Überströmte Buhnen in einer Aufweitung: Bemessung, Monitoring und Optimierung

Nina Ryser, Lukas Hunzinger, Silvia Hunkeler

Zusammenfassung

Ein unverbauter Uferabschnitt an der Aare zwischen Thun und Bern wurde aufgrund der Strömungsablenkung durch eine anwachsende Kiesbank direkt angeströmt und erodiert. Nach Erreichen der Interventionslinie wurde das Ufer mit einer Abfolge von kurzen und langen überströmbaren Buhnen vor weiterer Erosion geschützt.

Es wurden elf normal zum Ufer ausgerichtete Buhnen gebaut. Der Buhnenfuss ist 3 m unter die mittlere Sohle fundiert, der Buhnenkopf befindet sich auf der Höhe der mittleren Sohle.

Im Rahmen eines mehrjährigen Monitorings konnte beobachtet werden, wie sich mit dem weiteren Anwachsen der Kiesbank flussaufwärts auch der Ort des Strömungsangriffs flussaufwärts verschoben hat.

Im Herbst 2020 wurde bei einer Kontrollbegehung an den zu diesem Zeitpunkt am stärksten belasteten Buhnen Schäden festgestellt. Die Auswertung von Luftbildern vom Frühling 2020 hat zudem gezeigt, dass an einigen der langen Buhnen der Buhnenkopf abgerutscht ist. Bei der Vermessung der Sohle der Aare mit Echolot wurde festgestellt, dass einige Kolke tiefer sind, als dies mit den gängigen Bemessungsansätzen im Rahmen der Dimensionierung berechnet wurde.

Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein gegenüber den gebauten Buhnen verstärkter, massiverer Buhnentyp entworfen, welcher bei Bedarf in weiteren Projekten an der Aare zwischen Thun und Bern angewendet werden kann.

Résumé

L'expansion d'un banc de gravier le long de l'Aar entre Thoune et Berne et la déviation du courant induite ont causé l'érosion d'une partie de berge non aménagée. Une fois la ligne d'intervention franchie, la rive a été protégée de toute érosion supplémentaire par une succession d'épis submersibles courts et longs.

Onze épis ont été construits perpendiculairement à la rive. Le pied de l'épi est fondé à 3 m sous le fond moyen du lit, la tête de l'épi se trouve à la hauteur du fond moyen du lit.

Il a été possible d'observer grâce à un suivi pluriannuel comment le point d'attaque du courant s'est déplacé vers l'amont au fur et à mesure de la croissance du banc de gravier.

En automne 2020, une visite de contrôle a permis de constater des dommages sur les épis qui étaient à ce moment-là les plus sollicités. L'analyse de photos aériennes prises au printemps 2020 a en outre montré que la tête de certains épis longs avait glissé. Le relevé du lit de l'Aar à l'aide d'un échosondeur a permis de constater que certains affouillements étaient plus profonds que ce qui avait été calculé avec les approches de dimensionnement classiques lors du dimensionnement.

Les connaissances acquises ont abouti à la conception d'un type d'épi plus solide et plus massif que les épis construits, qui devrait être utilisé dans d'autres projets sur l'Aar entre Thoune et Berne.

1. Ausgangslage

Der Aarelauf zwischen Thun und Bern wurde im Verlauf der vergangenen Jahrhunderte zwecks Landgewinn und Hochwasserschutz kanalisiert und die Ufer wurden verbaut. Die Schutzbauten, insbesondere die Bauwerke aus Beton, haben ihre Lebensdauer erreicht.

Bei den Hochwasserereignissen von Mai 1999 und August 2005 wurden grosse Gebiete zwischen Münsingen und Bern überflutet. Diese Ereignisse haben zu einem Umdenken bei der Strategie zur Bekämpfung von Hochwassergefahren an der Aare geführt.

Im Sommer 2006 wurde das Gebiet Hunzigenau in der Gemeinde Rubigen als Reaktion auf die Überflutungen während des Hochwasserereignisses im Jahr 2005 revitalisiert. Am rechten Ufer der Aare wurden zwei Seitengerinne ausgehoben und dadurch zwei Inseln geschaffen. Die südliche der beiden Inseln wurde nicht befestigt, sie sollte sich durch Erosion und Ablagerung verändern können. Die Ufer der nördlichen Insel sollen stabil bleiben, weil der Wanderweg entlang der Aare über diese Insel führt. Sie wurden deshalb lokal gesichert. Im Rahmen dieser Revitalisierung wurden mehrere Buhnen rückgebaut und ein Hochwasser- und Lärmschutzdamm in einiger Entfernung zum Flusslauf erstellt. Ziel dieser Massnahmen war der Schutz der Autobahn A6 vor Überflutung *(Tiefbauamt des Kantons Bern, 2012)*.

