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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 101 (2009)

Heft: 2

Artikel: Matteschwelle Bern : Erkenntnisse zur Hochwassersicherheit aus hydraulischen Modellversuchen

Autor: Möller, Georg / Nussle, Daniela / Weitbrecht, Volker

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941918

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: 15.07.2025

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

Matteschwelle Bern – Erkenntnisse zur Hochwassersicherheit aus hydraulischen Modellversuchen

■ *Georg Möller, Volker Weitbrecht, Daniela Nussle*

Zusammenfassung

Mit Hilfe des hydraulischen Modells der Matteschwelle in Bern an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich sind verschiedene Hochwasserereignisse simuliert worden. Die Verifizierung des Modells wurde mit den Hochwasserereignissen 1999 und 2005 erfolgreich durchgeführt. Durch diese Untersuchung sind Grundlagen zur Entwicklung eines sicheren Hochwasserschutzkonzeptes unter besonderer Berücksichtigung des Schwemmholzaufkommens erarbeitet worden. Dieser Beitrag stellt die wesentlichen Erkenntnisse der hydraulischen Modellversuche vor.

1. Problematik

Das Mattequartier an der Aare in der Stadt Bern war in den letzten Jahren mehrmals von Hochwasserereignissen betroffen. Am 22. und 23. August 2005 ereignete sich ein Hochwasser, welches die bisher grössten registrierten Schäden in Höhe von 55 Mio. CHF verursacht hat. *Bild 1* zeigt die Situation an der Matteschwelle während des Hochwassers 2005. Dargestellt sind das Oberwasser (links), die Wehranlage «Matteschwelle», das Unterwasser (rechts) und im Hintergrund das Mattequartier. Die normale Fliessstrecke ist durch die weissen Pfeile gekennzeichnet. Das linke Ufer ist mit einer schwarzen Linie angedeutet. *Bild 2* zeigt schematisch die Lage und Bestandteile der Matteschwelle und des Kraftwerkes Matte.

Neben einer bedeutenden Abflussspitze von Q_{max} = 605 m^3/s wurde auch eine grosse Menge an Schwemmholz in den Bereich der Matteschwelle transportiert, welches die Wehröffnungen verlegte und die Abflusskapazität reduzierte. Die Folge war ein starker Anstieg des Wasserspiegels, welcher zur Überströmung des linken Ufers und somit zu einer Ableitung eines Teils des Abflusses von ca. 60 m^3/s durch das Mattequartier führte.

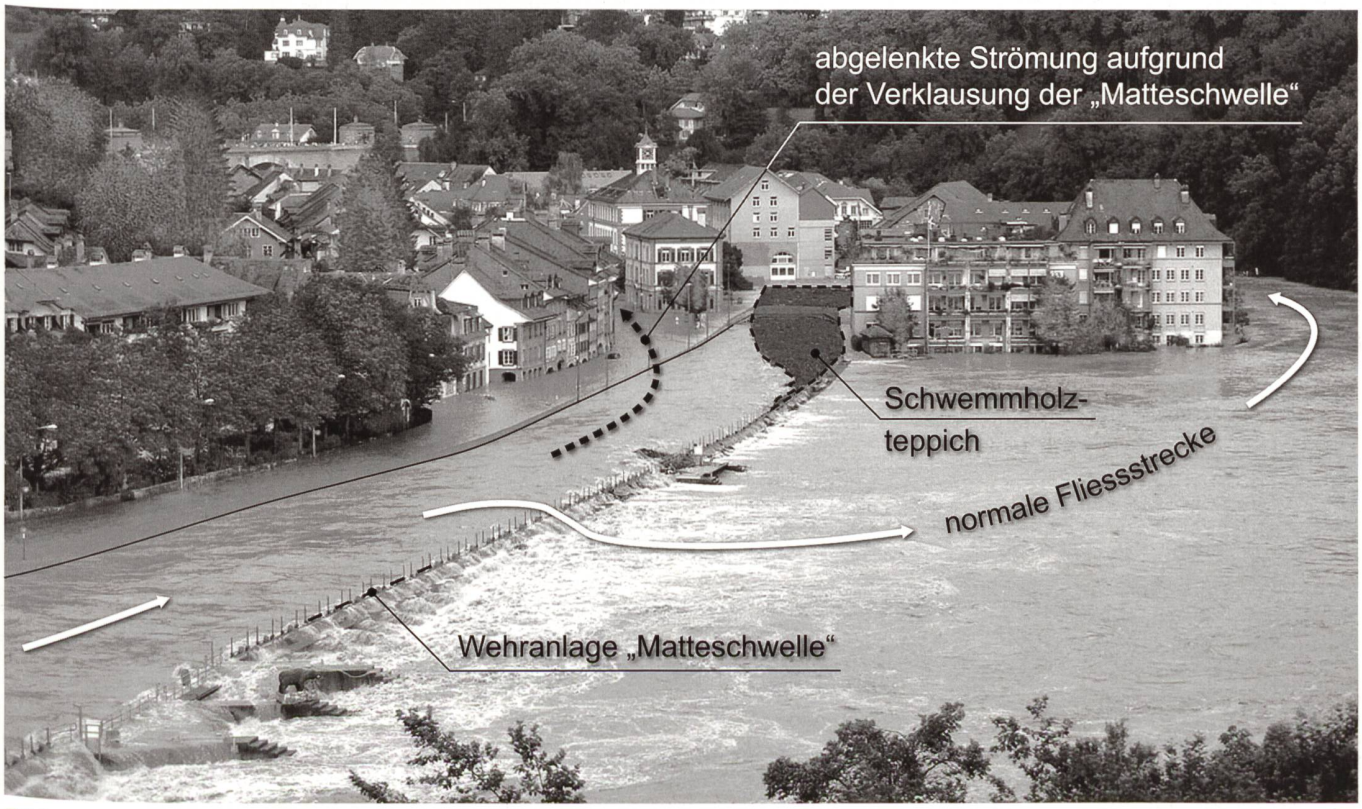


Bild 1. Situation an der Matteschwelle in Bern während des Hochwassers am 22. August 2005 bei einem Abfluss von ca. 600 m^3/s. Das Mattequartier, im Hintergrund, wird zu diesem Zeitpunkt vom Oberwasser her durchströmt. Foto: K+H.

