

VERKLAUSUNG VON BRÜCKEN

EVALUIERUNG VERKLAUSUNGSINDUZIERTER ÜBERFLUTUNGSFLÄCHEN DURCH KOPPLUNG EINES PHYSIKALISCHEN UND NUMERISCHEN MODELLS

Bernhard Gems¹, Andreas Sendlhofer², Stefan Achleitner³, Matthias Huttenlau⁴ und
Markus Aufleger⁵

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Modellierung von Verklausungsprozessen und den Auswirkungen auf das Hochwasserrisiko in Siedlungsbereichen. Ein hybrides Modellkonzept wird vorgestellt und auf ein Siedlungsgebiet in einer alpinen Talschaft angewendet. Die Modellierung umfasst systematische Laborversuche ($M = 1:45$) zur Bestimmung verklausungsbedingter Rückstauereffekte an einer Brücke sowie einen 2D-numerischen Modellansatz zur Berechnung der Überflutungen. Die Ergebnisse des Modellversuches werden dabei in das numerische Modell implementiert. Aus den Versuchsergebnissen zeigt sich, dass die Charakteristik der Schwemmholzmischung, die hydraulischen und topografischen Verhältnisse im Brückenbereich sowie das Lichtraumprofil des Brückenquerschnittes für den Verklausungsprozess maßgebend sind. Das numerische Modell, welches für die großräumige Ermittlung der Überflutungsflächen verwendet wird, liefert auch im brückennahen Bereich eine gute Anpassung an die Ergebnisse des Modellversuches. Die Modellierung erfordert einen annähernd vollständigen Verschluss des Brückenquerschnittes. Bei detaillierter (ausschließlicher) Betrachtung des brückennahen Gewässerabschnittes ergeben sich mit einem 3D-numerischen Modellansatz höhere Anpassungsgüten. Beide numerischen Modelle sind vom Modellierungsmaßstab unabhängig.

Keywords: Verklausung, Schwemmholz, Überflutung, alpine Einzugsgebiete

ABSTRACT

The present paper deals with the modelling of log jam processes and its effects on flooding. A hybrid modelling concept is presented and applied to a settlement area in an alpine valley. The concept contains a physical scale model test ($M = 1:45$) for the determination of log jam induced backflow effects at a bridge and a 2D-numerical model for inundation mapping. The results from the experimental tests are implemented within the numerical model. The model tests show that the characteristics of the driftwood mixture, the hydraulic and topographic conditions in the near range of the bridge and as well the structure clearance are decisive parameters for the log jam process. The numerical model, which is used for flood plain simulation at a large spatial scale, provides as well a good fit to the obtained lab results close to the bridge. An almost complete closure of the bridge cross section is required. The use of a 3D-numerical approach in the context of a more detailed model exclusive for this river section delivers an even better fit. The results from both numerical models are independent from the model scale.

Keywords: log jam, driftwood, flooding, alpine catchments

¹ Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Gems. Unit of Hydraulic Engineering, University of Innsbruck, Austria (e-mail: bernhard.gems@uibk.ac.at)

² Dipl.-Ing. Andreas Sendlhofer. Unit of Hydraulic Engineering, University of Innsbruck, Austria

³ Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stefan Achleitner. Unit of Hydraulic Engineering, University of Innsbruck, Austria

⁴ Mag. Dr. Matthias Huttenlau. alpS - Centre for Climate Change Adaptation Technologies, Austria

⁵ Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Aufleger. Unit of Hydraulic Engineering, University of Innsbruck, Austria

EINFÜHRUNG

Die Modellierung hochwasserrelevanter Prozesse stellt ein wesentliches Werkzeug des modernen Schutzwasserbaus dar. Aufgrund schadenbringender Hochwässer in der vergangenen Dekade im Alpenraum und nicht zuletzt aufgrund der länderübergreifenden Direktive der Europäischen Union (2007) zur Analyse, Modellierung und Reduktion des Hochwasserrisikos wird ihr gegenwärtig verstärkt Bedeutung beigemessen.

An Gebirgsflüssen bzw. in Wildbacheinzugsgebieten des alpinen Raumes resultieren schadenverursachende Hochwasserereignisse häufig aus der Überlagerung des Abflusses mit Feststofftransportprozessen. Hohe Geschiebetransportraten können Ablagerungen im Schwemmkegelbereich sowie Ausuferungen bzw. Übersarungen des Siedlungsbereiches verursachen. Erosionsprozesse an der Gerinnesohle können zu Auskolkungen von Brückenstrukturen und zur Gefährdung der Bauwerksstabilität führen. Entlang der Böschungen können massive Geschiebeeinstöße aus den gewässernahen Geschiebeherden erfolgen. Der Transport von Schwemmholz bedeutet ebenfalls ein erhöhtes Hochwasserrisiko an Brücken. Rückstaueffekte infolge der Bauwerksverklausung bedingen einen erhöhten Wasserspiegel oberwasserseitig und damit verstärkt Ausuferungen in das angrenzende Vorland (Rimböck, 2003). Maßgebende Kriterien für die Ausprägung von Verklausungsprozessen sind die Menge der angeströmten Schwemmholzmischung, deren Zusammensetzung (Stammlänge und -durchmesser, Anteil an Wurzelstöcken, Verästelungsgrad) sowie die Transportcharakteristik. Die kontinuierliche Anströmung einer definierten Holzmenge ergibt im Vergleich zur schubweisen Anströmung ein geringeres Verklausungsrisiko. Hinsichtlich der konstruktiven Ausführung der Brücken sind die lichte Breite des Gerinnes sowie das verfügbare Freibord maßgebend ((Gantenbein, 2001), (Lange und Bezzola, 2006)). Gantenbein (2001) leitet aus seinen Untersuchungen die Empfehlungen ab, dass die Gerinnebreite im Brückenbereich mindestens dem Doppelten der angeströmten Stammlängen bzw. dass die lichte Höhe unter der Brücke zumindest dem 1.7-fachen der maßgebenden Abmessungen der angeströmten Wurzelstöcke entsprechen soll. Bouska und Gabriel (2009) empfehlen auf Basis von Modelluntersuchungen zur Bildung von Kolken und Verklausungen an Brücken ein Mindestfreibord von 1 m an der Brücke, um die Verklausungsgefahr zu reduzieren. Zum Schutz vor Auskolkungen ist die Sohle zu pflastern. Eine Minimierung des Aufstaus ist durch einen im Abstand einer Flussbreite oberstrom der Brücke angeordneten, geneigten Rechen zu erzielen (Bouska und Gabriel, 2009). Die schadlose Weiterleitung des Holzes im Bereich von Brücken erfordert möglichst gleichförmige Anströmverhältnisse, bauliche Strukturen, die das anströmende Holz nach Möglichkeit in Strömungsrichtung ausrichten bzw. glatte Strukturen an Stirn- und Unterseite der Brücke (Lange und Bezzola, 2006).

Aktuelle Forschungsaktivitäten zur Schwemmholzthematik befassen sich mit der Abschätzung des Holzpotentials im Einzugsgebiet, den Prozessmechanismen der Mobilisierung und des Transportes, der Wirksamkeit von Schutz- bzw. Rückhaltemaßnahmen bzw. der Verklausungswahrscheinlichkeit von Brücken. Im vorliegenden Beitrag werden zunächst die Ergebnisse systematischer Modellversuchsreihen (Maßstab $M = 1:45$) zur Bestimmung der Rückstaueffekte infolge der Verklausung einer Brücke dargestellt. Auf Basis dieser Ergebnisse wird ein konzeptioneller Modellansatz vorgestellt, mit dem die Ergebnisse der Modelluntersuchungen in ein 2D-numerisches Modell implementiert und die verklausungsinduzierten Überflutungsflächen im gefährdeten Siedlungsbereich ermittelt werden. Die Ergebnisse werden im Weiteren mit jenen eines 3D-numerischen Modellansatzes verglichen. Die numerischen Berechnungen erfolgen sowohl für den Natur- als auch für den Modellmaßstab.

