

Kolkschutz von Brückenpfeilern bei Verklausung

Boris Huber, Michael Hengl und Bernhard Valenti

Zusammenfassung

Für vorhandene, meist flach gegründete und viele Jahrzehnte alte Brückenpfeiler in der Internationalen Strecke des Alpenrheins wurden Kolkschutzmaßnahmen entwickelt. Auslöser für die Untersuchung war die geplante Erhöhung des Hochwasserschutzes von heute 3.100 m³/s auf zukünftig 4.300 m³/s. Dazu kam die Forderung der wasserbaulichen Sachverständigen die Sicherheit der Brückenpfeiler im oberen Abschnitt der Strecke bis zu einem Durchfluss von 5.800 m³/s und damit fast doppelt so hohem Durchfluss wie heute zu gewährleisten, da diese Wassermenge innerhalb des Freibords der Dämme abgeführt werden kann.

Um einerseits sichere und andererseits auch möglichst wirtschaftliche Kolkschutzmaßnahmen zu entwickeln, erfolgten wasserbauliche Schnittmodellversuche im Maßstab 1:30. In allen Versuchen mit Kolkschutz wurden Hochwasserwellen verwendet. So konnte, im Gegensatz zu sonst oft üblichen stationären Durchflüssen mit Ermittlung der Endkolkentiefe, die Beanspruchungsdauer der Flusssohle möglichst realistisch modelliert werden.

Der Planungsabschnitt umfasst neun Brücken mit insgesamt 47 Pfeilern, die nach Umsetzung der geplanten Flussbettaufweitung zukünftig in der morphologisch aktiven Sohle des Rheins stehen. In einem ersten Schritt wurden die Pfeiler anhand ihrer geometrischen Abmessungen kategorisiert und daraus fünf repräsentative Pfeiler für die Modellversuche abgeleitet.

Als maßgebend für die Dimensionierung des Kolkschutzes erwies sich in allen Fällen das Szenario mit Verklausung des Pfeilers (Ansammlung eines großen Pakets aus Schwemmholz vor dem Pfeiler). Die allgemeine Erkenntnis aus den Versuchen ist, dass für die sichere Fundierung von Brückenpfeilern immer der Lastfall Verklausung zu berücksichtigen ist. Selbst bei schlanken, strömungsgünstigen Pfeilern kann es im Verklausungsfall zu großen Kolken und damit zu einem hohen Aufwand für den Kolkschutz bzw. die sichere Fundierung kommen.

Ein flächiger Kolkschutz um den Pfeiler führt dazu, dass sich die Kolke vom Pfeiler weg seitlich und in Richtung flussab verlagern. Dieser Prozess kann bei entsprechender Nähe des Pfeilers zum Ufer die Stabilität der Ufersicherung negativ beeinflussen.

1 Projekthintergrund, Methodik und Ziel

1.1 Hochwasserschutzprojekt Alpenrhein

In der Internationalen Strecke des Alpenrheins soll der Hochwasserschutz von heute 3.100 m³/s (entspricht einem HQ₁₀₀) auf zukünftig 4.300 m³/s (entspricht einem HQ₃₀₀) erhöht werden. Wesentliches Maßnahmenelement ist in diesem Zusammenhang die Verbreiterung der Flusssohle in die heute mit Gras bewachsenen Vorländer. Damit verschiebt sich die Morphologie des Flusses von heute ebener Sohle in Richtung eines furkierenden bzw. verzweigten Systems. Des Weiteren stehen zahlreiche Brückenpfeiler zukünftig nicht mehr im Vorland, sondern in der morphologisch aktiven Sohle des Flusses. Sowohl durch Schräganströmung, Verklausung aber auch infolge der höheren Durchflüsse wird gegenüber heute mit der Ausbildung deutlich tieferer Kolke gerechnet.

In der ersten Planungsphase (Generelles Projekt) war vorgesehen alle Pfeiler mit Bohrpfehlern zu ummanteln um damit auch bei tiefen Kolken Stabilität zu erreichen. Die Ausführung von Bohrpfehlern unter den bestehenden Brückentragwerken wäre allerdings mit sehr hohen Kosten verbunden. In der nächsten, vertiefenden Planungsphase (Genehmigungsprojekt) stellte sich daher die Frage, ob es auch kostengünstigere Maßnahmen gibt um die Stabilität der Brücken zu gewährleisten.

1.2 Methodik und Projektziel

In der wissenschaftlichen Fachliteratur sind zahlreiche Veröffentlichungen zu finden, die sich mit der Entwicklung von Kolken bei Brückenpfeilern mit und ohne Verklausung bzw. mit dem Schutz vor zu tiefen Kolken befassen (z. B. Melville & Coleman 2000, Pagliara & Carnacina 2011, Yang et al. 2019).