Das danach antransportierte Schwemmholz wurde teilweise in den Kraftwerkskanal (Tych) transportiert, vom bestehenden Zaun am Ufer aufgehalten und bildete dort einen Schwemmholzteppich (vgl. *Bild 1*). Aufgrund der ungewöhnlich hohen Schwemmholzmenge von 1500 m^3 (Lockervolumen), der grösste Teil kam vor der Abflussspitze, ist der Wasserspiegel während des 2005-Hochwassers stärker angestiegen als bei vorherigen Ereignissen mit ähnlichen Abflüssen. Beispielsweise führte das Hochwasser 1999 mit einer Abflussspitze von 620 m^3/s und einer Schwemmholzmenge von weniger als 100 m^3 nicht zum Überströmen der Ufer im Oberwasser.

Das Tiefbauamt der Stadt Bern hat in Reaktion auf das Hochwasserereignis 2005 die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich mit der Durchführung hydraulischer Modellversuche beauftragt. Ziel dieser Untersuchung ist die Entwicklung eines sicheren Hochwasserschutzkonzeptes unter besonderer Berücksichtigung des Schwemmholzaufkommens. Die Untersuchung ist in den Berichten VAW (2008a) und VAW (2008b) dokumentiert.

2. Hydraulisches Modell

Im Massstab 1:50 wurde ca. 1 km des Flusslaufes der Aare von der Rechtskurve vor der Matteschwelle bis zum Auslauf des Kraftwerks Matte im Unterwasser des Wehres modelliert. *Bild 3* zeigt schematisch das im hydraulischen Modell abgebildete Gebiet und die wichtigsten Bestandteile für den Modellbetrieb. Die Flusssohle im Oberwasser ist beweglich mit einer entsprechend skalierten Sand-Kies-Mischung ausgeführt. Damit können Veränderungen der Sohlenlage, lokale Kolkerscheinungen, Auswirkungen auf die Strömung und der Schwemmholztransport realitätsnah beurteilt werden. Der Kraftwerkskanal und das Unterwasser sind durch eine feste Sohle mit naturähnlich modellierter Rauigkeit nachgebildet. Die Dosierung des Geschiebes am Modelleinlauf und die Abflusssteuerung werden anhand der vorgegebenen Geschiebe- und Abflussfunktionen vollautomatisch geregelt. Das Schwemmholz wird am oberen Ende des Modells, vor der Dalmazibrücke, manuell zugegeben. Der Wasserspiegel am unteren Ende des Modells wird mit Hilfe eines Lamellenwehrs auf den des Pegels Matte (Naturdaten, Position: vgl. *Bild 2*) eingestellt.

Da das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerekräften die dominierende physikalische Grösse darstellt, wird die Modellierung unter Anwendung des Froude'schen Ähnlichkeitsgesetzes durchgeführt. Die Kornverteilung des Sohlenmaterials wurde nach Zarn (1992) ermittelt. Dabei wird berücksichtigt, dass bei Modellen dieses Massstabs in Kombination mit der vorliegenden Kornverteilung die kritische dimensionslose Sohlenschubspannung variiert (Shields, 1936). Das Schwemmholz wird mittels der geometrischen Ähnlichkeit im Massstab 1:50 umgerechnet. Nach der Froude'schen Ähnlichkeit ist die Dichte des Schwemmholzes, welche massgebend für die Schwimmeigenschaften ist, in der Natur gleich der im Modell. Die entsprechende Holzfeuchte und damit die Dichte des Modellholzes wird durch Wässerung des Schwemmholzes vor dem Versuch berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden dabei Effekte, die sich evtl. durch die Biegsamkeit des Holzes ergeben, da die Steifigkeit des Materials (E-Modul) nicht angepasst wird. Für eine möglichst naturgetreue Nachbildung des Schwemmholzes werden drei verschiedene Schwemmholzklassen, Ast-, Stammholz und Wurzelstöcke, verwendet. Anfallendes Feinholz kann in einem Modell dieses Massstabs nicht naturähnlich modelliert werden.

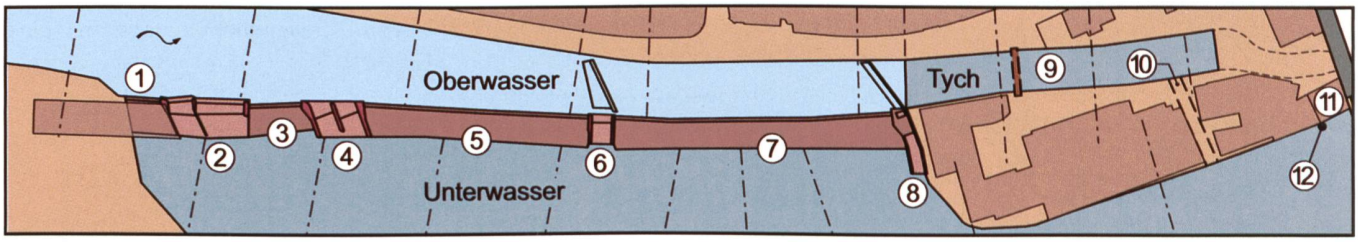
Das Modell ist mit Ultraschallsensoren, Stechpegel und einer Kamera instrumentiert. Hauptsächlich werden zwei Grössen gemessen: 1) Wasserspiegellagen kontinuierlich mit Ultraschallsensoren an mehreren signifikanten Stellen im Ober- und Unterwasser, wobei die Messgenauigkeit dabei ±10 cm (in Natur) beträgt. 2) Normal zur Wasserspiegeloberfläche wird ein Foto pro Sekunde aufgenommen, um die Bewegung des Schwemmholzes zu bestimmen.