Das Modellkonzept wird im Sinne einer exemplarischen Betrachtung auf das Siedlungsgebiet der Gemeinde Sölden (Ötztal, Tirol) bzw. auf eine darin situierte neuralgische Brücke angewendet. Der Einfluss des Geschiebetransportes auf die Abflussverhältnisse wird nicht berücksichtigt.

PROJEKTGEBIET

In Abbildung 1, rechts oben und links, ist das Projektgebiet dargestellt. Es befindet sich im Einzugsgebiet des Ötztales, der mit 893 km² größten alpinen Talschaft in Tirol. Der Bereich der

Überflutungsmodellierung betrifft das Talbecken von Sölden. Der Gewässerabschnitt der Ötztaler Ache umfasst eine Länge von 4.5 km, die 2D-numerisch modellierte Fläche beträgt 1.56 km². Die Ötztaler Ache ist in diesem Abschnitt als Gebirgsfluss zu charakterisieren, der mit durchschnittlich 1.1 % ein moderates Gefälle aufweist und im unmittelbaren Siedlungsbereich beidseitig verbaut ist. Der Talbereich von Sölden war in der Vergangenheit häufig von größeren Hochwässern betroffen. Als historisch höchster beobachteter Abfluss gilt HHQ = 380 m³/s. Aus der statistischen Analyse der Jahreshöchstabflüsse gemäß DVWK (1999) ergibt sich für den 100-jährlichen Abfluss die Bandbreite 270 m³/s - 500 m³/s. Die Verteilung des Wertinventars (Gebäude, Gebäudeinventar, Fahrzeuge) im Talbecken ist in Abbildung 1, links, veranschaulicht (graue Flächen).

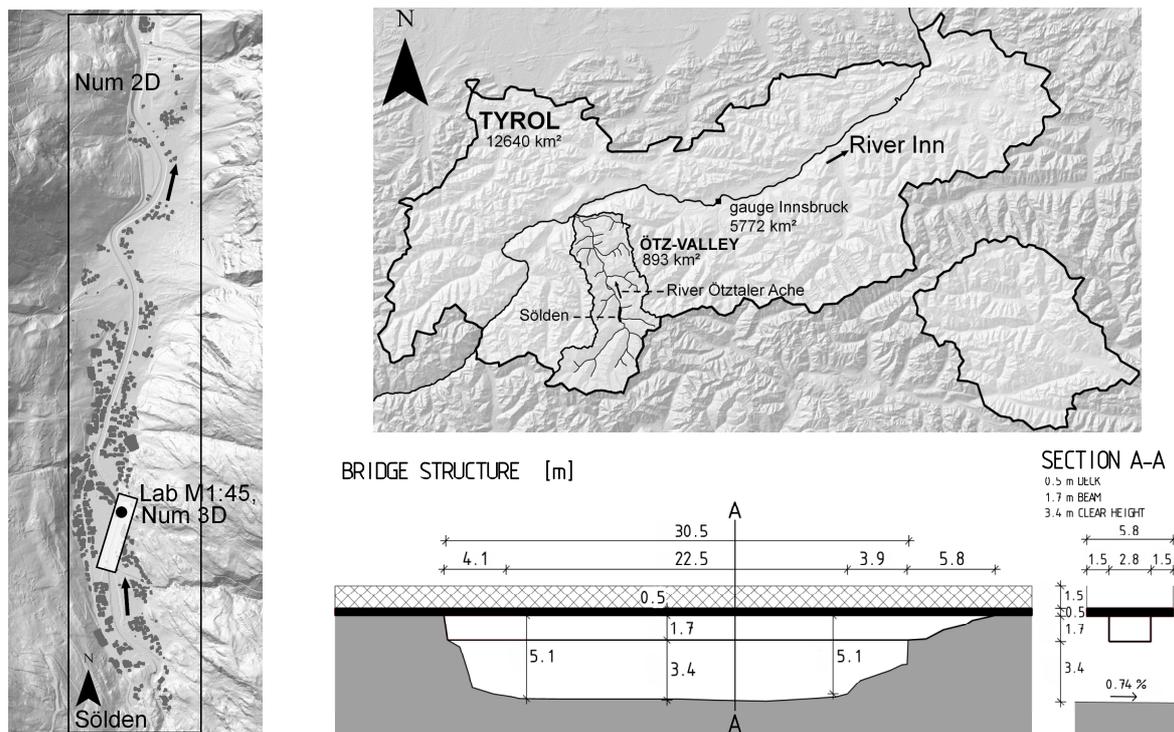


Fig. 1 Project area – left: flood plain in the village of Sölden, boundaries for physical and numerical modelling; top right: overview on the project area (Ötz-valley, Tyrol); bottom right: analysed bridge structure
Abb. 1 Projektgebiet – links: Talbecken von Sölden, Modellumgrenzung für die physikalische und numerische Modellierung; rechts oben: Übersicht über das Projektgebiet (Ötztal, Tirol); rechts unten: betrachtete Brücke

Die betrachtete Brücke befindet sich an der Ötztaler Ache 1.3 km unterhalb der oberstromigen Berandung des 2D-numerischen Modells (dargestellt durch den schwarzen Punkt in Abbildung 1, links). Das natürliche Einzugsgebiet beträgt an diesem Knoten 423 km². Etwa 30 % dieser Fläche sind bewaldet und damit für die Einschätzung des Holzpotentials im Einzugsgebiet relevant. Unmittelbar oberstrom der Brücke mündet orografisch rechts die Windache aus einem 48 km² großen Einzugsgebiet. Das Gerinne ist unverbaut, die Verklauungsgefahr der Brücke infolge angeströmten Schwemmholzes aus diesem Einzugsgebiet ist in hohem Maße gegeben.

Das physikalische Modell bildet einen 380 m langen Gewässerabschnitt, beginnend unmittelbar oberstrom der Einmündung der Windache bis etwa 50 m unterstrom der Brücke, ab (hellgraue Fläche in Abbildung 1, links). Im Modell werden ausschließlich die hydraulischen Verhältnisse im Gerinne der Ötztaler Ache betrachtet. Die Ausbreitung von Ausuferungen in den Vorlandbereich wird nicht erfasst. Der Modellbereich für die 3D-numerische Modellierung entspricht jenem des physikalischen Modellversuches. Abbildung 1, rechts unten, zeigt den Querschnitt der betrachteten Brücke. Die Brückenstruktur besteht aus einem Stahlträger mit darüber liegender Fahrbahn aus Stahlbeton und einem Geländer, welches als nicht schwemmholzdurchgängig zu charakterisieren ist. Die lichte Breite beträgt 30.5 m, die lichte Höhe etwa 3.4 m. Die Bauwerksstruktur umfasst keine Pfeilerstrukturen, eine nennenswerte Querschnittseinschnürung durch Brückenwiderlager ist nicht gegeben. Das durchschnittliche Gefälle der Ötztaler Ache im Nahbereich der Brücke beträgt 0.74 %.

