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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 98 (2006)

Heft: 4

Artikel: Vergleich von Sohlstabilisierungsmassnahmen im physikalischen Modellversuch

Autor: Stephan, Ursula / Krassnitzer, Thomas / Porzer, Wolfgang

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939358

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: 17.07.2025

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

Vergleich von Sohlstabilisierungsmassnahmen im physikalischen Modellversuch

■ *Ursula Stephan, Thomas Krassnitzer, Wolfgang Porzer*

Zusammenfassung

In einem physikalischen Modellversuch wurden drei verschiedene Sohlsicherungsmassnahmen für einen sensiblen Flussabschnitt durch ein Ortsgebiet untersucht, die einerseits einem hohen spezifischen Bemessungsabfluss standhalten müssen, andererseits die Hochwassersicherheit im Ortsgebiet nicht verschlechtern dürfen. Die untersuchten Massnahmen – Sohlschwellen, offenes Deckwerk und aufgelöste Sohlrampe – erwiesen sich durchwegs als standsicher und ausführbar.

1. Einleitung

Die Gail ist der grösste rechte Nebenfluss der Drau. Sie entspringt am Nordhang der Karnischen Alpen (Osttirol/Österreich) und mündet östlich von Villach (Kärnten/Österreich) in die Drau. Sie durchfliesst mit einer Gesamtlänge von 122 km das Tilliacher Tal, das Lesachtal sowie das Gailtal. Besonders im Oberen Gailtal war der Fluss ursprünglich stark verzweigt. Damals war das Gailtal durch weite Auen und feuchte Wiesen, aber auch häufige Überschwemmungen geprägt. 1875 begann die Gailregulierung, die bis in die 1970er Jahre reichte. Die Gail wurde begradigt und der Talboden entwässert. Durch die Regulierung wurde Ackerland gewonnen, jedoch vielen Arten der Lebensraum genommen. Seit den 1980er Jahren werden jedoch wieder Renaturierungsmassnahmen z.B. durch Aufweitung des Flussschlauches durchgeführt (Honsig-Erlenburg und Petutschnig, 2002), wodurch sich die Vielfalt der Lebensräume und somit auch die Artenvielfalt wieder erhöhen können. Historisch reichte die Forellenregion lediglich bis Kötschach-Mauthen. Die durchgeführten Flussregulierungen an der Gail bedingten eine weitere Ausdehnung der Forellenregion stromab bis nach Hermagor.

Das Projektsgebiet der Gail befindet sich in der Gemeinde Kötschach-Mauthen (km 78,5) im Gailtal. Das Gewässerbetreuungskonzept (Donau Consult, 1996) wies für diesen Abschnitt einen nicht ausreichenden Hochwasserschutz sowie eine mangelnde Sohlstabilität aus. Zudem fliesst die Gail im Bereich Kötschach-Mauthen in einem hart regulierten Gerinne mit mehreren für Fische unüberwindlichen Sohlstufen. Die Anforderungen an eine Sanierungsmassnahme im Projektsgebiet reichen daher von der Verbesserung des Hochwasserschutzes sowie der Sohlstabilität bis hin zur Wiederherstellung der Fischdurchgängigkeit nach bestmöglichen ökologischen Gesichtspunkten. Zur Wiederherstellung der Fischdurchgängigkeit im Projektsgebiet kommen nur ausgewählte Sohlsicherungsmassnahmen wie Sohlschwellen, offenes Deckwerk oder eine aufgelöste Sohlrampe in Frage, die der Fischmigration kein Hindernis entgegensetzen. Um die verschiedenen Varianten der Sohlstabilisierung bei gleichzeitiger Überprüfung der Abflusskapazität untersuchen zu können, entschied man sich für einen physikalischen Modellversuch, wobei zwei Gründe ausschlaggebend waren:

- Beim Projektsgebiet handelt es sich um einen sensiblen Streckenabschnitt durch ein Ortsgebiet mit einem hohen Schutzbedürfnis.
- Die Projektsstrecke zeichnet sich durch ein vergleichsweise hohes Gefälle und einen hohen spezifischen Bemessungsabfluss aus, die beide ausserhalb bisheriger Anwendungsbereiche von Bemessungsansätzen für die gewählten Varianten liegen, sodass keinerlei Erfahrungen über die Gültigkeit der Bemessungsansätze vorliegen.

Der Modellversuch diente somit auch einer Ausweitung des Gültigkeitsbereiches bisher vorliegender Bemessungsansätze vor allem für offene Deckwerke (Knauss, 1995; Hartlieb, 1999) sowie aufgelöste Sohlrampen (Vogel, 2002; Semadeni et al., 2004).