Die Höhenlage des Ufers im Oberwasser ist im Kraftwerkskanal am tiefsten und steigt entlang der Matteschwelle (linkes Ufer) stromaufwärts an. Im Modell wurde das gesamte Ufer des Oberwassers nach der Verifizierung so erhöht, dass ein Überströmen unmöglich ist. Damit können die Wasserspiegellagen ohne den unerwünschten Teilabfluss durch das Mattequartier bestimmt werden.

Die Verifizierung des Modells anhand der Hochwasserereignisse 1999 und 2005 lieferte eine gute Übereinstimmung der Wasserspiegellagen und Schwemmholzansammlungen mit den Naturereignissen.

3. Erkenntnisse zur Hydraulik

Zunächst wurden Versuche unter Vernachlässigung des Schwemmholzeinflusses durchgeführt. Am Kurvenausgang, im Bereich der Kirchenfeldbrücke (vgl. *Bild 3*), ist die Hauptströmung entlang des linken Ufers gerichtet. Die Matteschwelle wird parallel angeströmt, die relative Querströmung nimmt entlang der Wehrfelder stetig zu. Während eines Hochwassers ist das Kraftwerk Matte ausser Betrieb, die Fliessgeschwindigkeit im Kraftwerkskanal ist minimal. *Bild 4* zeigt ein Längenprofil des linken Ufers, vom Beginn der Matteschwelle bis zum Einlauf des Kraftwerkes (KW). Es sind die maximalen Wasserspiegel des Hochwassers 2005 und des Überlastfalls eingezeichnet. Der Wasserspiegel entlang der Matteschwelle ist im Hochwasserfall 2005 in etwa horizontal und steigt am Ende der Schwelle und im Kraftwerkskanal an. Beim Überlastfall steigt der Wasserspiegel vom Beginn der Matteschwelle bis zum



① Schleusen 65 - 61
② Rüttischwellen
③ Schleusen 60 - 55
④ Oberer-Grundablass
⑤ Schleusen 54 - 31
⑥ Zähringer-Grundablass
⑦ Schleusen 30 - 1
⑧ Inseli-Grundablass
⑨ Kraftwerkskanal (Tych)
⑩ Kupferhammer-Grundablass
⑪ Kraftwerk Matte
⑫ Pegel Matte

Bild 2. Schematische Darstellung der einzelnen Anlagenteile der Matteschwelle und des Kraftwerks Matte.

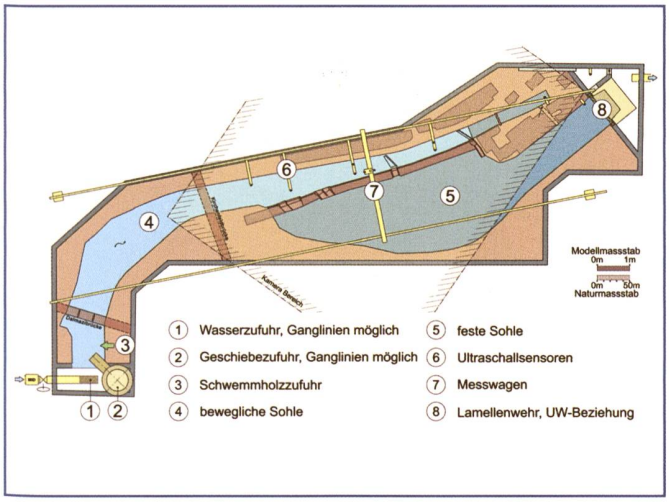


Bild 3. Hydraulisches Modell der Matteschwelle, Modellmassstab 1:50.

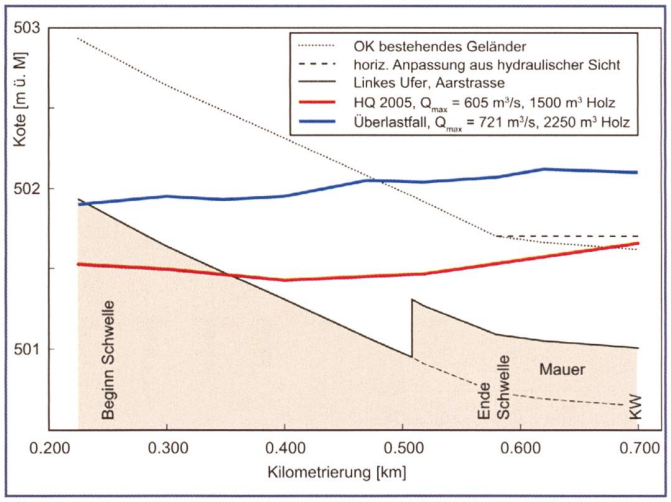


Bild 4. Längenprofil vom Beginn der Matteschwelle bis zum Ende des Kraftwerkskanals mit den maximalen Wasserspiegeln des Hochwassers 2005 und des Überlastfalls.

Kraftwerk an. Dieser Verlauf ähnelt sehr stark jenem eines Streichwehrs bei strömendem Normalabfluss. Der Wasserspiegel ist im Kraftwerkskanal am grössten, weil er hier mit der Energielinie zusammenfällt (v=0).

