage grösstenteils stabil. Die Stabilität in Natur kann hier als grösser angenommen werden als im physikalischen Modell, da die Kohäsion des in Realität vorhandenen feinkörnigen Sohlmaterials unterschätzt wird. Zudem fehlten im Modell natürlich aufkommender, stabilisierend wirkender Bewuchs, Filterschichten und dergleichen.

5.2. Untersuchung Kapazität Sumpf Uslauf

Projektgemäss muss die Abflusskapazität des Sumpf Uslaufs ausreichen, um den maximalen Entlastungsabfluss aus dem Linthkanal abzuleiten. Dazu wurden dort die Wasserspiegel bei Versuchen mit und ohne Entlastung verglichen. Einem entlasteten Durchfluss von $Q_E = 80 \text{ m}^3/\text{s}$, der in den mit $10 \text{ m}^3/\text{s}$ aus der Schänner Ebene beaufschlagten Sumpf Uslauf fliesst, wurde also ein Abfluss von $90 \text{ m}^3/\text{s}$, nur aus der Schänner Ebene kommend, gegenübergestellt. Die Resultate zeigen, dass der Wasserspiegel im Sumpf Uslauf im maximalen Entlastungsfall um 14 cm ansteigt, was zu einem geringen Aufstau in den Entwässerungsgräben der Schänner Ebene führt. Ein Aufstau dieser Grössenordnung wurde bei der Projektplanung bereits prognostiziert. Daraus resultierende Schäden, wie die Überflutung von Weideland, sollen in Zukunft durch Entschädigungszahlungen aus dem Linthwerk kompensiert werden. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass die geplante Kapazität des Sumpf Uslaufs bzw. des anschliessenden Rechten Hintergrabens von $80 \text{ m}^3/\text{s}$ im untersuchten Nahbereich (Abb. 2, Abb. 6) gewährleistet ist.

Die nahezu linear verlaufenden Energielinien im Sumpf Uslauf bei Versuchen ohne Entlastung zeigen, dass die Einbauten der Entlastung keine negativen Auswirkungen auf das Abflussgeschehen nach oberstrom haben und somit die Entwässerung der Schänner Ebene gewährleistet bleibt.

6. Zusammenfassung

Mittels hybrider Modellierung konnten an der VAW wichtige Fragestellungen zu einer geplanten Notentlastung an der neuen Flussaufweitung Hänggelgiessen am Linthkanal untersucht werden. Durch die numerischen Simulationen wurden die Dammhöhen und Abflusskapazitäten im Linthkanal überprüft und die sich aufgrund der Aufweitung einstellenden Wasserspiegellagen für verschiedene Abflusskonfigurationen berechnet. Die ermittelten Wasserspiegel bildeten die Einlauftrandbedingung für das physikalische Modell, mit dem die Funktionalität des geplanten Entlastungsbauwerks untersucht wurde. Dieses Bauwerk ist im Rahmen des Projekts Hochwasserschutz Linth 2000 für den Überlastfall konzipiert und reduziert den Abfluss im Linthkanal auf dessen maximale Abflusskapazität entlang der Dammstrecke. Somit werden dank der «Ventilfunktion» im Bereich Hänggelgiessen Hochwasserschutzdämme auf einer Länge von 8 km auch im Überlastfall vor einem Versagen infolge Überströmung wirkungsvoll geschützt. Gleichzeitig stellt die Aufweitung Hänggelgiessen eine ökologische Aufwertung dar und kombiniert ideal eine Hochwasserschutzmassnahme mit einer Fließgewässerrevitalisierung.

Literaturverzeichnis:

- [1] Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (2010): *Hochwasserschutz Linth 2000; Flussaufweitung Hänggelgiessen – Numerische Modellierung*; Bericht Nr. 4281. Notentlastung Hänggelgiessen – Hydraulische Modellversuche; Bericht Nr. 4276. Zürich.
- [2] IG HWS Linth – Escherkanal (2005): *Hochwasserschutz Linth 2000. Auflageprojekt Escherkanal und Linthkanal*; Technischer Bericht. Lachen.
- [3] Faeh R., Müller R., Rousselot P., Vetsch D., Volz C., Farshi D. (2008): *System Manuals of BASEMENT*, Version 1.5. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), ETH Zurich. Available from <http://www.basement.ethz.ch>