2. Physikalisches Modell – Grundlagen und modelltechnische Randbedingungen

Um morphologische Sohlveränderungen in einem physikalischen Modell untersuchen zu können, ist ein Modell mit beweglicher Sohle erforderlich, das die Nachbildung des Deckschichtbildungsprozesses sowie von Anlandungs- und Erosionsprozessen ermöglicht. Es wurde ein Modell mit einer Länge von 20 m und einer Breite von 2 m im Massstab von 1:30 errichtet, welches einen charakteristischen Streckenabschnitt von 600 m Länge im Ortsgebiet von Kötschach-Mauthen darstellte. Der Modellsand wurde in Anlehnung an eine aus mehreren Geschiebeprobungen im Projektsabschnitt (Donau Consult, 2004) gewonnene Sieblinie ausgewählt (*Bild 1*), wobei eine möglichst gute Übereinstimmung des d_m bzw. d_{90} in Modell und Natur massgeblich für die Auswahl war ($d_{m,N}/d_{m,M}$ = 68/76 mm, $d_{90,N}/d_{90,M}$ = 196/199 mm (Naturmasse)).

Der gegenwärtige Gerinneabschnitt weist ein mittleres Gefälle von 7,6‰ zwischen den Sohlstufen auf. Nach Entfernung der Sohlstufen erhöht sich dieses auf rund 1%. Die aktuelle Sohlbreite beträgt 18 m. Diese wird jedoch gemäss der Planung auf

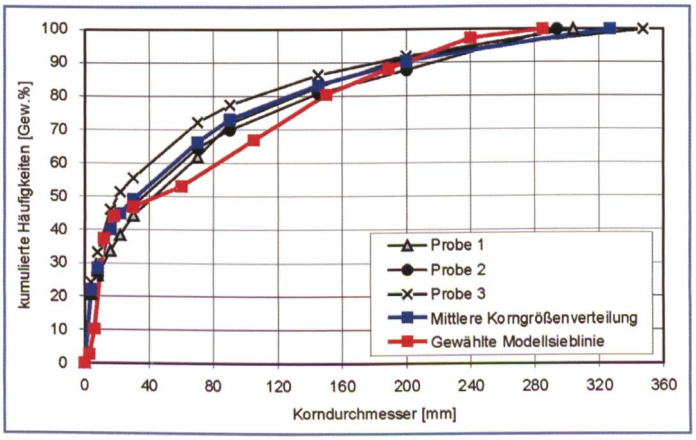

Bild 1. Kornsummenkurven.

	Dimension	Natur	Modell
Massstabsfaktor		1	30
Länge	[m]	600	20
Sohlbreite	[m]	20	0,67
Böschungshöhe	[m]	5	0,17
Gefälle	[%]	1	1
MQ	[m³/s] bzw. [l/s]	11,5	2,3
HQ1	[m³/s] bzw. [l/s]	100	20,3
HQ5	[m³/s] bzw. [l/s]	175	35,5
HQ10	[m³/s] bzw. [l/s]	235	47,7
HQ30	[m³/s] bzw. [l/s]	440	89,3
HQ100	[m³/s] bzw. [l/s]	600	121,7
spezifischer Bemessungsabfluss	[m³/s·m]	30	0,18

Tabelle 1: Charakteristische geometrische und hydraulische Grössen in Natur und Modell.

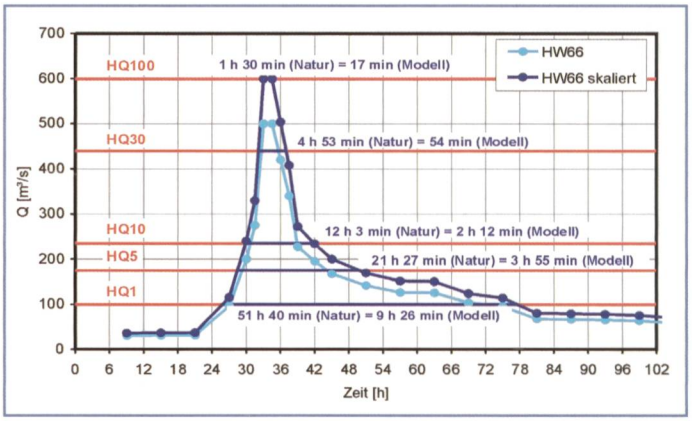

Bild 2. Massgebliche Abflussganglinie.

20 m aufgeweitet. Die für das physikalische Modell massgeblichen geometrischen sowie hydraulischen Grössen sind in *Tabelle 1* zusammengefasst:

Alle Versuchsreihen wurden mit stationärem Durchfluss gefahren, wobei als Basis für die Versuchsdauern der einzelnen Durchflüsse die Hochwasserganglinie 1966 des Pegels Mauthen herangezogen wurde. Die Hochwasserwelle, die einen maximalen Abfluss von 500 m³/s aufweist, wurde dafür auf einen Abfluss von 600 m³/s entsprechend dem HQ100 skaliert (*siehe Bild 2*) und die Versuchsdauern gemäss der Dauern der entsprechenden Durchflüsse in der Ganglinie festgelegt.