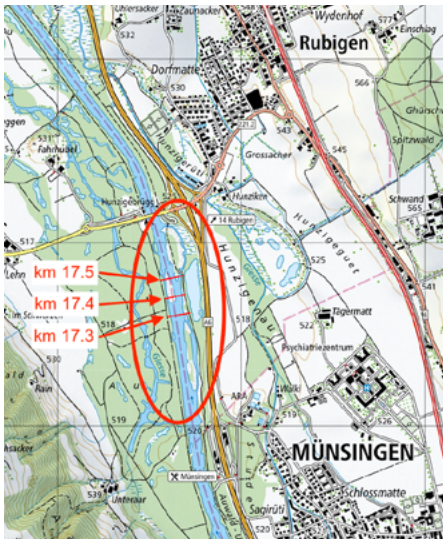

Bild 1: Situation des Gebiets Hunzigenau bei Rubigen. Datengrundlage © swisstopo.

Die Aare hat in den darauffolgenden Jahren ihre Fliesswege im Abschnitt der Hunzigenau aufgrund der grösseren zur Verfügung stehenden Breite mehrmals ver-

ändert, wobei auf diese veränderten Bedingungen wiederholt mit Uferschutzmassnahmen reagiert werden musste.

Im Verlauf der Jahre 2015 und 2016 hat sich eine Kiesbank im Hauptgerinne der Aare kontinuierlich vergrössert und die Hauptströmung bei Niederwasser an das unverbaute rechte Ufer zwischen den beiden Seitenarmen gelenkt. Das rechte Ufer wurde in der Folge erodiert, die Erosion reichte bis nahe an den Uferweg. Das Gerinne der Aare war nun im Abschnitt zwischen den beiden Inseln so breit, dass die Transportkapazität dort gegenüber der Transportkapazität im Oberlauf deutlich reduziert war und ein bedeutender Teil des durch die Aare transportierten Geschiebes abgelagert wurde. Der Strömungsdruck auf das rechte Ufer nahm mit dem Anwachsen der Kiesbank weiter zu.

Im Frühling 2016 wurde zum Schutz des erodierten Uferabschnitts eine provisorische Verbauung aus Baumstämmen erstellt. Im Herbst 2016 hat das für die Aare zuständige Tiefbauamt des Kantons Bern entschieden, den Abschnitt des rechten Ufers zwischen den beiden Inseln in der Hunzigenau mit einem definitiven Uferschutz vor weiterer Ufererosion zu schützen.

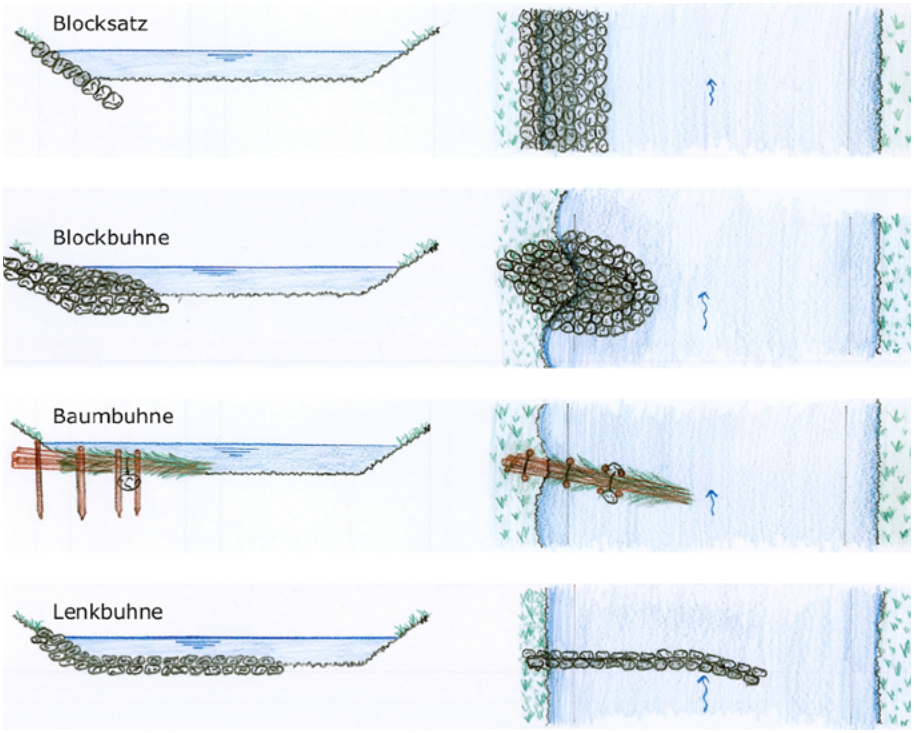

Bild 2: Skizzen der Uferschutztypen Blocksatz, Blockbuhne, Baumbuhne und Lenkbuhne in Querprofil und Situation.