METHODIK

Konzept der hybriden Modellierung

Abbildung 2 zeigt die Methodik der hybriden Modellierung verklausungsinduzierter Überflutungen:

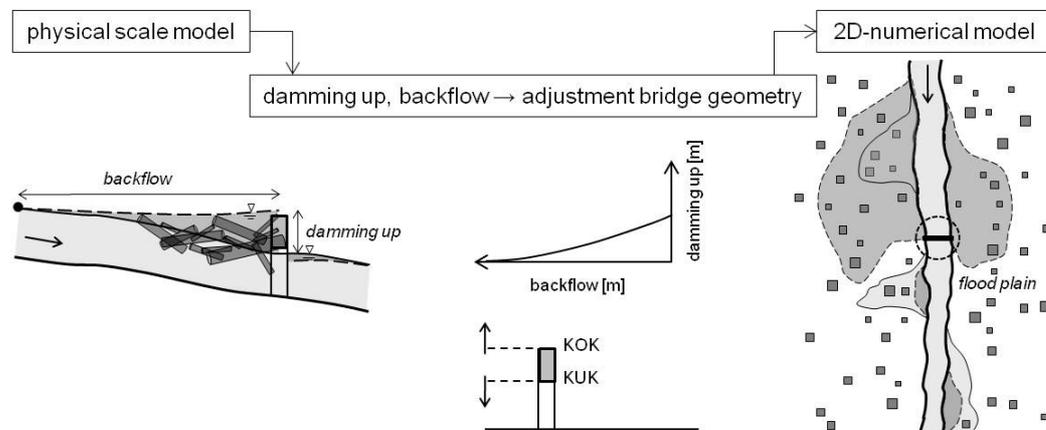


Fig. 2 Hybrid modelling concept of log jam induced flooding processes

Abb. 2 Konzept der hybriden Modellierung verklausungsinduzierter Überflutungen

Im Rahmen systematischer Versuchsreihen am physikalischen Modell werden zunächst für ein Spektrum an stationären Hochwasserabflüssen die Wasserspiegellagen einerseits für den Reinwasserzustand und in der Folge für den (teil)verklausen Zustand gemessen. Aus deren Differenzen ergibt sich jeweils der oberwasserseitige Auf- bzw. Rückstau. Für die Abschätzung des Schwemmhölzeintrages ins physikalische Modell werden empirische Schätzformeln nach Rickenmann ((1997), siehe Gems (2011) bzw. Sendlhofer (2010)) zur Bestimmung des Schemmhölzpotentials bzw. der effektiven Schwemmhölzmenge angewendet. Die Ansätze beinhalten ausschließlich einzugsgebietsspezifische Parameter und sind von der Ausprägung der Hochwasserwelle (Abflussspitze oder -fracht) unabhängig. Die Charakterisierung der Holzmischungen (Stammlänge und -durchmesser, Verästelungsgrad) erfolgt auf Basis von Beobachtungen im Zuge des Hochwassers im August 2005 an Schweizer Wildbächen gemäß Waldner et al. (2007) (siehe Gems (2011) bzw. Sendlhofer (2010)). Die Zugabe des Holzes ins Modell geschieht schubweise.

Die 2D-numerische Modellierung des überflutungsrelevanten Talraumes wird an die im Bereich der Brücke gemessenen Wasserspiegellagen angepasst. Für die Kalibrierung der Sohl- und Böschungsrauheiten werden jene Messungen für die nichtverklausen bzw. nicht eingestauten Abflussverhältnisse herangezogen. Der Effekt der Verklausung wird im Weiteren durch Anpassung der Konstruktionsunter- und -oberkante der Brücke (KUK und KOK) nachgebildet. Das Ergebnis des hybriden Modellkonzeptes stellen Änderungen in der Ausbreitung und den Intensitäten der Überflutungsflächen im Siedlungsbereich dar, die sich infolge der Verklausung im Vergleich zum Reinwasserzustand einstellen.

Die 2D-numerische Modellierung basiert auf einer instationären Betrachtung historischer Hochwässer. Für die Definition der jeweiligen Abflussganglinien an der oberstromigen Modellberandung sowie an den seitlichen Zubringern aus den Wildbacheinzugsgebieten werden die Ergebnisse der gekoppelten hydrologisch-1D-hydraulischen Modellierung gemäß Gems (2011) bzw. Gems et al. (2009) herangezogen. Der stationäre Abfluss im Modellversuch entspricht dabei der Abflussspitze der instationären Hochwasserwelle im numerischen Modell. Der zeitliche Aspekt bei der Ausbildung des Verklausungskörpers wird im numerischen Modell vernachlässigt. Die Anpassung von KUK und KOK erfolgt vereinfachend für die gesamte Dauer der Hochwasserwelle.

Physikalischer Modellversuch

Dem physikalischen Modell liegt die Froudesche Modellähnlichkeit zugrunde, der Maßstab beträgt $M = 1:45$. Die Versuchsdurchführung erfolgt unter Vernachlässigung des Geschiebetransportes, entsprechend repräsentiert die Gerinnesohle eine feste Oberfläche bzw. wird dem Modell bei

stationären Abflussverhältnissen ausschließlich Holz zugegeben. Die Gleichungen (1) und (2) enthalten die Bestimmung der ereignisbezogenen, bei der Versuchsdurchführung schubweise zugegebenen Schwemmholzmenge. Die Ansätze in (1) nach Rickenmann (1997) liefern eine Abschätzung der lose angehäuften, ereignisbezogenen Schwemmholzmenge H in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße EZG sowie des Schwemmholzpotentials H_{pot} in Abhängigkeit der Größe des bewaldeten Einzugsgebietes EZG_w . Im Sinne einer Mittelwertbildung von H und H_{pot} sowie unter der Annahme einer Holzdichte von $\rho_H = 500 \text{ kg/m}^3$ und eines Auflockerungsfaktors $a = 3.5$ zwischen dem Locker- und Festvolumen des Holzes (siehe Lange und Bezzola (2006)) ergibt sich mit $M = 1:45$ eine ereignisbezogene Holzmenge von 4.02 kg.

$$H = 45 \cdot EZG^{2/3} = 2535 \text{ [m}^3\text{]}; \quad H_{pot} = 90 \cdot EZG_w = 2595 \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

$$\frac{H + H_{pot}}{2} \cdot \frac{\rho_H}{a} \cdot \left(\frac{1}{M}\right)^3 = 4.02 \text{ [kg / Ereignis]} \quad (2)$$

In Abbildung 3 sind die im Rahmen dieser Studie betrachteten Abflüsse angeführt. Zudem sind die drei untersuchten Holzmischungen SHA, SHB und SHC dargestellt. Die betrachteten Holzmischungen unterscheiden sich vorwiegend durch den Verästelungsgrad voneinander. Die charakteristischen Stammlängen und Stammdurchmesser sind im Wesentlichen identisch.

Der Transport von Schwemmholz ist im Allgemeinen als stochastischer Prozess zu beurteilen. Sowohl die Mobilisierung und der Transport des Holzes im Gewässer als auch die Ausprägung des Verkläusungskörpers sind bei identischen Abflussverhältnissen gewissen Schwankungen unterworfen. In der Versuchsdurchführung wird diesem Umstand insofern Rechnung getragen, als jede Abfluss-Holz-Konfiguration unter identischen Randbedingungen jeweils dreimal betrachtet wird. Die Auswertung der Wasserspiegellagen erfolgt als Mittelwert für jede Konfiguration.