Die Versuche wurden sowohl mit als auch ohne Geschiebezufuhr durchgeführt – letzteres vor allem um die jeweilige Sohlsicherungsmassnahme unter extremen Bedingungen zu untersuchen. Die Sohllagen wurden zu jedem Versuchsbeginn und -ende mit einer Lasersonde vermessen, um die Sohlveränderungen zu bilanzieren. Unterstützt wurden die Sohlbilanzen durch Trocknung und anschliessender Wägung des während eines Versuches aus der Strecke ausgetragenen Geschiebes. Die Wasserspiegellagen wurden ebenso zu Versuchsbeginn und -ende mit einer Ultraschallsonde gemessen.

3. Varianten zur Sohlstabilisierung

Bei den zur Sohlstabilisierung ausgewählten Varianten handelte es sich um Sohlschwellen aus Bruchstein, ein offenes Deckwerk und eine aufgelöste Sohlrampe, die hinsichtlich ihrer wasserbautechnischen Machbarkeit und ihrer wirtschaftlichen Effizienz bei unterschiedlichen Strömungszuständen untersucht wurden.

3.1 Dimensionierung Sohlschwellen

Zur Stabilisierung von Fliessgewässern besteht die Möglichkeit, die Sohle durch Sohlschwellen zu fixieren. Die Schwellen können z.B. aus Holz oder Bruchsteinen ausgeführt werden. Im vorliegenden Fall wurde die Ausführung breiter Schwellen durch Bruchsteine gewählt (*siehe Bild 3*). Um verschiedene Bauweisen für die Sohlschwellen zu überprüfen, wurden im Modell verschiedene Schwellenarten eingebaut. Die Schwellen waren einlagig, zweilagig, mit und ohne Spundwandsicherung an Schwellenfront bzw. Schwellenende und mit Steinsicherung an der Schwellenfront ausgeführt. (*Bild 4*).

Jede einzelne Schwelle bewirkt eine Umlenkung der Strömung zur Sohle hin, wodurch sich bei mangelnder Geschiebezufuhr massive Kolkwannen zwischen den Schwellen ausbilden können. Im schlechtesten Fall können diese Kolke Ausmasse annehmen, die die Stabilität der angrenzenden Böschungen gefährden. Die Kolke, die einerseits vom vorhandenen Sohlmaterial und andererseits vom Abstand der Schwellen abhängen, stellen somit eine limitierende Grösse dar. Der Abstand der Sohlschwellen wurde nach Volkart (1972) bemessen, der Empfehlungen für den minimalen und maximalen Sohlschwellenabstand gibt. Das Gefälle der Gail liegt im untersuchten Gewässerabschnitt mit I = 1% im Gültigkeitsbereich 0,75% ≤ I ≤ 7% der Bemessungsformeln. Nach Volkart (1972) liegt der lichte Schwellenabstand L_S optimalerweise zwischen $10 \leq L_S/d_{90} \leq 340$. Mit einem d_{90} = 196 mm des Sohlmaterials an der Gail ergibt dies 2,0 m ≤ L_S ≤ 66,6 m. Der Abstand der Sohlschwellen wurde daher mit 40 m festgelegt, ihre Länge mit 13 m, woraus ein lichter Abstand von 27 m resultiert. Die Dimensionierung der Grösse der Schwellensteine wurde auf Basis von Sohlschubspannungen vorgenommen. Die Sohlschubspannung wurde anhand der Bedingung $\tau = \rho_W \cdot g \cdot R_s \cdot I$ berechnet und einer kritischen Sohlschubspannung Θ_{cr} gegenübergestellt.

$$\Theta = \frac{\tau}{\rho_W \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot d_s} = \frac{R_s \cdot I}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot d_s} \leq \Theta_{cr}$$

Für einen Einzelstein auf rauer Sohle, der der vollen Strömungskraft ausgesetzt ist, beträgt für den Bewegungsbeginn Θ_{cr} = 0,01 (Raudkivi und Ettena, 1982) und steigt für mehrlagige Steinwürfe auf Θ_{cr} = 0,1 an. Für teilweise eingebundene Steine, die sich gegenseitig abstützen kann als Erfahrungswert Θ_{cr} = 0,03 angesetzt werden. Da vor allem die Steine an der Stirnseite der Schwellen einer starken Strömungsbelastung ausgesetzt sind, wurde Θ_{cr} auf 0,02 reduziert. Aus diesem Ansatz

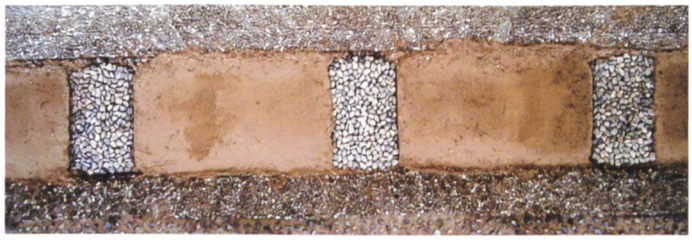

Bild 3. Sohlschwellen.