2. Variantenstudium und Bestvariante

Mit einem definitiven Verbau soll die Uferlinie gehalten werden. Zur Bestimmung des geeigneten Uferschutztyps wurden verschiedene Varianten untersucht. Geprüft wurden die Uferschutztypen Blocksatz, Blockbuhnen, Baumbuhnen und Lenkbuhnen.

Der Blocksatz ist ein häufig angewendeter Längsverbau, bei dem mit gebrochenen, formwilden Blöcken das Ufer durchgehend verbaut und so vor Erosion geschützt wird. Die weiteren drei Uferschutztypen sind punktuelle Uferverbauungen, bei welchen das Ufer nicht durchgehend verbaut wird. Die Bauwerke ragen dafür in den Abflussquerschnitt und lenken die Strömung vom Ufer weg, die Ufer werden dadurch vor Erosion geschützt. Blockbuhnen werden ebenfalls aus gebrochenen, formwilden Blöcken gebaut, manchmal wird der Kern aus Schroppen erstellt. Für Baumbuhnen werden ganze Nadelbäume mitsamt den Ästen, Wipfel voran, ins Gerinne gelegt. Vorgerammte Pfähle sowie an den Baumstämmen angebundene Gewichtssteine verhindern das Auf- und Abtreiben der Bäume. Durch das elastische Verhalten der Baumwipfel in der Strömung treten an diesen Bauwerken deutlich kleinere Kolke auf als bei harten Verbauungen aus Blöcken. Lenkbuhnen bestehen aus mehreren Tonnen schweren Blöcken, welche linear am Ufer und auf der Sohle verlegt werden. Sie beeinflussen den Abflussquerschnitt weniger als Buhnen, führen aber zu einer Fixierung der Sohle, da die Lenkbuhnen meist so gebaut werden, dass lediglich ein Drittel der Sohle unverbaut bleibt *(Mende, 2014)*.

Die Uferschutztypen wurden in den Kriterien Gesellschaft, Umwelt, Flussmorphologie, Hochwasserschutz und Wirtschaftlichkeit miteinander verglichen und bewertet. Bei sämtlichen Kriterien hat der Uferschutztyp Blockbuhnen am besten abgeschnitten. Folgende positive Eigenschaften haben zur guten Bewertung der Blockbuhnen beigetragen: sie gliedern sich gut in die bestehende Buhnenabfolge entlang der Aare ein; dank den unverbauten Ufern in den Buhnenfeldern werden Möglichkeiten zur Quervernetzung geschaffen. Durch die vielfältigen Strömungen und dadurch entstehende morphologische Strukturen bilden sich vielfältige Fischlebensräume und -unterstände.

3. Dimensionierung

Buhnentyp

Für die Hunzigenau wurden überströmbare, normal zum Ufer ausgerichtete Buhnen gewählt. Bei diesem Typ wird der Buhnenkopf so tief angesetzt, dass er nur bei Niederwasser nicht überströmt wird. Bei Mittelwasser-Abflüssen hingegen wird ein Teil des Buhnenrückens überströmt. Der Typ der überströmbaren Buhne hat gegenüber der nicht überströmbaren Buhne den Vorteil, dass der Versagensmechanismus gutmütiger ist.

Es wurden verschiedene Längen der überströmbaren Buhnen geprüft. Um das monotone Bild regelmässiger Buhnen aufzubrechen und über möglichst grosse Bereiche eine unverbaute Sohle zu erhalten, wurde eine abwechselnde Abfolge von längeren und kürzeren Buhnen gewählt. Die längeren Buhnen sollen die Hauptströmung vom Ufer fernhalten, die kürzeren die Wurzel der längeren Buhnen vor Erosion schützen und die Ausdehnung der Widerwasser-Girlanden beschränken.

Dimensionierungsgrössen

Für die Bemessung der Schutzbauten wurde von einer Sohlenbreite der Aare von 80 m ausgegangen. Als Dimensionierungshochwasser wurde der Abfluss $HQ_{100} = 582\,m^3/s$ gewählt. Die verwendeten charakteristischen Korngrössen betragen $d_m = 3{,}8\,cm$ und $d_{90} = 8{,}5\,cm$. Es wurde davon ausgegangen, dass auf dem betroffenen Abschnitt Geschiebe und Sohlenmaterial die gleiche Korngrösse haben.