In der Regel handelt es sich dabei um Untersuchungen mit folgenden Randbedingungen:

1. Klarwasserkolke (ohne Geschiebenachfuhr),
2. bei Pfeilern mit nicht kreisförmigem Grundriss nur gerade Anströmung,
3. Ermittlung der Endkolktiefe bei stationärem Durchfluss,
4. keine Kolkschutzmaßnahmen im Falle von Verklausung.

Insbesondere die fehlende Kombination Verklausung und Kolkschutz ergab die Notwendigkeit eigener, projektspezifischer Untersuchungen. Die Anwendbarkeit numerischer Modelle wurde als nicht zuverlässig eingeschätzt, insbesondere auf Grund der parallelen Simulation von Geschiebe und Wasserbausteinen sowie fehlender Kalibrierdaten. Als geeignete Methode verblieb damit nur der wasserbauliche Modellversuch, wobei ein Schnittmodell mit ausgewählten Pfeilern als ausreichend erachtet wurde.

Daraufhin beauftragte die Internationale Rheinregulierung die Technische Universität Wien und das Bundesamt für Wasserwirtschaft mit entsprechenden Untersuchungen für die Klärung folgender Fragen:

- Sind die bestehenden Pfeilerfundamente auch zukünftig ausreichend sicher?
- Wenn nein: welche Kolkschutzmaßnahmen sind unter den Aspekten Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erforderlich?

Vor Beginn der Modellversuche wurden die insgesamt 47 Pfeiler der neun Brücken geometrisch klassifiziert und daraus fünf charakteristische Pfeiler für die Modellversuche abgeleitet.

2 Das Modell

2.1 Versuchsanlage

Im Zusammenhang mit den Korngrößen des Geschiebes wurde ein Modellmaßstab von 1:30 gewählt. Die Breite des Schnittmodells betrug 2,5 m (75 m in der Natur, um eine ausreichend große Breite zwischen benachbarten Pfeilern zu gewährleisten). Um den am Rhein bei Hochwasser vorhandenen Geschiebetrieb zu berücksichtigen, wies das Modell eine ca. 8 m lange Vorlaufstrecke mit beweglicher Sohle auf, die als Geschiebedepot diente. Zusammen mit Modelleinlauf, Strömungsberuhigung und Vergleichmäßigung sowie morphodynamischer Versuchsstrecke, Geschiebefang und Ablauf wies das Modell eine Länge von insgesamt 30 m auf (Abb. 1 und

2). Das Gefälle betrug 1 ‰. Die Höhe der Sohle im Zulauf erlaubte die Nachbildung von Kolkthiefen bis zu 22,5 m (75 cm im Modell).

Die Messungen der Wassertiefen wurden mit Drucksonden in den fixierten Sohlbereichen vor und nach dem morphodynamischen Sohlbereich vorgenommen. Im Abschnitt mit beweglicher Sohle ermöglichten Pegel an den Wänden die manuelle Ablesung von Wassertiefen. Die Erfassung der Sohlgeometrie erfolgte sowohl mittels Laserscanner als auch visuell mittels Drohne und Auswertung über Structure from Motion. Des Weiteren wurden die zeitliche Entwicklung des Kolkes, das Verhalten des Kolkschutzes und die Geschiebebewegung durch die im Bereich des Pfeilers vorhandene Glaswand beobachtet und mittels Video dokumentiert.

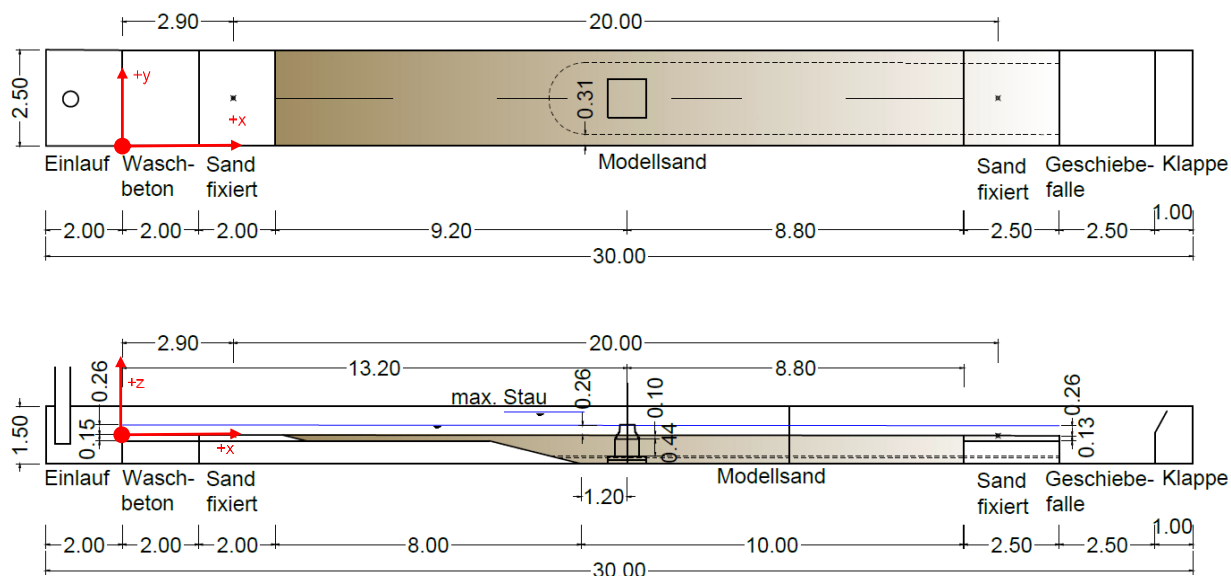


Abb. 1 Skizze der Versuchsrinne (Maße in m)