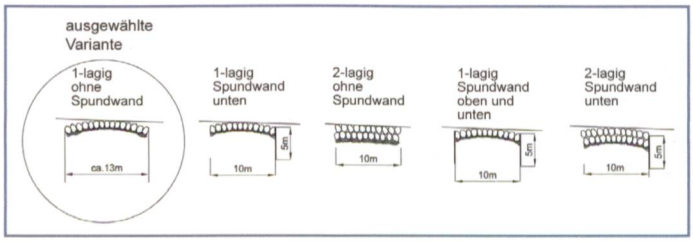

Bild 4. Schematische Darstellung der untersuchten Sohlschwellentypen.

Bild 5. Offenes Deckwerk.

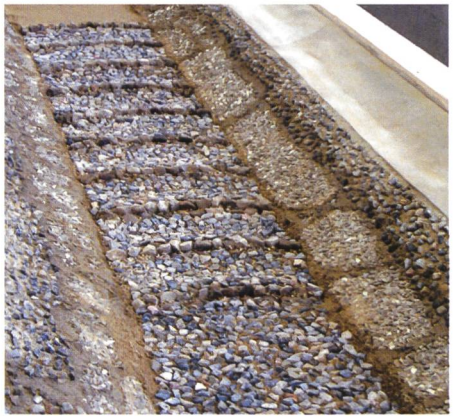

Bild 6. Aufgelöste Sohlrampe.

wurde für das Bemessungshochwasser eine Schwellensteingrösse von d_s = 0,75–0,80 m abgeleitet, die beim Bemessungshochwasser gerade nicht transportiert wird.

3.2 Dimensionierung offenes Deckwerk

Als zweite Variante wurde die Sohlsicherung durch ein offenes Deckwerk untersucht. Offene Deckwerke stellen eine naturnahe Lösung zur Sohlstabilisierung dar und zeichnen sich dadurch aus, dass auf die bestehende Flusssohle grössere Steine mit bestimmter Belegungsdichte, jedoch nicht flächendeckend aufgelegt werden. Dadurch bleibt ein grosser Teil der ursprünglichen Sohle frei. Dennoch wird, bei richtiger Dimensionierung, der Sedimentaustrag fast vollständig unterbunden, weil jeder Stein mit seinem Strömungsschatten den dahinter liegenden Bereich der Sohle schützt. Massgeblich für eine optimale Wirksamkeit des offenen Deckwerks sind vor allem die Steingrösse der aufgelegten Deckwerksteine sowie ihre Belegungsdichte (*Bild 5*).

Die Bemessung des Deckwerks kann anhand verschiedener Berechnungsansätze erfolgen (z.B. Knauss, 1995; Hartlieb, 1999). Die an der Gail im Untersuchungsabschnitt vorhandenen hydraulischen Bedingungen (hoher spezifischer Abfluss, grosses Gefälle, siehe *Tabelle 1*) überschreiten jedoch den Gültigkeitsbereich dieser Berechnungsansätze, sodass die Anwendung der Bemessungsformeln auf keine sinnvollen Vorgaben führt und auf einen alternativen Ansatz zurückgegriffen werden muss. Die Bemessung erfolgte – analog zur Dimensionierung der Schwellensteine – auf Basis von Sohlschubspannungen, die einer kritischen Sohlschubspannung gegenüber gestellt werden. Die Deckwerksteine wurden so dimensioniert, dass sie beim Bemessungsabfluss nicht bewegt werden. Als kritische dimensionslose Sohlschubspannung wurde wie bei der Variante Sohlschwellen Θ_{cr} = 0,02 gesetzt und somit in gewissem Ausmass die Wirkung des offenen Deckwerkverbands in der kritischen dimensionslosen Sohlschubspannung berücksichtigt. Aus diesem Ansatz ergab sich die rechnerische minimale Steingrösse zu d_S = 0,74 m, wobei im Modell Steingrössen zwischen 0,75 und 0,95 m verwendet wurden. Der verwendete mittlere Steindurchmesser betrug daher $d_{m,S}$ = 0,84 m. Die Belegungsdichte der Sohle wurde bei den Vorversuchen ausgehend von 40% sukzessive auf 30% reduziert, bis ein deutlicher Anstieg des Geschiebeaustrags aus der untersuchten Strecke zu verzeichnen war. Die optimierte Belegungsdichte wurde mit 35% fixiert.