Die Matteschwelle besteht zum Grossteil aus 65 Tafelschützen mit je einer Öffnungsfläche von 4 m × 0.65 m. Bei grossen Abflüssen werden die als unterströmt vorgesehenen Wehre auch überströmt. Je nach Unterwasserstand sind vollkommene oder unvollkommene Überfälle bzw. freie oder rückgestaute Schützenabflüsse möglich, so dass der Einfluss des Unterwassers für die Strömung oberhalb der Wehranlage relevant ist. Eine rein analytische Berechnung der Wehrkapazität ist deswegen nur schwer möglich. Mittels der Modellversuche wurden für jede Position der Ultraschallsensoren (vgl. *Bild 6*) Pegel-Abfluss-Beziehungen ermittelt. Die Kurven setzen sich aus mehreren charakteristischen Verläufen zusammen. Bei Abflüssen bis 400 m^3/s, dominiert die unterströmte Abflusscharakteristik. Im oberen Teil der Kurve ist der Verlauf abhängig von der Lage der Messstelle im Oberwasser, dabei weisen die Verläufe eine über- und unterströmte Abflusscharakteristik auf oder liegen im Übergangsbereich. Durch die Analyse des Unterwasserstands auf das Abflussverhalten der Matteschwelle konnte ein deutlicher Einfluss aufgezeigt werden. Bei Abflüssen ab ca. 500 m^3/s wird der Anteil an unvollkommenen Wehrabflüssen entscheidend. Eine Erhöhung des Unterwassers kann damit eine Erhöhung des Oberwassers von bis zu 100% des Unterwasseranstiegs, lokal sogar etwas darüber, zur Folge haben.

Um die Abflusskapazität der Matteschwelle zu erhöhen, wurde die Möglichkeit zusätzlicher Abflussquerschnitte zwischen Ober- und Unterwasser ausserhalb der Matteschwelle untersucht. Eine Verbindung auf der Kurveninnenseite im Bereich der Kirchenfeldbrücke (vgl. *Bild 3*) wurde aufgrund der ungünstigen Anströmbedingungen nicht weiter untersucht. Der Kupferhammer-Grundablass, eine Verbindung vom Kraftwerkskanal zum Unterwasser (vgl. *Bild 2*), könnte mit baulichem Aufwand wieder in Betrieb genommen werden. Die ermittelte Kapazität dieser Verbindung liegt bei einem Gesamtabfluss von ca. 600 m^3/s bei 6 m^3/s. Eine Bresche an dieser Stelle würde bei gleichem Gesamtabfluss ca. 5 m^3/s erreichen, bei 750 m^3/s wären es ca. 16 m^3/s. Beide Konzepte liefern keinen signifikanten Beitrag zur Gesamtentlastung und damit zur Hochwassersicherheit der Matteschwelle.

Die Tafelschützen bilden einen grossen Widerstand in der Strömung und sind somit ungünstig im Hinblick auf eine maximale Abflusskapazität. Im hydraulischen Modell wurden die Tafelschützen entfernt, um den Einfluss auf den Wasserspiegel im Oberwasser zu untersuchen. Der bestehende Wehrrücken bildet dabei eine überströmbare Schwelle. Es wurden vier Varianten in einem Abflussbereich von 100–800 m^3/s untersucht: I) ohne die Tafelschützen Nr. 60–55 (vgl. *Bild 2*), II) ohne Nr. 65–55, III) ohne Nr. 65–31 und IV) ohne Nr. 65–1. *Bild 5* zeigt die resultierenden Wasserspiegelabsenkungen im vorderen Bereich der Matteschwelle (OW2, vgl. *Bild 6*) und im Kraftwerkskanal (KW, vgl. *Bild 6*). Aufgrund der Messgenauigkeit werden Absenkungen erst ab 10 cm als signifikant berücksichtigt. Im Allgemeinen liefern diese Varianten eine Wasserspiegelabsenkung im Bereich der entfernten Tafelschützen. Mit Varianten I und II werden kaum messbare Absenkungen des Wasserspiegels erreicht. Variante III senkt den Wasserspiegel im vorderen und mittleren Bereich ab. Werden alle 65 Tafelschützen (Variante IV, 65-1) entfernt, resultiert praktisch keine weitere Absenkung. Im hinteren Bereich und im Kraftwerkskanal wird bei keiner Variante eine signifikante Absenkung des Wasserspiegels erreicht.

4. Ergebnisse zum Schwemmholz

Die Schwemmholzmenge beim Hochwasser 2005 betrug 1500 m^3. Diese Menge wurde bei der Untersuchung, wie beim Ereignis in der Natur, zu 80% in den ersten 12 Stunden des Ereignisses (22.8.2005, 0–12 Uhr) und die übrigen 20% danach zugegeben. Der Grossteil ist somit vor der Hochwasserspitze an die Matteschwelle transportiert worden. Im Überlastfall (Q_{max} = 721 m^3/s) wurde die entsprechende Hochwasserwelle (geo7 et al. 2008) mit Schwemmholzmengen von 2250 und 3000 m^3 untersucht. Zudem wurden systematische Untersuchungen mit stufenweiser Schwemmholzzugabe mit einer Bandbreite von 0–4500 m^3 bei konstantem Abfluss durchgeführt.

4.1 Schwemmholztransport

In Krümmungen ist die Oberflächenströmung infolge der daraus resultierenden Sekundärströmung zur Aussenseite gerichtet. Schwemmholz wird definitionsgemäss an der Oberfläche transportiert und gelangt somit vermehrt auf die Kurvenaussenseite. Diese Beobachtungen konnten während der Modellversuche bestätigt