Abb. 2 Versuchsanlage mit Blick gegen die Fließrichtung (Übersichtsbild)

2.2 Geschiebe

Grundlage für die Wahl des Modellgeschiebes waren sechs Siebanalysen aus den Jahren 1994 und 2009 zwischen Rhein-km 81 und 86. Daraus wurde eine gewichtete mittlere Sieblinie errechnet, die auch als Basis für Vollmodellversuche des Rheins im Maßstab 1:50, durchgeführt in Dornbirn, diente. In weiterer Folge wurde eine aus sieben Kornfraktionen bestehende transportäquivalente Modellsieblinie erstellt (Tab 1), die folgende Kriterien erfüllt:

1. im Modell nur Korngrößen größer als 0,2 mm
2. Ermöglichung einer Deckschichtbildung (geometrische Standardabweichung der Kornverteilung $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}} > 1,35$),
3. Berücksichtigung des maßstabsbedingten etwas früheren Transportbeginns im Modell (Shields-Wert $< 0,047$). Das Geschiebe ist daher leicht vergrößert, um den gegenüber der Natur früheren Bewegungenbeginn im Modell auszugleichen.

Tab. 1 Kennzeichnende Größen der Sieblinie im Modell und in der Natur

| | d16 (mm) | d30 (mm) | d50 (mm) | dm (mm) | d84 (mm) | d90 (mm) | σ (-) |
|---------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|--------------|
| Natur | 7,4 | 15,4 | 29,1 | 37,6 | 70,2 | 83,9 | 3,1 |
| Modell | 0,47 | 0,69 | 1,14 | 1,46 | 2,65 | 3,08 | 2,4 |

Geologisch bestand das Modellgeschiebe aus eher gedrungenen Quarzkörnern (Länge zu Dicke kleiner 3:1 laut Lieferantenangabe) mit einer Massendichte von 2 650 kg/m³.

2.3 Hydrologie und Hydraulik

Um eine möglichst realitätsnahe Beanspruchung der Gewässersohle und des Kolksschutzes sowohl hinsichtlich Höhe als auch Dauer zu erreichen, wurden in den Modellversuchen Durchflussganglinien verwendet. Als Ausgangsbasis dienten vom Planungsteam zur Verfügung gestellte Hochwasserwellen mit Scheitelabflüssen von 4.300 m³/s (HQ300) sowie 5.800 m³/s (Extremhochwasser mit einer Jährlichkeit im Bereich 500 bis 1000). Des Weiteren standen Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen für den Flussschlauch aus einem eindimensionalen Abflussmodell der Flussbau AG zur Verfügung. Die sich daraus ergebenden spezifischen Abflüsse wurden für die Festlegung der Durchflüsse im Schnittmodell verwendet. Abb. 3 zeigt die ab dem einjährigen Abfluss als Treppenfunktion angenäherten Ganglinien im Modell sowie die den einzelnen Stufen entsprechenden Fließgeschwindigkeiten in der Natur mit dem Maximum von rund 5 m/s. Die Durchflussstufen wurden so festgelegt, dass die beiden Wellen sowohl bezüglich Durchfluss- als auch Geschiebefracht gleich sind. Die maximalen Durchflüsse im Schnittmodell von 360 und 477 l/s entsprechen den Scheitelabflüssen von 4 300 bzw. 5 800 m³/s im gesamten Abflussquerschnitt des Rheins im Bereich der Brücke Oberriet-Meiningen. Die zugehörigen Fließtiefen liegen bei 5,37 bzw. 6,33 m.