3.3 Dimensionierung aufgelöste Sohlrampe

Als dritte Variante wurde eine aufgelöste Sohlrampe untersucht. Eine aufgelöste Sohlrampe besteht, anders als die kompakt geschichteten Blocksteinrampen nach Schauberger (1973), die in vergangener Zeit häufig zur Sohlstabilisierung verwendet wurden (Weinberger, 2000; Wibmer, 1998), aus einer Abfolge von Steinriegeln und dazwischen liegenden Becken (Vogel, 2002; Korger et al., 2003; Hengl, 2005). Bislang liegen nur wenige Erfahrungen zur Umsetzung von aufgelösten Rampen vor, die zudem nur zur Überwindung kleinerer Höhenunterschiede bis 1,5 m empfohlen werden (LfU, 2000). In Österreich beschränken sich Ausführungsbeispiele in der Regel auf kleinere Bemessungsabflüsse mit kleinen spezifischen Belastungen bis 12 $m^3/s \cdot m$. Lediglich in Modellversuchen wurden spezifische Bauwerksbelastungen von 21 $m^3/(s \cdot m)$ (Semadeni et al., 2004) oder 23 $m^3/(s \cdot m)$ (Hengl, 2005) für aufgelöste Rampen getestet, die dennoch weit unter der vorliegenden spezifischen Bauwerksbelastung von 30 $m^3/(s \cdot m)$ liegen.

Die Dimensionierung der hydraulisch am stärksten belasteten Riegelsteine erfolgte anhand eines von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg herausgegebenen Leitfadens (LfU, 2000). Die Stabilität der Riegelsteine wird über eine Gleichgewichtsbedingung aus Strömungskraft P, Gewichtskraftkomponente H und Reibungskraft R über die Bedingung $P + H - R \leq 0$ definiert. Bei der Bemessung der Steingrösse wird davon ausgegangen, dass nur ein Teil des Steines angeströmt wird und damit hydraulisch wirksam ist. Allerdings ist der Parameter der angeströmten Steinfläche in der Bemessung eine sehr sensible Grösse, die im Zuge der Versuche optimiert wurde. Aus dieser Optimierung ergab sich schliesslich eine Riegelsteingrösse von 4,5 bis 5,5 t, die einer angeströmten Fläche von rund 35% entsprach. Die Becken zwischen den Riegeln wurden mit einer Sohlsicherung ausgelegt, die aus vollflächig verlegten Steinen mit einem mittleren Gewicht von rund 850 kg bestand. Mit den Steinen in den Becken muss die Rampenfläche geschlossen werden, da mit der Erosion von Steinen aus den Becken ein Kolkprozess einsetzen kann, der letztlich die Riegel zum Einsturz bringen kann. Die sohlmorphologische Kontrolle der ober- und unterstrom angrenzenden Gewässerstrecken erfolgte nach Platzer (2000), der Dimensionierungsgrundlagen für muldenförmige Blocksteinrampen gibt. Aufgelöste Rampen werden zwar nicht erwähnt, die wesentlichen Grundsätze der Rampenhydraulik sind jedoch übertragbar. Aus der sohlmorphologischen Einbindung der Rampenbauwerke in den Längsverlauf ergab sich die erforderliche Rampenhöhe und aus dieser schliesslich über die gewählte Neigung der Rampe von 1:25 und der gewählten Absturzhöhe von 0,4 m an den Riegeln, die für die Leitfische in der Forellenregion als überwindbar erachtet wurde, die Anzahl von Riegeln und Becken. In das physikalische Modell wurde somit schliesslich ein Prototyp einer aufgelösten Rampe mit einer Neigung von 1:25, einer Höhe von 3,6 m und einer Rampenlänge von 90 m eingebaut. Die Länge der mit einer leichten Gegensteigung versehenen Nachbettstrecke betrug $1{,}5 \cdot L_R$ = 135 m (*Bild 6* und *Bild 7*). Das Nachbett

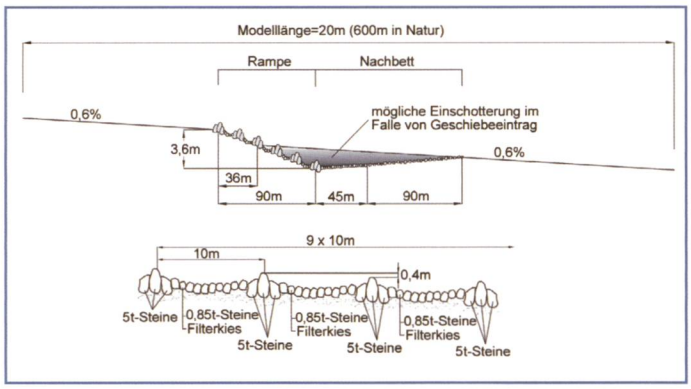

Bild 7. Schematische Darstellung der aufgelösten Sohlrampe.