Fig. 3 Physical scale model – left: steady-state conditions; right: driftwood mixtures SHA, SHB, SHC

Abb. 3 Physikalischer Modellversuch – links: stationäre Abflüsse; rechts: Holzmischungen SHA, SHB, SHC

2D-numerische Modellierung

Für die 2D-numerische Modellierung werden die Softwareprodukte HYDRO_GS-2D (Nujic, 2009) bzw. SMS verwendet. Datengrundlage des zugrundeliegenden Rechnernetzes bilden terrestrische Flussprofilvermessungen und die Vermessung von Brücken, Durchlässen, usw.. Für die Modellierung des Vorlandbereiches werden zudem Airborne Laserscanning-Rasterdaten mit einer Auflösung von 1 m und Katasterpläne mit Informationen über die Lage von Gebäuden und die Ausbreitung der jeweiligen Nutzungsflächen herangezogen. Das Modell umfasst 66500 Netzelemente, die hydrodynamischen Berechnungen erfolgen auf Reinwasserbasis. Entsprechend der hydrologisch-1D-hydraulischen Modellierung historischer Hochwässer für das gesamte Ötztal ((Gems, 2011) bzw. (Gems et al., 2009)) münden entlang des Modellabschnittes neun relevante Zubringer aus den seitlichen Wildbacheinzugsgebieten. Die zeitliche Diskretisierung der modellierten Hochwasserganglinien basiert auf einem konstanten Zeitintervall $\Delta t = 15 \text{ min}$.

Für die Modellkalibrierung steht ein Abflusspegel 0.9 km oberstrom des Modellausflusses zur Verfügung. Die Anpassung der Rauheiten der Flusssohle bzw. der Böschungen erfolgt unter Betrachtung des Hochwassers vom September 1999 (am Pegel beträgt die Abflussspitze $HQ_{max,99} = 290 \text{ m}^3/\text{s}$). Aus der Modellkalibrierung resultieren Strickler-Rauheiten $k_{ST} = 32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ für

die Sohle im verbauten Flussabschnitt im Siedlungsbereich bzw. Werte im Bereich $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ - $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ für die Böschungen (Gems, 2011). Für jenen Abschnitt der Ötztaler Ache, welcher auch im physikalischen Modell untersucht wird, erfolgt im Sinne einer Anpassung der Wasserspiegellagen an die Versuchsmessungen eine weitere Adaptierung dieser Rauheiten.

Die Bauwerksmodellierung basiert in der 2D-numerischen Modellierung auf empirischen Ansätzen. Für die Überströmung von Brücken wird in HYDRO_GS-2D (Nujic, 2009) die Überfallformel nach Gleichung (3) angewendet. h_{UW} und h_{OW} bedeuten darin die Wasserstände unmittelbar ober- und unterstrom der Brücke. μ entspricht dem Überfallbeiwert, b der abflusswirksamen Bauwerksbreite und h_w entweder dem oberwasserseitigen Wasserspiegel bezogen auf die Kronenhöhe (KOK) oder der korrespondierenden Energiehöhe (Nujic, 2009). Bei der Modellierung der Bauwerksunterströmung werden softwarespezifisch freier und druckhafter Abfluss bzw. Strömungszustände mit und ohne Fließwechsel im Bauwerksbereich unterschieden. Die Berechnung erfolgt unter Anwendung von Gleichung (4) mit dem Abflussfaktor c , der durchströmten Fläche A im maßgebenden Abflussquerschnitt sowie der Höhendifferenz Δh zwischen dem Wasserstand h_{OW} im Oberwasser und jenem im maßgebenden Abflussquerschnitt. Für den Fall, dass sich im Brückenbereich ein Fließwechsel einstellt, errechnet sich Δh aus der Differenz zwischen h_{OW} und der Bauwerksunterkante (KUK), ansonsten entspricht Δh der Wasserstandsdifferenz ($h_{OW} - h_{UW}$) (Nujic, 2009). Für die durchgeführten 2D-numerischen Berechnungen wird μ konstant zu 0.55 gesetzt bzw. h_w als Differenz zwischen h_{OW} und der Kronenhöhe (KOK) angenommen.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h_{UW}}{h_{OW}}\right)^6} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_w^3} \quad (3)$$

$$Q = c \cdot A \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (4)$$

Es werden im Folgenden die wesentlichen Ergebnisse des physikalischen Modellversuches sowie die Auswirkungen auf die Überflutungsflächen beschrieben. Hinsichtlich der modellgetreuen Nachbildung der Aufstau- bzw. Rückstaueffekte im oberwasserseitigen Einflussbereich der Brücke wird des Weiteren der Vergleich des 2D-numerischen Modells mit dem 3D-numerischen Modellansatz (Software FLOW-3D (Flow Science Inc., 2010)) dargestellt. Die Gegenüberstellung der numerischen Modelle erfolgt sowohl für den Modellmaßstab $M = 1:45$ als auch für den Naturmaßstab.

ERGEBNISSE DES PHYSIKALISCHEN MODELLVERSUCHES

Die Abbildungen 4 und 5 enthalten die Ergebnisse der systematischen Modellversuchsreihen für die Abflüsse $Q = 163 \text{ m}^3/\text{s}$ (12.0 l/s), $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ (22.1 l/s) und $Q = 435 \text{ m}^3/\text{s}$ (32.0 l/s) bzw. für den Reinwasserzustand und die Holzmischungen SHA, SHB und SHC. Die schwarzen Linien in Abbildung 4 repräsentieren die Wasserspiegellagen für den Reinwasserzustand. Die grau dargestellten Wasserspiegel entsprechen den Ergebnissen der Versuchsdurchführung mit Holzzugabe. Die Messung der Wasserspiegel erfolgt in einem Bereich von +250 m stromaufwärts und -25 m stromabwärts ausgehend vom Brückenquerschnitt. In Abbildung 5 sind sämtliche Wasserspiegelmessungen in Abhängigkeit der Schwemmh Holz Mischung (links) bzw. in Abhängigkeit des Abflusses (rechts) kategorisiert. Die Diagramme illustrieren den Einfluss von Stammlänge, Stammdurchmesser, vom Verästelungsgrad sowie vom Abfluss auf den Aufstau. Die Zusammenschau sämtlicher Messergebnisse veranschaulicht die zu erwartenden Bandbreiten der Aufstauhöhen und Rückstaulängen.

Aus den Ergebnissen zeigt sich der Einfluss der Charakterisierung der Holzmischung auf die Verklauungswahrscheinlichkeit bzw. auf die Ausprägung des Verklauungskörpers und der Aufstauhöhen. Die Zugabe von SHA mit dem größten Verästelungsgrad (siehe Abbildung 3) führt bei sämtlichen Abflüssen zur Verklauung bzw. resultiert in den größten Aufstauhöhen. Für $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ (22.1 l/s) und $Q = 435 \text{ m}^3/\text{s}$ (32.0 l/s) liegen die Ergebnisse mit SHC im Bereich jener mit SHA, für $Q = 163 \text{ m}^3/\text{s}$ (12.0 l/s) fällt der Aufstau geringer aus. Mit der Zugabe von SHB stellt sich bei diesem Abfluss keine Verklauung ein. Bei den beiden höheren Abflüssen liegen die Wasserspiegellagen

deutlich unter jenen für SHA und SHC. Die beschriebenen Auswirkungen auf die Verklauungswahrscheinlichkeit und auf die Wasserspiegellagen sind somit auf den Verästelungsgrad zurückzuführen.