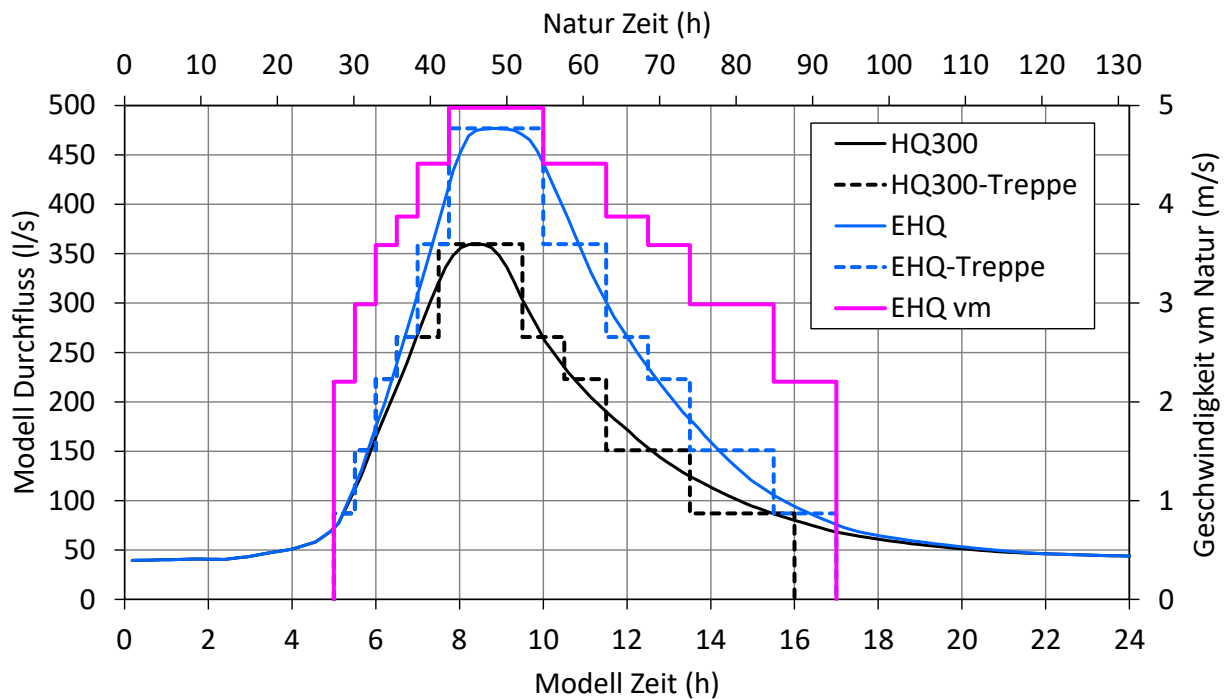


Abb. 3 Hochwasserwellen mit Annäherung als Treppenfunktion und Fließgeschwindigkeiten am Beispiel der Brücke Oberriet-Meiningen

2.4 Verkläusungskörper

Die Größe des Verkläusungskörpers (Abb. 4) wurde vom Planungsbüro Basler & Hofmann definiert. Als Grundlage dienten die Angaben aus Cantero-Chinchilla et al. (2018). Die Nachbildung im Modell erfolgte mittels eines Kerns aus Hartschaumstoff (verhindert die Durchströmung des Körpers) sowie darauf befestigten kleinen Ästen (Rauheitswirkung) – siehe Abb. 5.

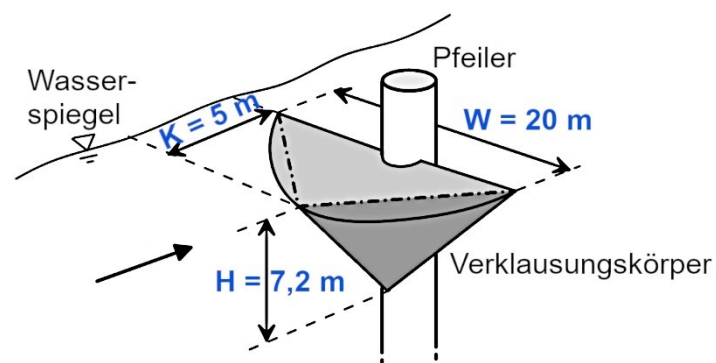


Abb. 4 Geometrie des Verkläusungskörpers (Cantero-Chinchilla et al. (2018), adaptiert)

Der Verkläusungskörper wurde ab dem 30-jährlichen Abfluss in einem Zeitraum von 30 min im Modell (ca. 2,75 h in der Natur) in fünf Teilschritten bis zur Sohle abgesenkt. Bei Versuchen mit mehr als 7,2 m Wassertiefe wurde der Verkläusungskörper bis zum Wasserspiegel angehoben. Bei Versuchen mit Wassertiefen kleiner als 7,2 m ragte der Verkläusungskörper über den Wasserspiegel hinaus.