Ermittlung der Gerinneform

Das zu schützende Ufer befindet sich in einem – gegenüber dem Ober- und Unterlauf – verbreiterten Flussabschnitt. Im modifizierten Ahmari & da Silva-Diagramm *(BAFU, 2021, Bild 3)* wird für die Aare in der Hunzi-

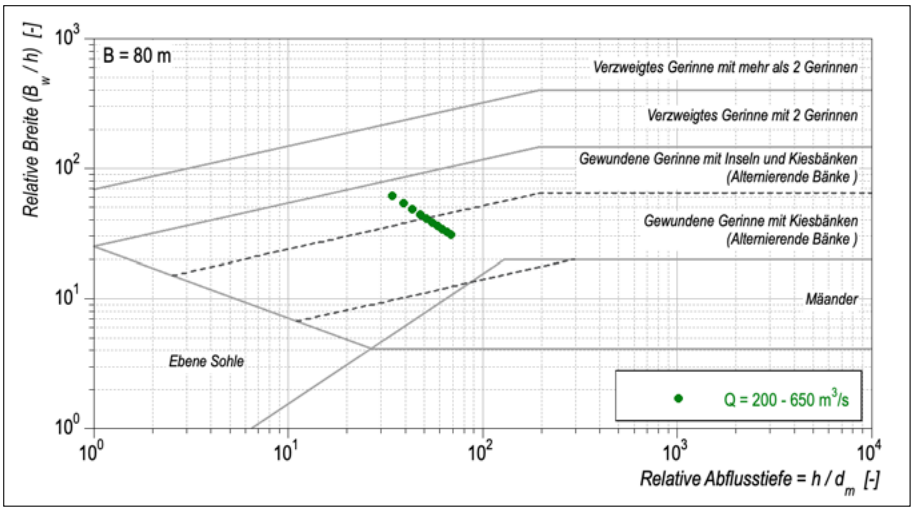

Bild 3: Modifiziertes Ahmari & da Silva-Diagramm mit der erwarteten Gerinneform der Aare im Gebiet Hunzigenau bei einer Sohlenbreite von 80 m.

Bild 4: Von der Hunzigenbrücke aus liess sich zum Zeitpunkt der Projektierung im Herbst 2016 das Pendeln der Hauptströmung gut beobachten (Blick gegen die Fliessrichtung).

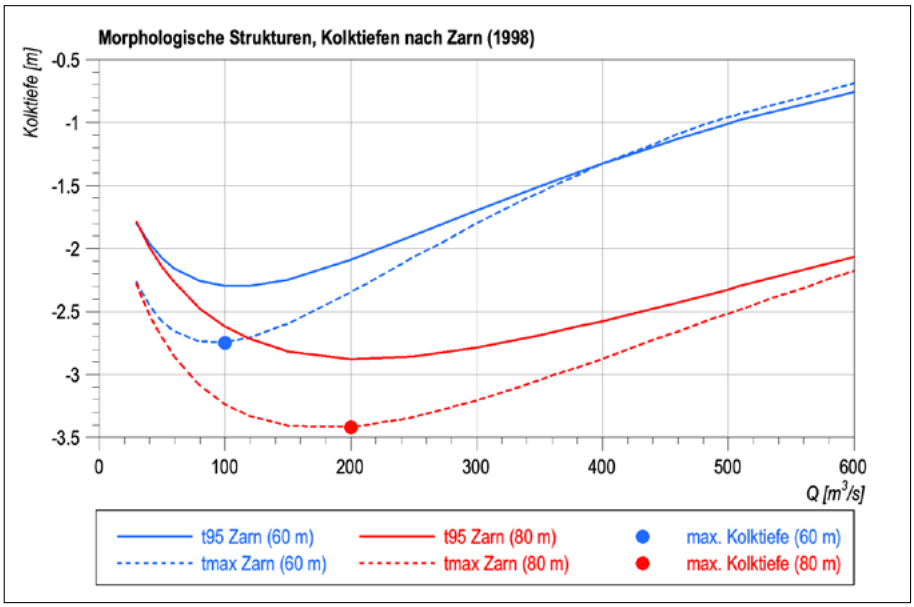

Bild 5: Morphologische Kolktiefe nach Zarn (1997) für Sohlenbreiten von 60 und 80 m. Die maximale Kolktiefe wird bei Abflüssen von 150 bis 200 m³/s erreicht, der mittlere Abfluss bei der Messstation Bern Schönau beträgt ca. 120 m³/s.

genau bei einer Sohlenbreite von 80 m ein gewundenes Gerinne mit Inseln und Kiesbänken (alternierende Bänke) erwartet.

Dieses Bild – ein Ansatz von alternierenden Bänken und eine Hauptströmung, welche im Gerinne von einem Ufer zum anderen pendelt – war zum Zeitpunkt der Projektierung im Herbst 2016 in der Hunzigenau zu beobachten *(Bild 4)*.