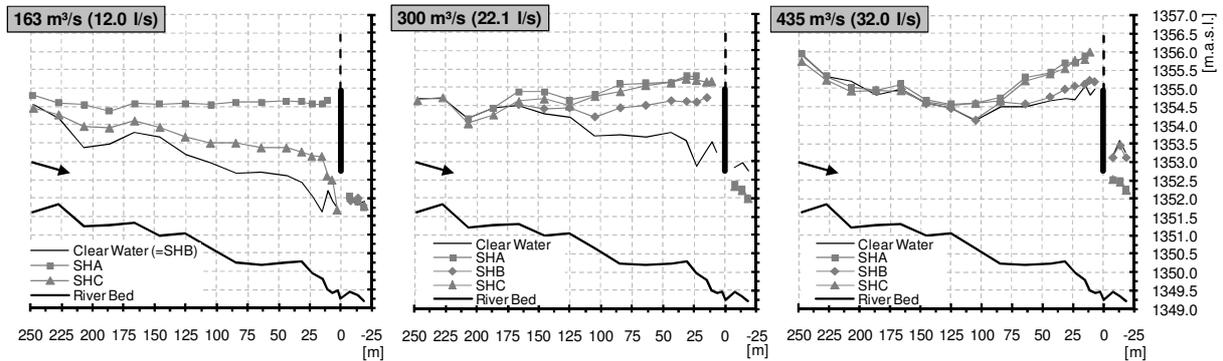


Fig. 4 Results from the physical scale model test with the discharges $Q = 163 \text{ m}^3/\text{s}$ (12.0 l/s), $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ (22.1 l/s) and $Q = 435 \text{ m}^3/\text{s}$ (32.0 l/s) and the driftwood mixtures SHA, SHB, SHC

Abb. 4 Ergebnisse des physikalischen Modellversuchs für die Abflüsse $Q = 163 \text{ m}^3/\text{s}$ (12.0 l/s), $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ (22.1 l/s) und $Q = 435 \text{ m}^3/\text{s}$ (32.0 l/s) bzw. für die Holzmischungen SHA, SHB, SHC

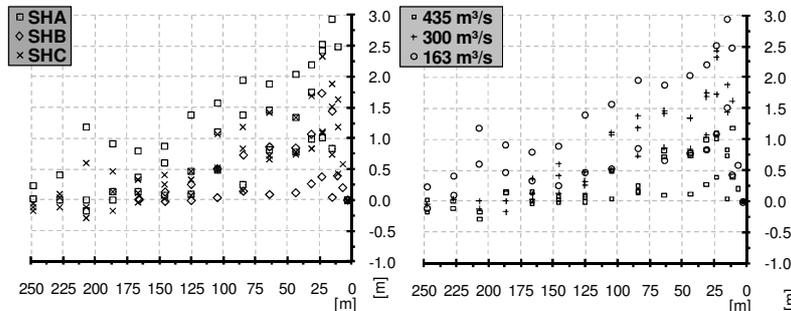


Fig. 5 Results of the physical scale model test subjected to the driftwood mixture (left), the discharge (right)

Abb. 5 Kategorisierung der Ergebnisse des physikalischen Modellversuchs in Abhängigkeit der Holzmischung (links), des Abflusses (rechts)

Aus dem Vergleich der Wasserspiegellagen für die betrachteten Abflüsse (Abbildung 4) ist ersichtlich, dass die Aufstauhöhen mit zunehmendem Abfluss abnehmen. Die Ursache hierfür liegt im Zusammenhang der hydraulischen und topografischen Verhältnisse begründet: Mit zunehmendem Abfluss verringert sich das Retentionspotential im Gerinne. Infolge der sich einstellenden Ausuferungen ins Vorland sind die Aufstauhöhen mit der Lage der Böschungsoberkante limitiert.

Ein klarer Zusammenhang zwischen dem Aufstau und dem Verdichtungsgrad des Verklauungskörpers ist aus den Modellversuchsreihen nicht abzuleiten. Der Zeitpunkt der Verklauung des ersten Holzelementes bestimmt die Ausprägung des Verklauungskörpers – mit zunehmendem Verästelungsgrad bzw. abnehmendem Freibord an der Brücke tritt dieser Vorgang entsprechend früher ein. Der Einfluss auf die sich einstellenden Wasserspiegellagen ist allerdings vergleichsweise gering.

Im Unterwasserbereich der Brücke sinkt der Wasserspiegel mit dem oberwasserseitigen Aufstau zunehmend ab. Der Einstau der Brücke bzw. die druckhaften Abflusszustände (auch jene für den Reinwasserzustand) sind mit einem Wechsel des Abflussregimes verbunden (Abbildung 4).

ERGEBNISSE DER 2D-NUMERISCHEN MODELLIERUNG

Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der Wasserspiegellagen und Aufstauhöhen des 2D-numerischen Modells und aus den Untersuchungen am physikalischen Modell.

Die Reinwasserberechnung erfolgt jeweils für die drei Abflüsse auf Basis der unveränderten Lage der KUK (1352.74 m.ü.A.). Der Vergleich für die Verklauungsszenarien basiert auf der Wasserspiegeländerung relativ zur Reinwasserberechnung. In der numerischen Simulation erfolgt eine

schrittweise Absenkung der KUK auf 1351.74 m.ü.A., 1350.74 m.ü.A. und 1349.51 m.ü.A.. Letztere Absenkung bedeutet einen nahezu vollständigen Verschluss (Öffnungshöhe ≈ 0.05 m).

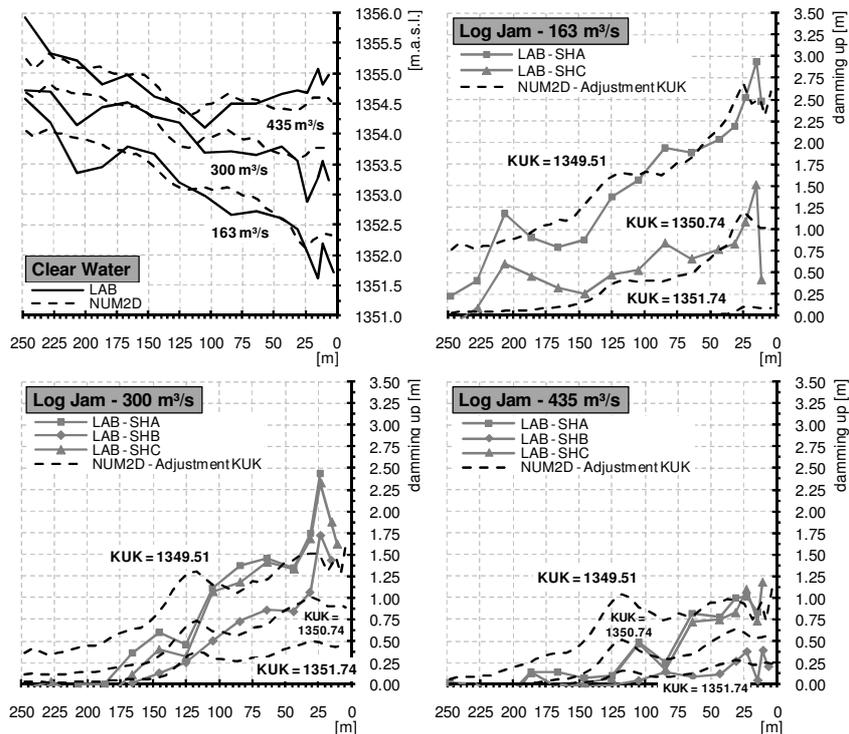


Fig. 6 Matching of the 2D-numerical model using the results of the physical scale model test

Abb. 6 Anpassung der 2D-numerischen Modellierung an die Ergebnisse des physikalischen Modellversuches

Den Berechnungen für $Q = 163 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt für die Sohle im Einflussbereich der Brücke der Strickler-Beiwert $k_{ST} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ zugrunde. Für $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q = 435 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt sich aus der Kalibrierung mit $k_{ST} = 26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ein geringerer Einfluss der Sohlrauheiten auf die Strömungsverhältnisse.