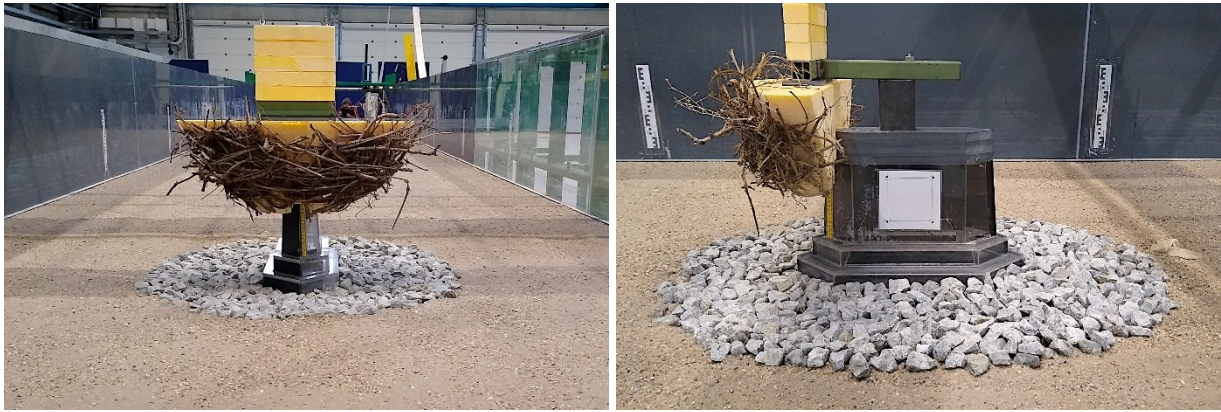


Abb. 5 Verkläusungskörper im Modell

3 Beispiel Pfeiler Oberriet-Meiningen

3.1 Versuche ohne Kolkenschutz

Exemplarisch ist nachfolgend die Entwicklung des Kolkschutzes für den Pfeiler 1 der Brücke Oberriet-Meiningen dargestellt. Bei diesem Pfeiler traten sehr hohe Beanspruchungen der Sohle und damit des Kolksschutzes auf. Abb. 6 zeigt den mit 75 cm Breite sehr schlanken Pfeiler. Der Sockel des Pfeilers steht in der Natur auf Pfählen. Im Modell wurde vereinfachend der Sockel tiefer gezogen, da eine Erosion der Flusssohle bis unter den Sockel nicht zulässig ist.

Der Pfeiler verursachte ohne Verkläusung keinen messbaren Kolk. Auch Kontrollmessungen der Internationalen Rheinregulierung im Bestand zeigten keine Kolkbildung rund um den Pfeiler. Mit Verkläusungskörper betrug die maximale, direkt am Pfeiler auftretende Kolkentiefe 5,4 m. Im Versuch und in der Videoaufnahme war deutlich zu sehen, dass der Verkläusungskörper die Strömung nach unten drückte und dies eine hohe Beanspruchung der Geschiebesohle bewirkte.

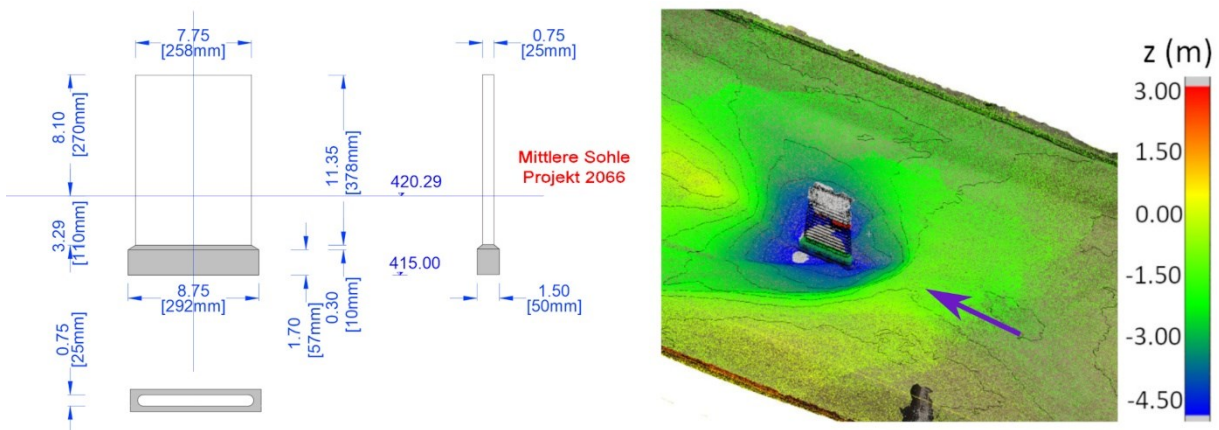


Abb. 6 Pfeilerabmessungen und Kolkentwicklung ohne Kolksschutz

3.2 Entwicklung eines Kolk schutzes bei Verklausung

Die Versuche mit Kolk schutz starteten mit einem auf Basis von Melville & Coleman (2000) dimensionierten Steinteppich (5,25 m breit, 14 m lang, zweilagig mit Steinen von 370 bis 540 kg, siehe Abb. 7). Der Kolk schutz erodierte während des Ablaufs der Hochwasserwelle vollständig. Sowohl die maximale Kolk tiefe von 5,1 m als auch das Kolk bild sind dem Versuch ohne Kolk schutz sehr ähnlich (Abb. 7).