Ermittlung der Kolktiefen

Für Sohlenbreiten von 60 und 80 m und verschiedene Abflüsse wurden die morphologischen Kolktiefen t_{95} (Kolktiefe, welche zu 95 Prozent erreicht wird) und t_{max} (maximale Kolktiefe) nach *Zarn (1997)* berechnet. Bei einer Sohlenbreite von 80 m wird die grösste Kolktiefe t_{95} nach *Zarn (1997)* bei einem Abfluss von ca. 200 m³/s (entspricht ca. einem Q_{50}) erwartet und beträgt rund 2,9 m *(Bild 5)*.

Im Querprofil bei km 17,500 wurde im Messjahrgang 2015 eine Kolktiefe von rund 3,2 m unter die mittlere Sohlenlage gemessen. Die aufsummierte Sohlenbreite von Hauptgerinne und Seitenarm betrug in diesem Profil knapp 85 m. Die gemessene Kolktiefe befindet sich im Bereich zwischen der berechneten maximalen und der 95-Prozent-Kolktiefe nach Zarn (2,9 bis 3,4 m) und deckt sich somit sehr gut mit den berechneten Kolktiefen.

Das Ausmass des Buhnenkolks wurde nach Ansatz von *Hunzinger (1998)* berechnet. Die maximale Tiefe des Buhnenkolks ($t_{Buhne\ max}$) unter die mittlere Sohlenlage wurde für ausgewählte kleine Abflüsse sowie für die Hochwasserabflüsse HQ_5, HQ_{10}, HQ_{30} und HQ_{100} ermittelt. $t_{Buhne\ max}$ nach Hunzinger bei einer Sohlenbreite von 80 m wird demnach bei einem Abfluss von ca. 120 m³/s erwartet und beträgt rund 4,25 m *(Bild 7)*. Der Buhnenkolk ist somit deutlich tiefer als die morphologischen Kolke nach Zarn.

Festlegung der Buhnengeometrie

Basierend auf den berechneten, theoretisch auftretenden Kolktiefen wurde eine Fundationstiefe der Buhnen von 3 m unter die mittlere Sohlenlage gewählt. Dies entspricht ungefähr der bestehenden effektiven Sohlenhöhe. Um das Risiko einer Unterkolkung der Buhnen zu verringern, wurde eine zusätzliche Blockreihe um den Buhnenfuss verlegt.

Die langen Buhnen messen 22 m von der Wurzel zum Kopf und 26,5 m von der Buhnenwurzel zu ihrem Fuss. Bei den kurzen Buhnen beträgt die Distanz zwischen Buhnenwurzel und -kopf 12 m, zwischen Buhnenwurzel und -fuss misst sie 16,5 m.

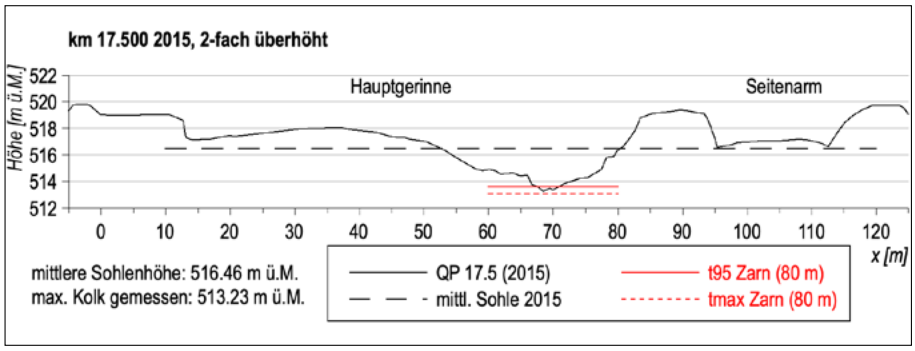

Bild 6: Im Jahr 2015 im Auftrag des BAFU gemessenes Querprofil der Aare bei km 17,5 mit berechneten Kolktiefen nach Zarn (1997) für eine Sohlenbreite von 80 m.