Abbildung 6 (links oben) zeigt eine unter Zugrundlegung der angeführten Rauheiten aus der Modellkalibrierung gute Anpassung der Wasserspiegellagen im Reinwasserzustand. Unmittelbar an der Brücke fällt der Einstau in der 2D-numerischen Modellierung mit zunehmendem Abfluss tendenziell zu gering aus. Gemäß den dargestellten Wasserspiegellagen ist das Strömungsbild bei den Untersuchungen am physikalischen Modell in diesem Bereich turbulenter. Die Nachbildung der Aufstauhöhen im 2D-numerischen Modell erfordert im Allgemeinen einen annähernd vollständigen Verschluss des Brückenquerschnittes. Für den brückennahen Bereich ergibt sich damit eine gute Anpassung, mit zunehmender Entfernung in Richtung oberstrom werden die Wasserspiegellagen aus den Modelluntersuchungen teilweise erheblich überschätzt. Für die Nachbildung der Ergebnisse für SHA und SHC ist die Annahme $KUK = 1349.51 \text{ m.ü.A.}$ zu treffen, für die Ergebnisse für SHB liegt KUK je nach Abfluss im Bereich zwischen 1351.74 m.ü.A. und 1350.74 m.ü.A. . Die Anpassung der berechneten Aufstauhöhen an die Ergebnisse des physikalischen Modellversuches ist für geringe Abflüsse im Allgemeinen und für hohe Abflüsse unmittelbar an der Brücke als gut zu bewerten. Im Bereich ab etwa 100 m oberstrom der Brücke ergeben sich bei hohen Abflüssen mäßige Anpassungsgüten.

Für die pauschale Annahme $KUK = 1349.51 \text{ m.ü.A.}$ werden im Folgenden die Auswirkungen auf die Ausbreitung der Überflutungsflächen im Talbecken von Sölden schematisiert bzw. beschrieben. Abbildung 7, jeweils links, enthält für die drei betrachteten Abflüsse die Verhältnisse der Wassertiefen für den Reinwasserzustand und den verkleauten Zustand. Die Auswertung erfolgt für den gesamten mit Wasser benetzten Bereich im Vorland und für die Ötztaler Ache auf Basis eines regelmäßigen Rasters mit der Zellengröße 5 m.

Die jeweils rechts dargestellten Diagramme basieren auf einer Klassifizierung der berechneten Wassertiefen von 0 bis 2.0 m in 0.25 m Schritten. Alle Wassertiefen $> 2 \text{ m}$ werden gesammelt

betrachtet. Um die Veränderung im Verklauungsfall zu erfassen, wird der Klassensprung bzw. die entsprechende Wasserspiegelzunahme jeder Zelle ermittelt. In Abbildung 7 (Mitte) ist die empirische Häufigkeitsverteilung der Wasserspiegeländerung (-2.25 m bis +2.25 m) entsprechend der definierten Klassen dargestellt. Die dargestellten Verhältnisse der Wassertiefen (Abbildung 7, links) bzw. die Veränderung der Wassertiefenklassen (Abbildung 7, Mitte) zeigen, dass sich der Einfluss der Brückenverklauung im Sinne eines erhöhten Hochwasserrisikos mit zunehmendem Abfluss zunehmend stärker auswirkt. Die Anzahl an Rasterzellen, in denen sich eine Erhöhung der Wassertiefe ergibt, fällt, wenn auch begründet durch die größere Ausdehnung der Überflutungsflächen, für $Q = 435 \text{ m}^3/\text{s}$ am größten aus. Ebenso ist das Verhältnis dieser Anzahl mit der Anzahl an Zellen, in denen die Wassertiefe unverändert bleibt bzw. sich verringert, für $Q = 435 \text{ m}^3/\text{s}$ am größten.

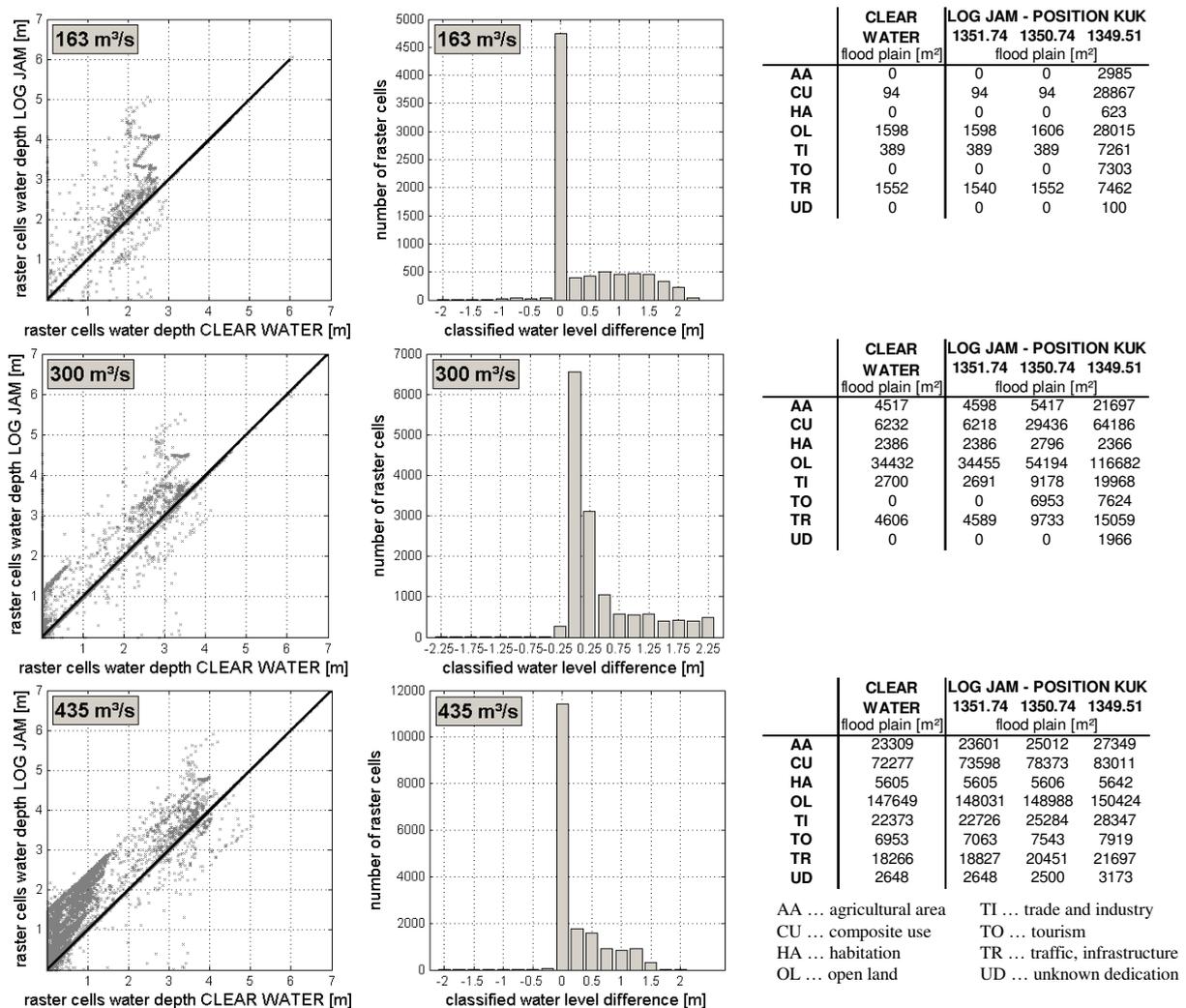


Fig. 7 Log jam effects on flooding on the basis of a raster-cell-based flood plain mapping; left: ratios of the raster cells water depths for clear water and for the log jam scenario KUK = 1349.51 m.a.s.l.; center: number of raster cells according to the classified water level differences (KUK = 1349.51 m.a.s.l.); right: flood plain area as a function of the defined dedication classes

Abb. 7 Rasterzellenbasierte Darstellung der verklauungsinduzierten Überflutungsflächen; jeweils links: Verhältnisse der Wassertiefen für den Reinwasserzustand und das Verklauungsszenario KUK = 1349.51 m.ü.A.; Mitte: Anzahl der Rasterzellen in Abhängigkeit der Änderung der Wassertiefenklassen (KUK = 1349.51 m.ü.A.); rechts: Ausbreitung der Überflutungsflächen in den definierten Nutzungsklassen

Für die drei betrachteten Abflüsse ergeben sich aus der 2D-numerischen Modellierung Vorlandbereiche, wo sich im Falle der Brückenverklauung die Wassertiefen verringern. Diese Bereiche umfassen einerseits den Gewässerabschnitt der Öztaler Ache unterstrom der Brücke. Hier

stellt sich durch den annähernd vollständigen Verschluss des Querschnittes ein im Vergleich zum Zufluss zur Brücke geringerer Abfluss ein. Weitere Bereiche, in denen sich das Hochwasserrisiko verringert, sind gefährdete Vorlandbereiche im unteren Bereich des Talbeckens. Die Verklauung und die verstärkte Ausuferung im oberen Bereich des Talbeckens hat hierfür die Wirkung einer Retentionsanlage. Ein erheblicher Anteil der ankommenden Hochwasserwelle wird im Brückenbereich zurückgehalten bzw. ins angrenzende Vorland ausgeleitet.