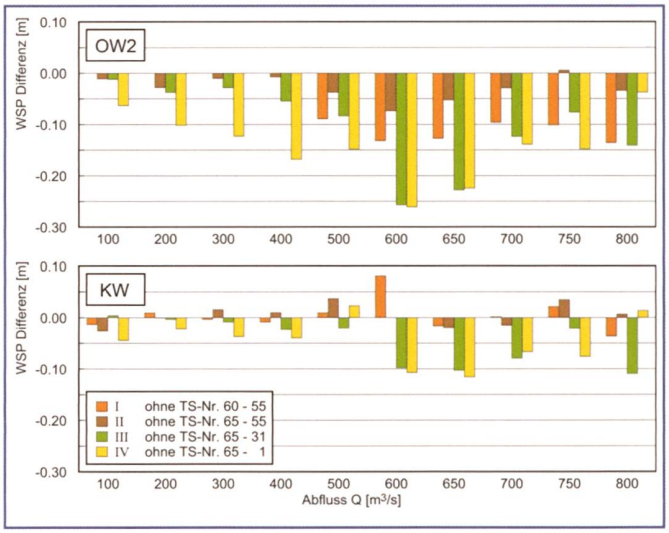


Bild 5. Wasserspiegelabsenkungen bezogen auf die Ausgangssituation mit allen Tafelschützen, exemplarisch für den vorderen Bereich (OW2) und für den Kraftwerkskanal (KW). Die Lage der Pegelmessstellen kann Bild 6 entnommen werden.

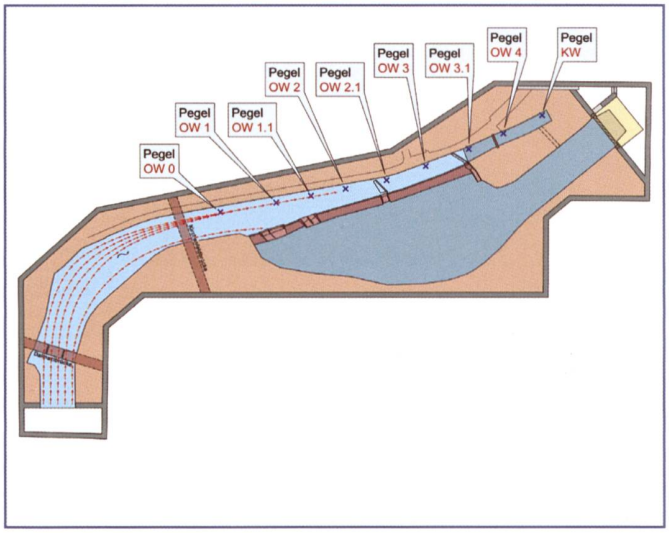


Bild 6. Pegelmessstellen (Ultraschallsensoren) im Oberwasser und Schwemmholzstromlinien (rote Pfeile) bei gleichverteilter Zugabe des Schwemmholzes über die Gerinnebreite.

werden. Somit befindet sich am Kurvenausgang der grösste Teil des Holzes auf der linken Seite der Aare. Die Zugabe des Schwemmholzes erfolgt gleichmässig verteilt über die Breite. Der äusserst rechts vor der Kurve zugegebene Anteil bleibt beim Transport durch die Rechtskurve auf der Innenseite. *Bild 6* zeigt den beobachteten Weg des Schwemmholzes im Vorfeld der Matteschwelle qualitativ. Die Pfeile stehen dabei für die Schwemmholzstromlinien, was einem zeitlich gemittelten Transportweg entspricht. Holz kann aufgrund hoher Feuchtigkeit auch unterhalb der Wasserspiegeloberfläche transportiert werden. Dieser Prozess konnte während der Modellversuche beobachtet werden. In der Natur ist während Hochwasserereignissen die Trübung so stark, dass im besten Fall erst nach dem Ereignis Holz unter Wasser festgestellt werden kann.

Das Schwemmholz folgt abrupten Richtungsänderungen des Wassers nicht. Am Zähringer-Grundablass (vgl. *Bild 2*) wird beispielsweise die Strömung auf kurzer Strecke um nahezu 90° umgelenkt. Das Schwemmholz schwimmt an diesem Wehr aufgrund der Grösse vorbei und gelangt in den hinteren Bereich der Matteschwelle. Ist der hintere Bereich verlegt, haben sich die Strömungsverhältnisse verändert und Schwemmholz trifft auf den linken Wehrpfeiler des Zähringer-Grundablasses. Es bildet sich eine Ansammlung, die oft zu einer Verklausung dieses Wehres führt.

Wird das Ufer nicht überströmt, gelangt das Schwemmholz nicht in den Kraftwerkskanal (vgl. *Bild 1*, kein Schwemmholz bzw. -teppich im Kraftwerkskanal). Mit Hilfe des Kupferhammer-Grundablasses wurde versucht, auch bei nicht überströmtem Kraftwerkskanal bzw. nicht durchströmtem Mattequartier eine Strömung im Kraftwerkskanal zu erzeugen, welche das ankommende Schwemmholz von der Matteschwelle bis in den Kraftwerkskanal transportiert. Die Ergebnisse zeigen, dass einmal an die Matteschwelle angelegtes Schwemmholz nicht wieder mobilisiert werden kann. Die durch den Grundablass erzeugte Strömung ist zu klein, um abschliessend beurteilen zu können, ob allein die Abflussmenge für einen Transport des Schwemmholzes in den Kraftwerkskanal verantwortlich ist oder das Schwemmholz in dieser Konstellation gar nicht mobilisiert werden kann.

4.2 Schwemmholzrückhalt

Beim Hochwasser 2005 wurden 1200 m^3 Schwemmholz von der Matteschwelle zurückgehalten. Diese Menge wurde bei dessen Entsorgung nach dem Ereignis vom Tiefbauamt der Stadt festgestellt. Aufgrund von Beobachtungen in der Natur und der Vorversuche im hydraulischen Modell ist davon auszugehen, dass es sich dabei um ca. 80% der gesamten Schwemmholzmenge handelt und 20% über die Wehrfelder ins Unterwasser gelangte.