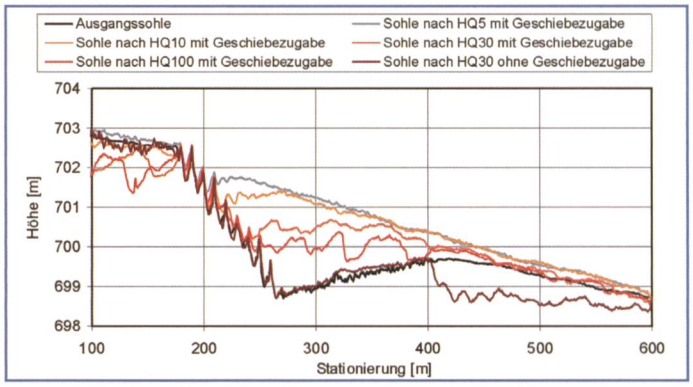

Bild 8. Sohlentwicklung an der aufgelösten Sohlrampe.

wurde mit einer Sohlrollierung geschützt, die ebenfalls aus Steinen mit einem mittleren Gewicht von im Mittel 850 kg aufgebaut war. In den ersten 45 m unterhalb des Rampenfusses wurde der Nachbettschutz vollflächig aufgebracht, in den restlichen 90 m wurde ein offenes Deckwerk mit einer Belegungsdichte von 40% ausgeführt.

4. Ergebnisse und Diskussion

Alle drei Varianten erwiesen sich aufgrund der im Modellversuch optimierten Lösungen als standsicher und ausführbar. Für eine Umsetzung in der Natur sind jedoch noch weitere Randbedingungen zu berücksichtigen.

4.1 Stabilität und Sohlentwicklung

Bei den Sohlschwellen entwickelten sich für Reinwasserversuche, je nach Ereignis und Geschiebetrieb, Kolktiefen von bis zu 2,0 m. Diese verfüllten sich jedoch grösstenteils wieder während den Versuchen mit Geschiebezugabe (volle Transportkapazität). Solange die Schwellen nicht versagten, blieb das Sohlniveau an den durch Schwellen gesicherten Punkten im Längsprofil stabil. Die durch die Kolkung zwischen den Sohlschwellen auftretende massive Wellung bewirkte jedoch eine starke Beanspruchung der Schwellenfront, die daher eines gesonderten Schutzes bedurfte. Sobald sich ein oder mehrere Steine aus dem Verband gelöst hatten, führte dies in weiterer Folge zum Versagen der Schwelle. Die Schwellenfront wurde daher massiver ausgeführt und in die Tiefe gezogen. Am Schwellenende gab es vergleichsweise wenig Angriff und kamen auch nur wenige Bruchsteine in Bewegung. Dennoch wurde auch das Schwellenende in die Tiefe gezogen, um eine Gefährdung der Schwelle von unterstrom durch Nachrutschen der Blocksteine in die Kolkwannen zu verhindern. Für die Umsetzung in der Natur ist letztlich die maximale Kolktiefe für die Böschungssicherung massgeblich und muss daher auch bis in diese Tiefe reichen, woraus ein grosser Materialbedarf resultiert.

Beim offenen Deckwerk blieben die Deckwerkssteine während aller Versuche im Wesentlichen stabil. Bei den Abflüssen HQ30 und HQ100 gerieten einzelne Steine in Bewegung und verrutschten um wenige Natur-Dezimeter. Dabei bildeten sich relativ gleichmässige Strukturen aus dichter bedeckten und weniger dicht bedeckten Stellen. Die Stabilität des gesamten Deckwerkes wurde dadurch nicht gefährdet. Auch Versuche mit bewusst gebildeten Fehlstellen ohne Steinauflage in der Grösse von 6,7 × 7,8 m führten zu keinem Versagen des Deckwerks. Die mit 35% festgesetzte Belegungsdichte führte zu einem sehr geringen Geschiebeaustrag aus der Strecke, der maximal 1% der nach Hunziker (1995) errechneten Transportkapazität betrug. Die Höhenlage der Flusssohle blieb daher stabil und das offene Deckwerk erwies sich somit als sehr tolerant gegenüber Geschiebedefizit. Bei den Versuchen mit Geschiebezugabe zeigte sich eine ebensolche Flexibilität der Sohlstabilisierungsmassnahme gegenüber Geschiebezufuhr. Anfangs wurden die Hohlräume zwischen Deckwerkssteinen verfüllt. Bei Eintreten einer Sättigung wurde schliesslich das gesamte Geschiebe über das Deckwerk transportiert und ein Gleichgewichtszustand stellte sich ein. Die Deckwerksteine verschwanden unter einer Geschiebeschicht, wurden jedoch bei nachfolgenden Reinwasserversuchen wieder frei gespült und so erneut sohlstützend wirksam.