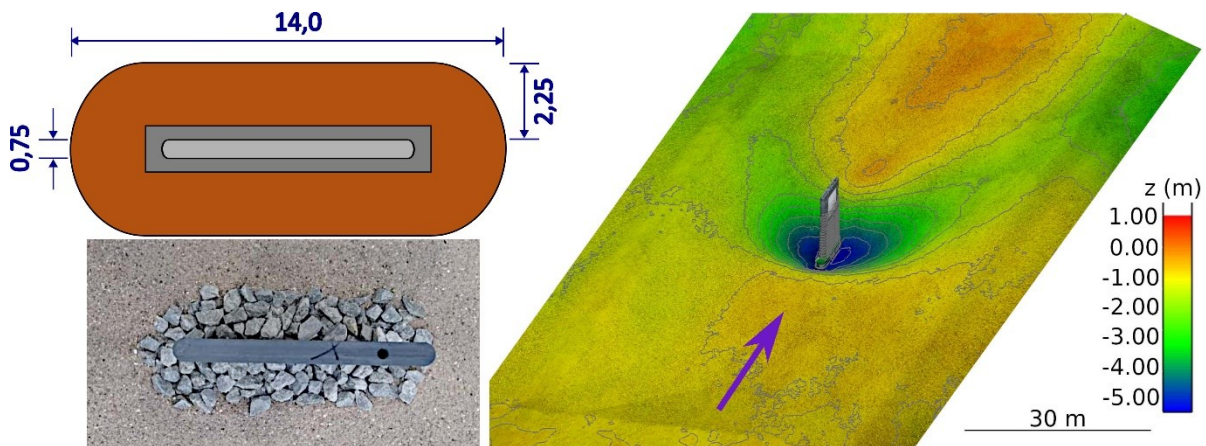


Abb. 7 Ausführung des ersten Kolk schutzes und Kolk bild nach dem Hochwasserscheitel

Im nächsten Schritt wurde der Steinteppich deutlich vergrößert (Abb. 8). Die Steingröße blieb unverändert, ebenso der zweilagige Aufbau. Die verwendete Steinmenge stieg von 75 t auf 407 t. Bei der HQ300-Welle sank der Kolk schutz im Anströmbereich ein und die Steine wurden nach vor verschoben (Abb. 9). Es entstand ein 3,9 m tiefer Kolk direkt am Pfeiler.

In weiteren Versuchen wurden folgende Veränderungen vorgenommen:

- Filterschicht unter den Wasserbausteinen (ergab keine Verbesserung),
- Vergrößerung der Wasserbausteine auf 1 bis 1,5 t (Stabilität nicht gegeben),
- Anordnung einer dritten Lage Wasserbausteine 1 bis 1,5 t im Anströmbereich und Rückkehr auf die Steingröße 370 bis 540 kg im Abströmbereich (zu tiefer Kolk in der Anströmung),
- Verwendung von Betonplatten (1,5 x 1,5 x 0,9 m) – keine Verbesserung,
- Sechseckige Betonprismen (R = 1 m, h = 1,2 m) – keine Verbesserung,
- Wasserbausteine im Anströmbereich mit 2 bis 3 t (2-lagig) – verbesserte Stabilität,
- Verbreiterung der mit Wasserbausteinen geschützten Fläche.

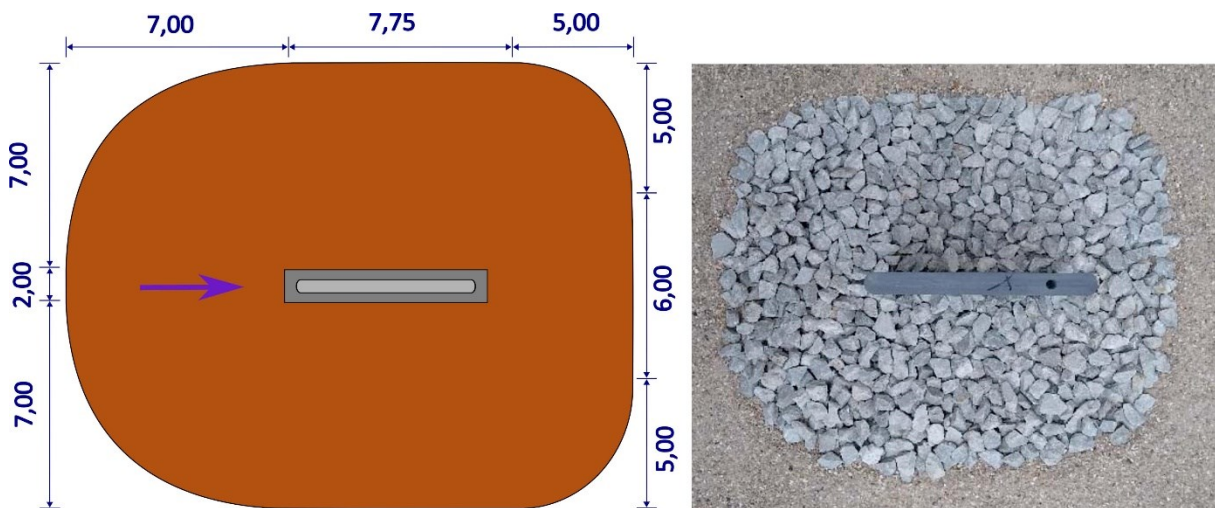


Abb. 8 Ausführung des zweiten Kolksschutzes (Steine 370 bis 450 kg, insgesamt 407 t)