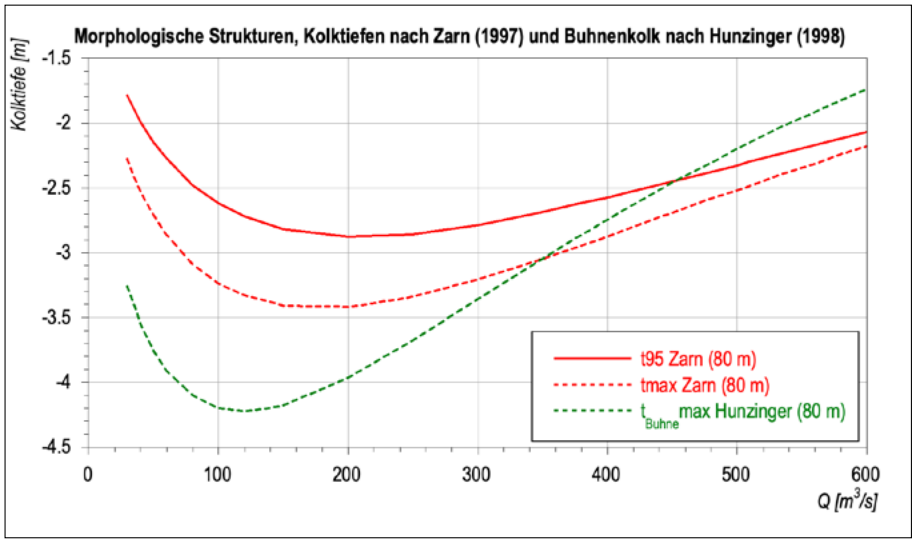

Bild 7: Maximale Buhnenkolktiefe nach Hunzinger (1998) und morphologische Kolktiefe nach Zarn (1997) für eine Sohlenbreite von 80 m. Die maximale Buhnenkolktiefe wird bei Abflüssen von rund 120 m³/s erreicht, dies entspricht ca. dem mittleren Abfluss der Aare bei der Messstation Bern Schönau.

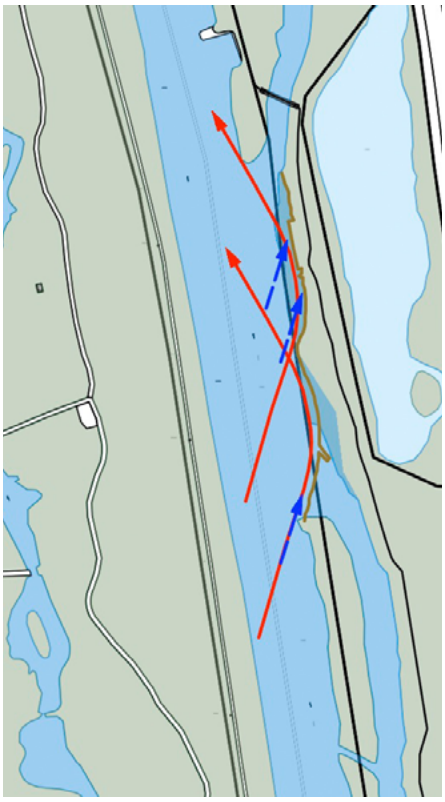

Bild 9: Der Anströmwinkel auf das rechte Ufer bei einem Abfluss von rund 60 m³/s wurde aus der bei diesem Abfluss aufgenommenen Uferlinie mit frischem Uferabbruch abgeleitet (vgl. auch Bild 10).

Der Rücken der langen Buhnen verläuft mit einer Neigung von 1:11 von Buhnenwurzel zu Buhnenkopf, bei den kurzen Buhnen mit 1:6. Die Buhnenwurzel liegt 2 m über der mittleren Sohle und reicht bis knapp unter die Geländeoberfläche. Die flussaufwärts gerichtete Seite der Buhnen weist eine Neigung von 1:1, die flussabwärts gerichtete Seite eine solche von 2:3 auf. Die flussaufwärts gerichtete Seite wurde steiler ausgeführt, um einerseits die verbaute Fläche zu verringern und einen Zusammenschluss mit der nächsten Buhne zu vermeiden und andererseits, um Material und somit Kosten zu sparen. Die flussabwärts gerichtete Seite wurde nicht steiler gebaut, um die Schwellenwirkung zu verringern und einen möglichen Kolk im Unterwasser der Buhne zu begrenzen.

Anordnung der Buhnen

Der Anströmungswinkel wurde aufgrund einer qualitativen Beurteilung bestimmt. Die im Herbst 2016 aufgenommene Uferlinie zeigt bei der Einmündung des südlichen Seitenarms einen klar abgrenzbaren Uferverlauf mit frischem Uferabbruch, welcher bei einem Abfluss von rund 60 m³/s entstanden ist *(Bild 9 und Bild 10)*.

Der Anströmungswinkel ist für die Anordnung der Buhnen massgebend, also für den Abstand der einzelnen Buhnen zueinander und für den Winkel der Buhnenachse zum Ufer oder Gerinne. Überströmte Buhnen sollen zum Schutz des Ufers und der nachfolgenden Buhnenwurzel inklinant zur Strömung angeordnet sein. Die Buhnen wurden so angeordnet, dass die Anströmung wasserseitig ihrer Mitte auf die flussabwärts folgende Buhne trifft. Die Buhnenwurzel kann so bei richtiger Anordnung der Buhnen nicht durch direkte Anströmung freigelegt werden. Die Wider-