Der Grossteil des Schwemmholzes befindet sich am Kurvenausgang oberhalb der Wehrfelder nahe dem linken Ufer und gelangt somit in den hinteren Bereich der Matteschwelle (vgl. *Bild 6*). Dort kommt es zu einer Verlegung bzw. Verklausung der Tafelschützen Nr. 30–1 und des Inseli-Grundablasses (vgl. *Bild 2*, Ziffer 7 und 8). Der geringe Teil an Schwemmholz, welcher auf der Innenseite der Kurve oberhalb der Wehrfelder transportiert wird, gelangt grösstenteils über die ersten Wehröffnungen (vgl. *Bild 2*, Ziffern 2 und 4) ins Unterwasser.

Bild 7 zeigt den Schwemmholzrückhalt an der Matteschwelle in Abhängigkeit der zugegebenen Schwemmholzmenge in einer Bandbreite bis 4500 m^3 Schwemmholz. Die Ergebnisse sind zum einen für das gesamte Schwemmholz und zum anderen aufgeteilt in die Klassen Ast- und Stammholz dargestellt. Es wird deutlich, dass bei geringer Zufuhr an Schwemmholz anteilig mehr Holz ins Unterwasser gelangt. Das kleinere Astholz gelangt leichter ins Unterwasser und wird erst bei ausreichender Verlegung hauptsächlich durch das Stammholz in grossem Masse aufgehalten. Wird die Matteschwelle zum Beispiel mit 500 m^3 bzw. 1000 m^3 Holz beaufschlagt, werden nur ca. 45% bzw. 65% zurückgehalten. Die Matteschwelle wirkt erst bei grosser Beaufschlagung mit Schwemmholz als effektiver Schwemmholzrückhalt. Wenn die Öffnungen der Wehre mit Schwemmholz verlegt sind, kann das später antransportierte Holz nahezu vollständig zurückgehalten werden. Erst dann ist die Bildung eines charakteristischen Schwemmholzteppichs (vgl. *Bild 1*) zu verzeichnen. Bei Schwemmholzmengen von 1500 –4500 m^3 werden zwischen 80 und 90% des ankommenden Schwemmholzes von der Matteschwelle aufgehalten, was für einen bewusst geplanten Schwemmholzrechen ein sehr gutes Ergebnis wäre. Die Matteschwelle ist abstrakt betrachtet ein parallel angeströmter Schwemmholzrechen. Das Konzept des parallel ange-

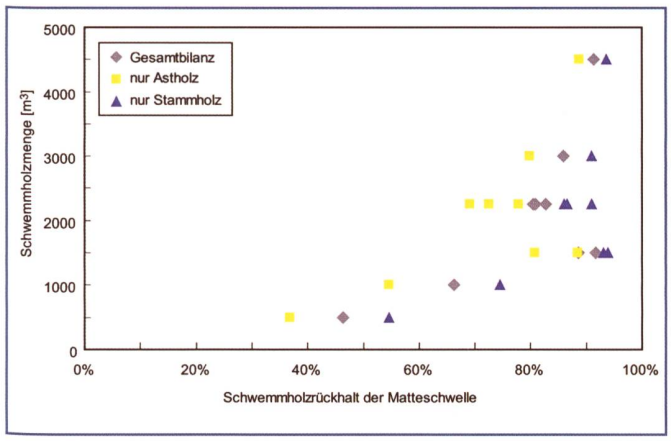


Bild 7. Schwemmholzrückhalt an der Matteschwelle in Abhängigkeit der zugegebenen Schwemmholzmenge und Schwemmholzklasse.

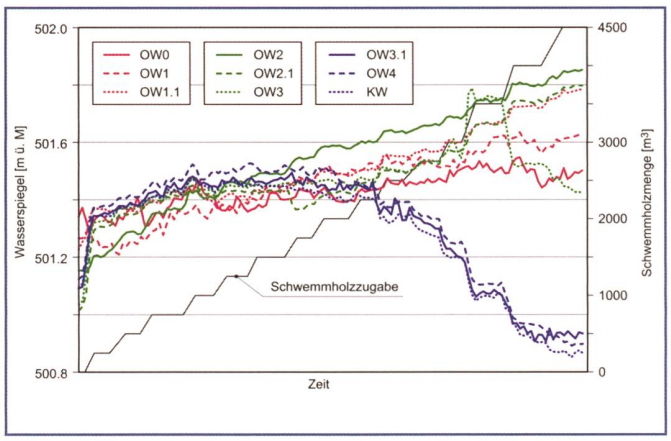


Bild 8. Wasserspiegellagen an verschiedenen Pegelstandorten im Oberwasser der Matteschwelle bei konstantem Abfluss Q_{max} HQ2005 mit 605 m³/s und stufenweiser Schwemmholzzugabe; Lage der Pegel siehe Bild 6.

strömten Schwemmholzrechens wurde in der hydraulischen Modelluntersuchung an der VAW zum Schwemmholzrückhalt am Kraftwerk Ettisbühl bei Malters detailliert untersucht und erreicht dort ebenfalls Rückhalteleistungen von mehr als 60% (VAW 2009).

4.3 Einfluss der Schwemmholzmenge auf den Wasserspiegel

Um mögliche Konzepte zum Schwemmholzmanagement im Flussabschnitt der Matteschwelle während eines Hochwasserereignisses beurteilen zu können, ist der Einfluss der anfallenden Schwemmholzmenge auf den Wasserspiegel von grosser Bedeutung. Analysiert wurde daher die kritische Schwemmholzmenge, bei der sich der Wasserspiegel signifikant ändert. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss der Schwemmholzmenge systematisch analysiert. Die Bandbreite reicht von 0–4500 m³ Schwemmholz (0–300% HQ2005). Das Schwemmholz wird bei konstantem Abfluss von 605 m³/s, Hochwasserspitze 2005, stufenweise zugegeben. *Bild 8* zeigt den Einfluss des stufenweise zugegebenen Schwemmholzes auf die gemessenen Wasserspiegellagen im Oberwasser der Matteschwelle. Die Lage der neun Pegelmessstellen ist in *Bild 6* dargestellt.