In den tabellarischen Übersichten in Abbildung 7, jeweils rechts, sind für jeden der betrachteten Abflüsse die von Ausuferungen betroffenen Flächen aufgelistet. Die angeführten Flächenangaben basieren auf der Charakterisierung des Vorlandes in Nutzungsklassen gemäß dem aggregierten Flächenwidmungsplan. Insbesondere mit KUK = 1349.51 m.ü.A. ergibt sich eine erhebliche Vergrößerung der Überflutungsflächen, hier vor allem für $Q = 163 \text{ m}^3/\text{s}$, wobei die Ausuferungen bei diesem Abfluss bis KUK = 1350.74 m.ü.A. unverändert bleiben (nicht auftreten).

ZUR WAHL DES NUMERISCHEN MODELLANSATZES

Aus der Anwendung des hybriden Modellkonzeptes bzw. der Beurteilung der Anpassungsgüten der 2D-numerischen Modellierung an die Wasserspiegelmessungen aus dem Modellversuch ergibt sich die Fragestellung, inwieweit ein 2D-numerischer Modellansatz für die Abbildung der hydraulischen Verhältnisse im Nahbereich einer Brücke geeignet ist. Ungeachtet der Problematik, dass die Berechnung von Überflutungsflächen für größere Gebiete die Anwendung eines 2D-numerischen Modells erfordert, basiert die Hydraulik im Brückenbereich sowohl für den druckhaften Abfluss unter dem Bauwerk als auch für die Überströmung auf empirischen Ansätzen (Gleichungen (3) und (4)). Es erfolgt der Vergleich der Simulationen mit einem 2D- und 3D-numerischen Modell im Nahbereich der Brücke. Dabei stellt sich zudem die Frage nach dem Einfluss des gewählten Modellierungsmaßstabes auf die Ergebnisse. Sowohl die 2D- als auch die 3D-numerische Modellierung erfolgen hierfür auf Basis des Naturmaßstabes und des Modellmaßstabes $M = 1:45$.

Das 3D-numerische Modell (Software FLOW-3D (Flow Science Inc., 2010)) basiert auf der räumlichen Diskretisierung mit einem orthogonalen Gitter (Zellgröße Naturmaßstab: 0.90 m, Modellmaßstab: 0.02 m). Aus der Modellkalibrierung für die betrachteten Durchflüsse zeigt sich aufgrund der hochaufgelösten räumlichen Diskretisierung eine sehr schwache Abhängigkeit der berechneten Wasserspiegellagen von der Rauheit. Den in den Abbildungen 8 und 9 dargestellten Ergebnissen liegt eine äquivalente Sandrauheit $k_s = 0.05 \text{ m}$ für den Naturmaßstab bzw. $k_s = 0.001 \text{ m}$ für den Modellmaßstab zugrunde.

Abbildung 8 enthält den Vergleich der Wassertiefen im Bereich oberstrom der Brücke. Die Werte sind jeweils ins Verhältnis zu den Ergebnissen aus den Laboruntersuchungen gesetzt. Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Reinwasserzustände zeigt sich, dass die Wassertiefen der 3D-numerischen Modellierung durchwegs geringer ausfallen. Sie unterschätzen die Ergebnisse des Modellversuchs tendenziell, jedoch ist deren Anpassungsgüte höher als jene der 2D-numerischen Modellierung. Die mit dem 2D-numerischen Modellansatz berechneten Wassertiefen fallen insbesondere bei geringeren Aufstauhöhen höher aus. Dies zeigt sich in den Ergebnissen für die Reinwasserbetrachtung mit dem Abfluss $Q = 163 \text{ m}^3/\text{s}$ sowie im Vergleich der Ergebnisse der Verklauungsszenarien (Anpassungen von KUK). Die Wassertiefenverhältnisse fallen für KUK = 1351.74 m.ü.A. am größten aus. Mit zunehmendem Abfluss verringert sich die Differenz in den Wassertiefenverhältnissen für die jeweiligen Annahmen für KUK.

Aus der Zusammenschau der Ergebnisse in den Abbildungen 6 und 8 ist ersichtlich, dass der sich einstellende Aufstau unmittelbar oberstrom der Brücke infolge einer Verklauung bzw. infolge der Absenkung der Brückenunterkante KUK mit zunehmendem Abfluss bzw. mit zunehmendem Verschlussgrad tendenziell unterschätzt wird.

Abbildung 9 enthält sowohl für die 2D- als auch für die 3D-numerische Modellierung den Vergleich der Ergebnisse auf Basis des Naturmaßstabes und des Modellmaßstabes $M = 1:45$. Die im Rückstaubereich der Brücke berechneten Wassertiefen sind darin für den Reinwasserzustand bzw. für die Verklauungsszenarien einander gegenübergestellt. Die Diagramme zeigen geringfügige bzw. vernachlässigbare Unterschiede in den Ergebnissen. Die Wahl des Modellmaßstabes ist bei der

numerischen Modellierung der Aufstau- und Rückstauprozesse an Brücken daher als nicht relevant zu bewerten.

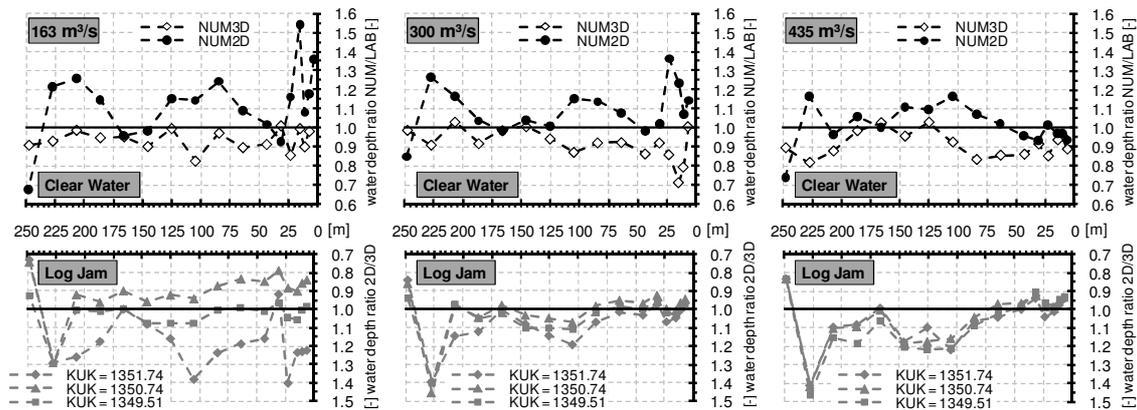


Fig. 8 Results from 2D- and 3D-numerical modelling – top row: ratios of the water depths resulting from the numerical models and the physical scale model test for the clear water scenario; bottom row: ratios of the water depths from the 2D-and 3D-numerical model for the log jam scenario