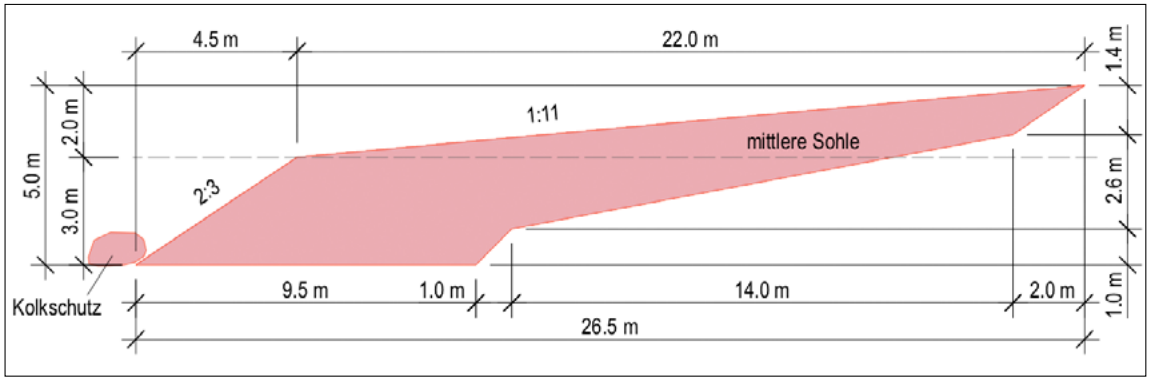

Bild 8: Normalie der langen Buhne, so wie sie im Jahr 2017 in der Hunzigenau eingebaut wurde.

Bild 10: Frischer Uferabbruch bei einem Abfluss von 60 m³/s vor dem Bau der Buhnen. Blick in Fliessrichtung.

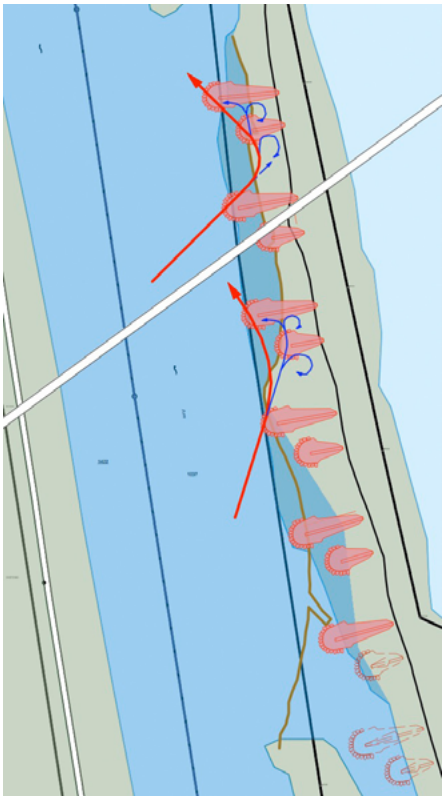

Bild 11: Für die ideale Anordnung der Buhnen wurde die Bandbreite der möglichen Anströmwinkel auf das rechte Ufer inkl. Bildung der Widerwasserströmungen abgeschätzt.

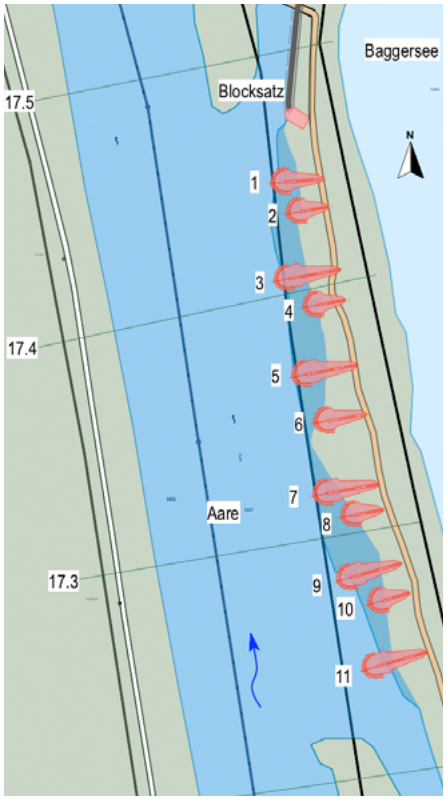

Bild 12: Situationsplan der Buhnen mit Nummerierung.

wasser wirken als Wasserpolster, welche die direkte Anströmung stark reduzieren oder gar verhindern. Die Strömung verläuft in der Hunzigenau aufgrund der Kiesbank nicht parallel zum Ufer, sondern trifft in Abhängigkeit des Abflusses und der morphologischen Entwicklung in unterschiedlichen Winkeln darauf. Um die möglichen Anströmwinkel zu bestimmen, wurde das Strömungsbild bei verschiedenen morphologischen Zuständen beobachtet.

Zwischen zwei langen Buhnenachsen wurde ein Abstand von 40 m bestimmt. Der Abstand zwischen einer langen und der darauffolgenden kurzen Buhne beträgt 27 m. Die Buhnenachse wurde ungefähr senkrecht zur bestehenden Uferlinie angeordnet. So sind die Buhnenachsen der langen Buhnen nicht zwingend parallel zueinander angeordnet.