Stabilität und Sohlentwicklung auf der aufgelösten Rampe wurden wiederum in Reinwasserversuchen sowie Versuchen mit Geschiebezufuhr untersucht. Die Riegelsteine blieben bei allen durchgeführten Versuchen, mit und ohne Geschiebezufuhr, stabil. Lediglich die Sicherung der Becken zeigte nach dem Bemessungshochwasser einzelne herausgelöste Steine, die jedoch zu keinem Versagen des Bauwerks führten und somit toleriert wurden. Bei Versuchen mit Geschiebezufuhr (volle Transportkapazität) wurde die Rampe bei kleinen Hochwässern bis HQ5 mit Geschiebe verfüllt, bei grösseren Hochwässern jedoch sukzessive wieder freigelegt, bis Versuche ohne Geschiebezufuhr, die die für die Rampe ungünstigste Situation darstellten, sogar den Rampenfuss wieder freilegten (siehe *Bild 8*). Diese Versuche belegten auch die dimensionierte Rampenlänge L_R. Die Rampe war durch das vergleichsweise grosse Sohlgefälle der Anschlussstrecke zu keinem Zeitpunkt eingestaut. Erst am Rampenfuss bildete sich bei grossen Abflüssen ein gewellter Wechselsprung aus.

4.2 Wasserspiegel und Rauheit

Bei der Variante Sohlschwellen ergaben sich aufgrund der Kolkbildung je nach Wasserführung unterschiedlich hohe und in der Anzahl variierende Wellenberge und -täler. Die Kolk- und Wellenbildung waren stark vom Geschiebeangebot abhängig, es bildeten sich jedoch bei maximalen Kolktiefen Wellenhöhen von bis zu 4 m aus. Zusätzlich verursachte eine steigende Kolktiefe auch einen Anstieg der gesamten Gerinnerauheit, die wiederum zu generell höheren Fliesstiefen führte, was in Hinblick auf Einhaltung der Hochwassersicherheit Berücksichtigung finden muss. Werden Deckwerkssteine zur Sohlsicherung auf eine bestehende Flusssohle aufgelegt, so steigt die mittlere Höhenlage der Sohle. Gleichzeitig bedeutet dies auch einen erheblichen Anstieg der Gerinnerauheit und damit im Vergleich zum Ausgangszustand höhere Wasserspiegellagen, die aber deutlich ruhiger und glatter ausgeprägt waren als z.B. bei den Versuchen mit Sohlschwellen. In der vorliegenden Untersuchung sank der Rauheitsbeiwert nach Strickler des gesamten Gerinnes beispielsweise beim HQ10 von 32 auf 22 $m^{1/3}/s$. Versuche mit Geschiebezufuhr führten allerdings durch die Einschotterung der Deckwerkssteine wieder zu einem Ansteigen des Rauheitsbeiwertes auf seinen Ausgangszustand ohne Belegung mit Deckwerkssteinen. Geschiebetrieb kann somit die durch Deckwerkssteine bedingte höhere Gerinnerauheit teilweise kompensieren.

Die Rückrechnung der Gerinnerauheit im Bereich der aufgelösten Sohlrampe ergab einen mittleren Rauheitsbeiwert von k_{St} = 14 $m^{1/3}/s$ mit einer Schwankungsbreite von 13 bis 16 $m^{1/3}/s$ je nach Annahme der mittleren Sohle bzw. des mittleren Wasserspiegels auf der Rampe und stimmt damit gut mit den Angaben in Hengl (2005) überein. Generell führt jedoch die Anordnung einer Sohlrampe in einen Flusslauf durch ein Ortsgebiet aufgrund der Sohlanhebung stromauf der Rampenkrone meist zu Komplikationen in Bezug auf den Hochwasserschutz und ist daher nur unter Schwierigkeiten umzusetzen.

4.3 Zusammenfassung und Ausblick

In einem Modellversuch mit dem Massstab 1:30 wurden drei verschiede Sohlsicherungsmassnahmen – Sohlschwellen, offenes Deckwerk und aufgelöste Sohlrampe – für einen sensiblen Streckenabschnitt der Gail durch das Ortsgebiet von Kötschach-Mauthen hinsichtlich ihrer Machbarkeit und Umsetzbarkeit untersucht. Alle drei Varianten erwiesen sich sowohl als standsicher als auch ausführbar und können als Module zur Sohlsicherung gut miteinander kombiniert werden. In Hinblick auf eine spätere Umsetzung im Projektsgebiet wurde die Variante Sohlschwellen aufgrund der Unsicherheit des zukünftigen Geschiebedargebots und der damit verbundenen möglichen grossen Kolktiefen als nachteilig erachtet. Eine aufgelöste Sohlrampe ist vor allem in einem Ortsgebiet mit hohen Ansprüchen an den Hochwasserschutz schwierig umzusetzen, da die Rampenkrone meist über der Bestandssohlenlage liegen wird, damit die Hochwasserspiegellagen anhebt und Kompensationsmassnahmen wie eine Flussbettaufweitung oder eine Erhöhung oder Errichtung eines Hochwasserschutzdammes bedingt. Das offene Deckwerk hingegen wurde vor allem aufgrund seiner hohen Toleranz gegenüber einem variablen Geschiebedargebot und seiner vergleichsweise einfachen Umsetzbarkeit für diesen sensiblen Streckenabschnitt als am besten geeignet eingestuft. Um jedoch den gegenwärtig sehr monotonen Flussabschnitt ökologisch zu beleben, wird künftig eine Kombination aus offenem Deckwerk und einer aufgelösten Sohlrampe zum Einsatz kommen. Daraus werden sich in Kombination mit einer Variation der Gerinnebreite und neuer Uferstrukturen eine grössere Strukturvielfalt und eine ökologische Aufwertung des Flusses ergeben.