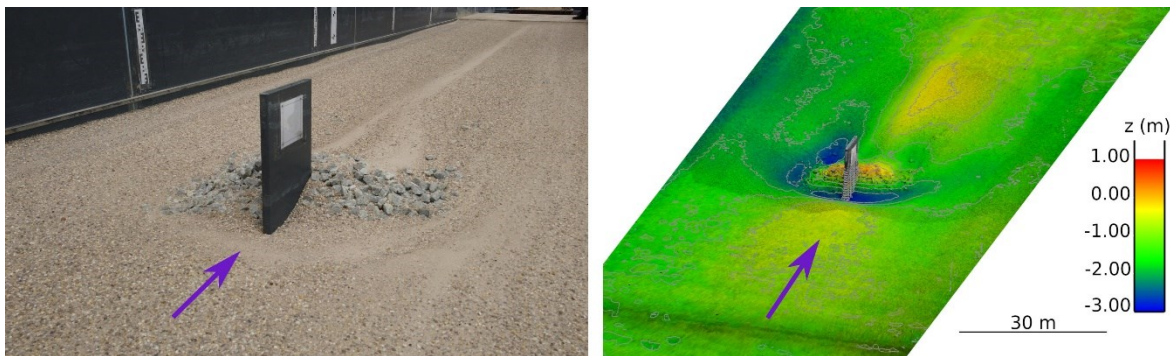


Abb. 9 Kolkentwicklung nach dem Hochwasserscheitel

3.3 Ergebnis nach Optimierung

Mit dem in Abb. 10 dargestellten Kolksschutz konnte ein ausreichender Erosionsschutz erzielt werden. Erosionen traten nur mehr auf der Anströmseite auf und die Kolkbildung ging nicht unter den auf Pfählen fundierten Pfeilersockel (Abb. 11).

Der Steinbedarf stieg auf insgesamt 786 t. Die bauliche Umsetzung dieses Kolksschutzes ist aber immer noch günstiger als die ursprünglich geplante vollständige Ummantelung der Pfeilerfundamente mit Bohrpfählen, die unter den bestehenden Brückentragwerken nur sehr aufwändig herzustellen wäre.