Die Wasserspiegellagen im mittleren und hinteren Bereich der Matteschwelle und im Kraftwerkskanal steigen bei der Zugabe von nur 250 m³ um ca. 30 cm an. Jede weitere Zugabe in Stufen von 250 m³ Schwemmholz bewirkt lediglich einen Anstieg des Wasserspiegels von maximal 8 cm. Somit kann für die Situation an der Matteschwelle schon eine Schwemmholzmenge von 250 m³ als kritisch bezeichnet werden (zum Vergleich: HQ2005 → 1500 m³; HQ1999 → >100 m³). An den Pegeln OW0 bis OW3 steigen die Wasserspiegellagen kontinuierlich mit wachsender Schwemmholzmenge. Die Wasserspiegellagen am Pegel im Kraftwerkskanal (OW3.1, 4 und KW) steigen bis zu einer Schwemmholzmenge von ca. 1000 m³ an. Von 1000 m³ bis ca. 2000 m³ bleibt das Niveau etwa gleich. Zwischen 2000 und 4500 m³ sinkt der Wasserspiegel ab. Die sinkenden Wasserspiegel im Kraftwerkskanal lassen sich anhand der Veränderung der Schwemmholzansammlung im hinteren Bereich der Matteschwelle erklären. *Bild 9* zeigt diesen Zustand bei einer Schwemmholzmenge von 2250 m³ und den grundsätzlichen Weg der Durchströmung schematisch. Im Folgenden werden zur Erläuterung die Ziffern aus *Bild 9* verwendet. Das Schwemmholz verlegt die Wehre im hinteren Bereich der Matteschwelle (vgl. *Bild 2*, Schleusen 1–30 und Inseli-Grundablass). Danach bildet sich eine Schwemmholzansammlung in Form eines Schwemmholzteppichs vor dem Inseli-Grundablass, welche den gesamten Querschnitt zwischen Matteschwelle und linkem Ufer verlegt. Das Wasser wird aufgrund der starken Verlegung vor der Ansammlung über die weniger verlegten Teile der Matteschwelle abgeführt (Pfeil 1→2). Ein geringer Teil des Abflusses gelangt trotz Schwemmholzansammlung in den Kraftwerkskanal (Verbindung 1→3). Zwischen dem Kraftwerkskanal und dem Unterwasser besteht durch die Schwemmholzansammlung hindurch eine Verbindung (3→2). Die Kapazität dieser Verbindungen hängt allgemein von der Verlegungsdichte und der Länge der Schwemmholzansammlung ab. Wird die Schwemmholzansammlung grösser, verändert sich die Verbindung zwischen Kraftwerkskanal und Unterwasser (3→2) nicht. Die Verbindung zwischen dem Oberwasser und dem Kraftwerkskanal (1→3) besitzt eine ähnliche Verlegungsdichte, allerdings wächst mit grösser werdender Ansammlung die durchströmte Länge, womit die Energieverluste auf dieser Fliessstrecke steigen. Das heisst, je mehr Schwemmholz die Ansammlung erreicht, desto grösser wird der Unterschied in der Kapazität bzw. der Energieverlust der Verbindungen und folglich der der Wasserspiegellagen.

Das Resultat, dass schon eine geringe Schwemmholzmenge einen signifikanten Anstieg des Wasserspiegels vor den Wehren erzeugt, ist nicht verwunderlich. In Anbetracht der Abmessungen der Tafelschützenöffnungen (4 m × 0.65 m) und bei Stammholzgrössen um 6 m Länge und 0.3 m Durchmesser gelangt aus dieser Holzklasse so gut wie gar nichts ins Unterwasser. *Bild 10* zeigt die Verlegung der Tafelschützen im hydraulischen Modell. Das kleinere Astholz verlegt die verbleibenden Zwischenräume, und der Abflussquerschnitt ist verklaust. Für diesen Zustand bedarf es keiner grossen Schwemmholzmengen. Das anschliessend folgende Schwemmholz verändert nicht die Verlegungsdichte, sondern die Mächtigkeit der Ansammlung. Der Wasserspiegel steigt demzufolge nur noch gering an.

5. Schlussfolgerungen

Durch die hydraulischen Modellversuche an der VAW konnte die Hydraulik der Matteschwelle mit den entsprechenden Wasserspiegellagen detailliert analysiert werden. Für eine Vielzahl an Szenarien wurden Pegel-Abfluss-Beziehungen erarbeitet. Der Einfluss des Schwemmholzes auf den Wasserspiegel im Oberwasser konnte bestimmt werden. Folgende wesentliche Erkennt-

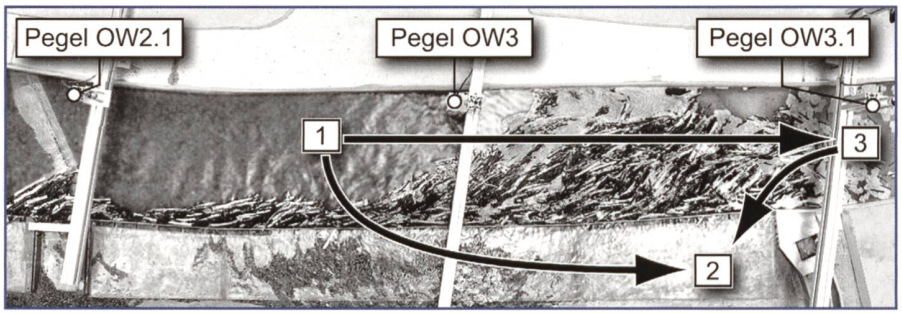


Bild 9. Schwemmholzansammlung im hinteren Bereich der Matteschwelle zwischen Zähringer- (links) und Inseli-Grundablass (rechts), die Pfeile zeigen den typischen Strömungsweg (Ziffern zur Beschreibung) durch die Ansammlung.