Abb. 8 Ergebnisse aus der 2D- und 3D-numerischen Modellierung – oben: Verhältnisse der Wassertiefen aus den numerischen Berechnungen und den Modelluntersuchungen für den Reinwasserzustand; unten: Verhältnisse der Wassertiefen aus der 2D- und 3D-numerischen Berechnung für die Verkläusungsszenarien

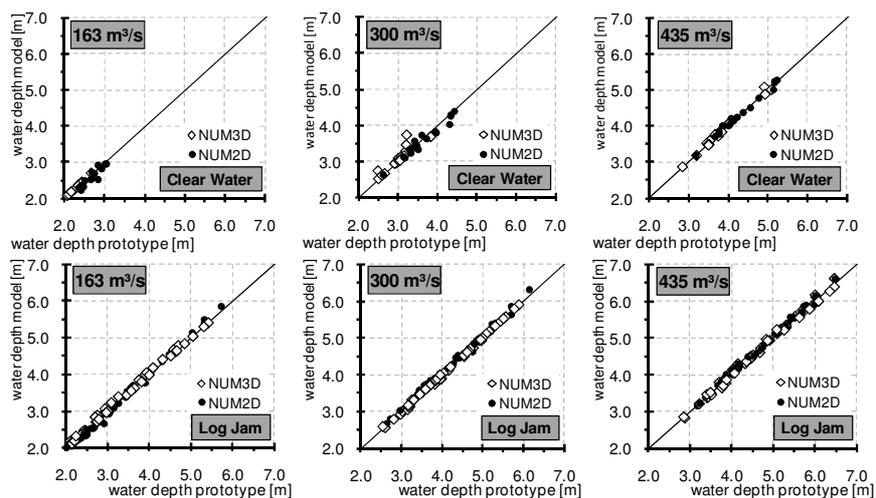


Fig. 9 Results from numerical modelling with the prototype and model scale – comparison of the calculated water depths for the upstream river section both for the clear water scenario and all considered log jam scenarios

Abb. 9 Ergebnisse aus der numerischen Modellierung unter Zugrundelegung des Natur- und Modellmaßstabes – Gegenüberstellung der berechneten Wassertiefen im Rückstaubereich oberstrom der Brücke für den Reinwasserzustand bzw. für sämtliche Verkläusungsszenarien

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das vorgestellte hybride Modellkonzept zur Modellierung von Verkläusungsprozessen ermöglicht eine gute Einschätzung von verkläusungsinduzierten Überflutungsflächen bzw. des damit einhergehenden Hochwasserrisikos.

Aus der Durchführung des physikalischen Modellversuches erweisen sich vor allen Dingen die Schwemmholtzmischung sowie die topografischen Verhältnisse in Kombination mit den vorherrschenden Abflüssen als jene Parameter, die das Auftreten einer Verkläusung und die Rückstauereffekte maßgebend bestimmen. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Annahme stationärer Verhältnisse bzw. auf einem schubweisen Eintrag des Schwemmholzes in den betrachteten Gerinneabschnitt. Der Zeitpunkt des Verkläusens des ersten Holzelementes bestimmt die Ausprägung des Verkläusungskörpers. In Ergänzung zur Betrachtung verschiedener Holzzusammensetzungen ist

die Fragestellung, inwieweit verschiedene Holzmengen bzw. ein verzögerter, mit dem Abfluss korrelierter Eintrag des Holzes ins Modell die Aufstauhöhen beeinflussen, Gegenstand weiterer Untersuchungen am physikalischen Modell.

Die Implementierung der Ergebnisse aus dem Modellversuch in das 2D-numerische Modell erfordert einen annähernd vollständigen Verschluss des Gerinnequerschnittes an der Brücke. Die hydraulische Berechnung des druckhaften Abflusses bzw. der Bauwerksüberströmung basiert dabei auf empirischen Ansätzen. Für die Aufgabenstellung, die Auswirkungen von Verklausungen auf die Überflutungsflächen in einem größeren Siedlungsbereich zu erfassen, ist das vorgestellte hybride Modellkonzept gut geeignet. Bei der ausschließlichen Betrachtung der hydraulischen Verhältnisse im Gewässerabschnitt im Bereich der Brücke bzw. der Nachbildung der Modellversuchsergebnisse eignet sich ein 3D-numerischer Modellansatz besser. Die erzielte Anpassung der Wasserspiegellagen ist von höherer Güte als jene der 2D-numerischen Modellierung. Hinsichtlich der sich einstellenden Aufstauhöhen bei zunehmendem Verschluss des Brückenquerschnittes zeigen Modellrechnungen für den Natur- und Modellmaßstab, dass die numerischen Modelle maßstabsunabhängig sind.

LITERATUR

- Bouska P. & Gabriel P. (2009). Results of a research project on flood protection of bridges. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, 9.-14. August 2009, Vancouver, Eigenverlag - IWA/IAHR, 6431-6438.
- DVWK (1999). 251/1999 - Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Bonn: Verlag Paul Parey, Bonn, 52 Seiten.
- Europäische Union (2007). Amtsblatt der Europäischen Union. Richtlinie 2007/60 EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken, 6.11.2007, L 288/27 - L 288/34.
- Flow Science Inc. (2010). FLOW-3D Version 9.4.2 User Manual.
- Gantenbein S. (2001). Verklausungsprozesse - Experimentelle Untersuchungen. Diplomarbeit, VAW - ETH Zürich, Diplomarbeit, 107 Seiten.
- Gems B. (2011). Entwicklung eines integrativen Konzeptes zur Modellierung hochwasserrelevanter Prozesse und Bewertung der Wirkung von Hochwasserschutzmaßnahmen in alpinen Talschaften - Modellanwendung auf Basis einer regionalen Betrachtungsebene am Beispiel des Ötztales in den Tiroler Alpen. Arbeitsbereich Wasserbau - Universität Innsbruck, Dissertation, 274 Seiten.
- Gems B., Achleitner S., Huttenlau M., Thieken A. & Aufleger M. (2009). Flood Control Management for an Alpine Valley in Tyrol - an Integrated Hydrological-Hydraulic Approach. 33rd Congress of the International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) "WATER ENGINEERING FOR A SUSTAINABLE ENVIRONMENT". Eigenverlag - IAHR/IWA. ISBN 978-90-78046-08-0, 1779-1786.
- Lange D. & Bezzola G.R. (2006). Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze. In: Minor (VAW - ETH Zürich) (ed.) VAW - Mitteilungen Nr. 188, 123 Seiten.
- Nujic M. (2009). Hydro_AS-2D - Ein zweidimensionales Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis. Benutzerhandbuch, 73 Seiten.
- Rickenmann D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. Wasser, Energie, Luft, Jg. 89, Nr. 5/6, 115-119.
- Rimböck A. (2003). Schwemmholzurückhalt an Wildbächen - Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrern. In: Strobl, T. (ed.) Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Nr. 94, TU München. 184 Seiten.
- Sendlhofer A. (2010). Systematische Versuchsreihen zur Überprüfung der Verklausungssicherheit von Brücken. Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck, Diplomarbeit, 125 Seiten.
- Waldner P., Köchli D., Usbeck T., Schmocker L., Sutter F., Rickli C., Rickenmann D., Lange D., Hilker N., Wirsch A., Siegrist R., Hug C. & Kaennel M. (2007). Schwemmholz des Hochwassers 2005 - Schlussbericht des WSL-Teilprojekts Schwemmholz der Ereignisanalyse BAFU/WSL des Hochwassers 2005. In: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL) (ed.). Birmensdorf, 72 Seiten.