Literatur

DONAU CONSULT, Zottl& Erber (1996). GBK-Gail, Ist-Zustand, Wasserwirtschaftliche Bearbeitung

DONAU CONSULT, Zottl& Erber (2004). Geschiebeanalyse Gail.

Hartlieb, A. (1999). Offene Deckwerke. Berichte der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der TU München. Band Nr. 85.

Hengl, M. (2005). Sanierung Untere Salzach – Übertragung Saalach-Modellversuche auf die Salzachrampen. Bericht des Instituts für Wasserbau und hydrometrische Prüfung. November 2005.

Honsig-Erlenburg W. und *W. Petutschnig* (Hrsg.) (2002). Die Gewässer des Gailtales. Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Klagenfurt 2002.

Hunziker, R. (1995). Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Band Nr. 138.

Knauss (1995): Von der Oberen zur Unteren Isar – Sohlensicherung an der Unteren Isar. Berichte der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der TU München. Band Nr. 76

Korger, H., Krouzecky, N. und *M. Hengl* (2004). Modelluntersuchung Modulrampe – Saalach. Endbericht. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. TU Wien.

LfU (2000). Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fliessgewässern – Raue Rampen und Verbindungsgewässer. Landesanstalt für Umweltschutz. Baden-Württemberg. Nr. 63. Karlsruhe.

Platzer, G. (2000). Dimensionierung muldenförmiger Blocksteinrampen. Teil 1: Bemessungsgrundlagen; Teil 2: Anwendung der Grundlagen. Schriftenreihe des BAW. Band 9.

Raudkivi A. and *R. Ettena* (1982). Stability of Armour Layers in Rivers. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 108, No. Hy 9. pp 1047–1057.

Schauberger, W. (1973). Die räumliche Krümmung von Gefällsstufen und Sturzbettendschwellen. Österreichische Wasserwirtschaft 25. Heft 5/6. pp 120–124.

Semadeni, N., Lange, D., Bezzola, G.R. (2004). Aufgelöste Blockrampen an der Emme. Turbulenzen in der Geomorphologie. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Band Nr. 184. pp 207–214.

Vogel, S. (2003). Ansätze zur Bemessung rauer Rampen in aufgelöster Bauweise. Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München. Band 88.

Volkart, P. (1972): Die Stabilisierung von Flussläufen mittels einer Folge von Querschwellen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Band Nr. 6.

Weinberger, P. (2000). Neubau des Käferhamer Wehres an der Saalach. Symposium «Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen». Graz 2000. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft. Technische Universität Graz. Band 34. pp 327–336.

Wibmer, K. (1998). Sanierung einer Steilstrecke der Salzach. Beiträge zum Symposium «Planung und Realisierung im Wasserbau – Vergleich von Zielstellungen mit den Ergebnissen». Berichte der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der TU München. Band 82. pp 175–186.

Anschrift der Verfasser

Ursula Stephan (Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung, Severingasse 7, A-1090 Wien, Österreich, ursula.stephan@baw.at)

Thomas Krassnitzer (DonauConsult Zottl&Erber ZT-GmbH, Klopstockgasse 34, A-1170 Wien, Österreich, t.krassnitzer@donauconsult.at)

Wolfgang Porzer (DonauConsult Zottl&Erber ZT-GmbH, Klopstockgasse 34, A-1170 Wien, Österreich, w.porzer@donauconsult.at)

Abkürzungen

d_{90}	[m]	Korndurchmesser bei 90% Siebdurchgang
d_m	[m]	mittlerer Korndurchmesser
$d_{m,S}$	[m]	mittlerer Steindurchmesser
d_S	[m]	Steindurchmesser
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung
H	[N]	horizontale Gewichtskraftkomponente eines Steines auf geneigter Fläche (treibende Kraft)
I	[-]	Sohlgefälle
L_R	[m]	Rampenlänge
L_S	[m]	Schwellenabstand
P	[N]	Strömungskraft, die auf einen Stein wirkt (treibende Kraft)
R	[N]	Reibungskraft eines Steins (stabilisierende Kraft)
R_S	[m]	hydraulischer Radius der Sohle
Θ	[-]	dimensionslose Sohlschubspannung
Θ_{cr}	[-]	dimensionslose kritische Sohlschubspannung
ρ	[kg/m³]	Steindichte
ρ_W	[kg/m³]	Dichte Wasser
τ	[N/m²]	Sohlschubspannung