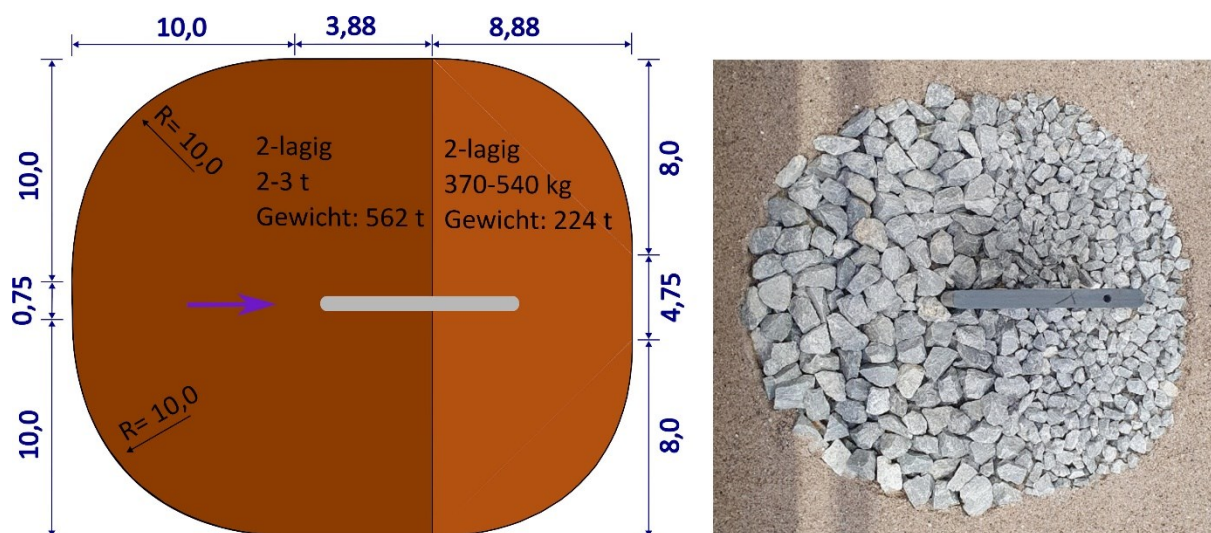


Abb. 10 Ausführung des optimierten Kolkshutzes

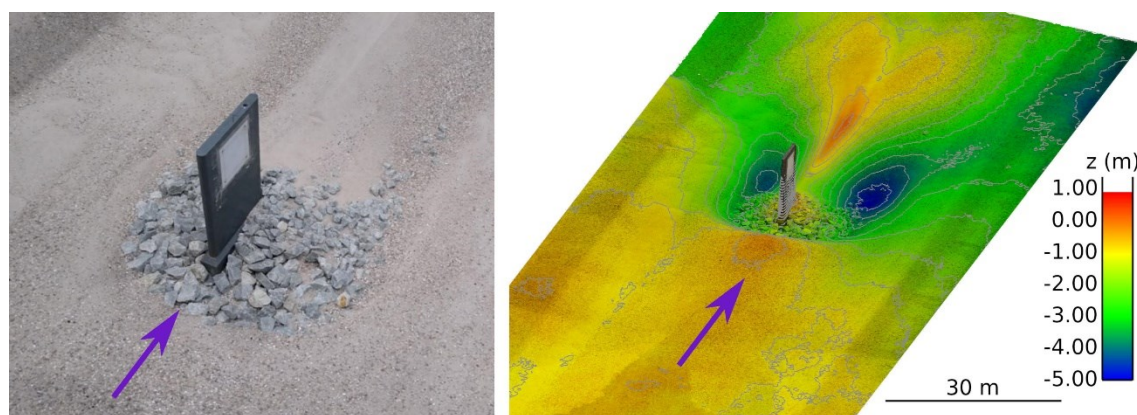


Abb. 11 Optimierter Kolkshutz nach dem Hochwasserscheitel

4 Fazit

Während bei Pfeilern ohne Verkläuserung trotz hoher Fließgeschwindigkeiten (bis ca. 5 m/s) entweder keine, oder nur geringe Kolke auftreten, verursacht die Verkläuserung eine hohe Beanspruchung der Sohle in Pfeilernähe. Für einen Kolkshutz mit Wasserbausteinen muss das Steindepot rund um den Pfeiler groß genug sein, damit sich ein stabiler Böschungsschutz vom Pfeiler weg, hin zum vor und seitlich des Pfeilers auftretenden Kolk bildet. Im Bereich des Steindepots, das umgelagert wird bringt eine Filterschicht keinen Stabilitätsgewinn.

Soweit möglich soll das Steindepot nur 2-lagig ausgeführt werden, da ein 3-lagiger Aufbau mit einem tieferen Aushub Stabilitätsprobleme im Bereich der Pfeilerfundamente verursacht und damit auch höheren Kosten verbunden sind.

Die Steine sollen nur so groß gewählt werden, dass sie gerade nicht abtransportiert werden. Je größer die Steine sind, desto größer ist auch der Lückenraum zwischen den Steinen. Die vom Verkläuserungskörper nach unten gedrückte Strömung kann in größere Lücken leichter eindringen und das darunter befindliche Geschiebe erodieren. Für den flussabwärts gelegenen Teil des Kolkshutzes reichen in der Regel kleinere Steine als im Anströmbereich. Die in den Versuchen verwendeten Steine von 370 bis 540 kg entsprechen Shields-Werten von ca. 0,005 bis 0,006 für die freie unbeeinflusste Strömung (Fließtiefe 6,33 m, Gefälle 1 ‰).

Der flächige Kolkschutz verhindert die Kolkbildung direkt am Pfeiler. Seitlich des Kolkschutzes und etwas flussab verschoben bilden sich, durch die vom Verklausungskörper zur Seite und nach unten gelenkte Strömung tiefe Kolke (vergleiche Abb. 6 und 10). Dieser Prozess kann bei entsprechender Nähe des Pfeilers zum Ufer die Stabilität der Ufersicherung negativ beeinflussen.

Literatur

- Cantero-Chinchilla, F.N.; de Almeida, G.A.M.; Escarameia, M. (2018). Assessing the effects of debris accumulations at river bridges, Water and Environmental Engineering group, University of Southampton, in collaboration with HR Wallingford.
- Melville, B.W., Coleman, S.E. (2000). Bridge Scour, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.
- Pagliara, S.; Carnacina, I. (2016). Influence of Wood Debris Accumulation on Bridge Scour, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 137, No. 2, pp 254-261.
- Yang, Y.; Melville, B.W.; Sheppard, D.M.; Shamseldin, A.Y. (2019). Live-Bed Scour at Wide and Long-Skewed Bridge Piers in Comparatively Shallow Water, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 145, No. 5, 06019005.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Dr. Boris Huber
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
boris.huber@tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Dr. Michael Hengl
Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung
Am Brigittenauer Sporn 3, A-1200 Wien
michael.hengl@baw.at

Dipl.-Ing. Bernhard Valenti
Internationale Rheinregulierung
Parkstrasse 12, CH-9430 St. Margrethen
bernhard.valenti@rheinregulierung.org