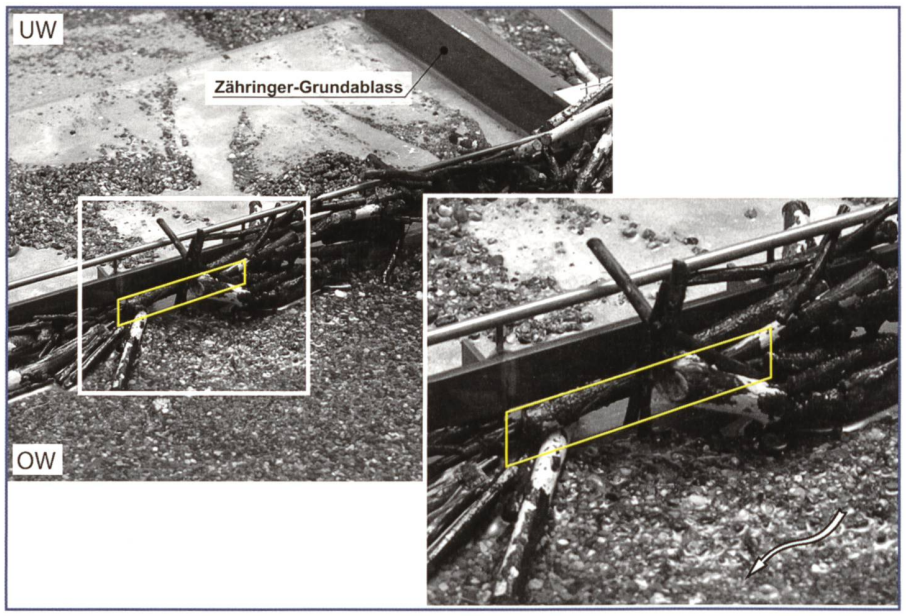


Bild 10. Verklausung der Tafelschützen mit Blick ins Unterwasser (UW) nach einem Versuch. Mit dem gelben Rahmen ist der Abflussquerschnitt (Öffnung) des Tafelschützes Nr. 28 markiert. Deutlich wird das Grössenverhältnis des Schwemmholzes zu den vorhandenen Öffnungen des Wehres.

nisse der durchgeführten Untersuchungen können zusammengefasst werden:

- Das Oberwasser der Matteschwelle ist hydraulisch nicht vom Unterwasser entkoppelt.
- Eine Entfernung der historischen Tafelschützen würde den Wasserspiegel im hinteren Bereich der Matteschwelle und Kraftwerkskanal nicht signifikant absenken.
- Die untersuchten zusätzlichen Abflussquerschnitte vor und hinter der Matteschwelle ins Unterwasser haben eine sehr geringe Kapazität, so dass diese keine massgebende Entlastung darstellen.
- Der Wasserspiegel im Oberwasser der Matteschwelle ist bei fast allen untersuchten Szenarien im Kraftwerkskanal am höchsten. In diesem Bereich ist das Ufer am tiefsten.
- Die kritische Schwemmholzmenge liegt bereits bei 250 m^3, das entspricht ca. 17% der Schwemmholzmenge des Hochwassers 2005. Diese Schwemmholzmenge verursacht einen signifikanten Wasserspiegelanstieg von ca. 30 cm.
- Anfallendes Schwemmholz oberhalb der kritischen Menge von 250 m^3 verursachten zum einen im Bereich der Matteschwelle nur einen geringen zusätzlichen Wasserspiegelanstieg und zum anderen eine Verlegung des Kraftwerkskanals, was zu einer Wasserspiegelabsenkung im Kanal selbst führen kann.
- Aufgrund der grossen Rückhalteleistung von 80 bis 90% des ankommenden Schwemmholzes durch die Matteschwelle wurde das Konzept des parallel angeströmten Schwemmholzrechens entwickelt.

Zur Gewährleistung des Hochwasserschutzes des Mattequartiers wurde eine Erhöhung des Ufers vorgeschlagen. Eine Erhöhung bis zur Oberkante des bestehenden Geländers und horizontalen Ufer im Kraftwerkskanal (vgl. *Bild 4*, gestrichelte Linie) würde das Mattequartier vor einer Durchströmung vom Oberwasser, wie es beim Hochwasser 2005 aufgetreten ist, schützen. Das Bauprojekt «Provisorischer Hochwasserschutz Tych», welches diese Erhöhung mit einer Holzverschalung umsetzt, ist seit Mitte 2008 fertig gestellt.

Verdankung

Wir danken dem Auftraggeber, dem Tiefbauamt der Stadt Bern, für die Finanzierung der hydraulischen Modellversuche und die gute Zusammenarbeit.

Literatur

geo7 AG, IUB AG, Hunziker, Zarn & Partner AG, Emch+Berger AG (2008). Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare, *Bericht* Bern.

Shields, A. (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen* 87, Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau, Berlin.

VAW (2008a). Schwemmholzproblematik an der Matteschwelle in Bern, *Bericht* Nr. 4248, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, unveröffentlicht.

VAW (2008b). Matteschwelle in Bern – hydraulische Veränderungen und deren Auswirkungen, *Bericht* Nr. 4271, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, unveröffentlicht.

VAW (2009). Schwemmholzrückhalt am Kraftwerk Ettisbühl, Malters, *Bericht* Nr. 4264, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, unveröffentlicht.

Zarn, B. (1992). Lokale Gerinneaufweitung. *Mitteilungen* 118, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Anschrift der Verfasser

Georg Möller, Dipl.-Ing.
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
CH-8092 Zürich, moeller@vaw.baug.ethz.ch

Volker Weitbrecht, Dr.
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
CH-8092 Zürich, wv@vaw.baug.ethz.ch

Daniela Nussle, Dipl.-Ing.
Holinger AG
Etzbergstr. 23, CH-8405 Winterthur