Insgesamt wurden elf Buhnen gebaut, davon fünf lange, zwei mittlere und vier kurze.

4. Ausführung

Nach Rücksprache mit dem Tiefbauamt des Kantons Bern und einem sehr erfahrenen Wasserbau-Polier wurde festgelegt, dass ohne Wasserhaltung im fliessenden Wasser gebaut wird. Teilweise konnte im Strömungsschatten von bereits umgesetzten Buhnen gebaut werden. Der bei der Ausführung verwendete Bagger war mit einem GPS-Empfänger ausgerüstet. Der Baggerfahrer konnte so die Blöcke auch ohne Sicht im tiefen Wasser anhand der durch die Bauunternehmung angefertigten 3D-Pläne auf die vorgegebenen Positionen setzen.

Die Buhnen wurden einlagig mit gebrochenen 2 bis 5 t schweren Blöcken erstellt. Der Buhnenkern besteht aus Schroppen; auch die Zwischenräume zwischen den einzelnen Blöcken wurden mit Schroppen verfüllt. Grösstenteils wurden die Buhnen nach der Erstellung wieder mit kiesigem Aushubmaterial überschüttet.

Die Buhnen wurden im Frühjahr 2017 ausgeführt, die Bauarbeiten dauerten sechs Wochen.

Bild 13: Auf dem Display im Bagger sieht der Baggerfahrer seine Position in der Situation, in einem Schnitt sowie in der Arbeitsachse. Mithilfe der hinterlegten 3D-Pläne können Blöcke auch ohne gute Sicht im tiefen und fliessenden Wasser mit einer ausreichenden Genauigkeit eingebaut werden.

Bild 14: Einbau der Blöcke einer langen Buhne im fliessenden Wasser (Foto J. Schneider).

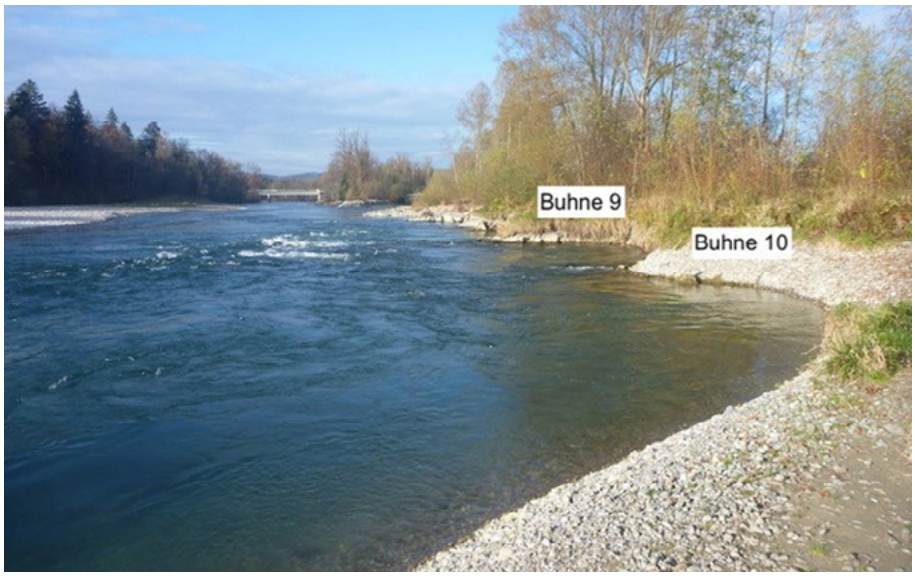

Bild 15: Girlanden zwischen den Buhnen 9 und 10 sowie oberhalb der Buhne 10 im November 2020. Blick in Fliessrichtung.

5. Monitoring

Uferanrisse/Girlandenbildung

Zwischen Juni und August 2017, also in den Monaten nach dem Bau der Buhnen, wurde die Entwicklung des Ufers in den Buhnenfeldern beobachtet. Auslöser für das Monitoring war die Girlandenbildung im Unterwasser der Buhne 3 mit steilem Uferanriss in der Nähe des Uferwegs. Die Girlanden genannten Erosionsnischen zwischen den Buhnen werden durch Widerwasserströmungen in den Buhnenfeldern verursacht. Dieser erste Anriss stabilisierte sich im Verlauf des Sommers 2017, die Prozessräume verschoben sich in der Folge flussaufwärts.

Im Oktober 2019 bildete sich zwischen den Buhnen 6 und 7 eine weitere Erosionsnische mit steilem Uferanriss. Aufgrund der Erfahrung mit der Girlandenbildung unterhalb der Buhne 3 wurde beim Monitoring davon ausgegangen, dass sich die Girlande zwischen den Buhnen 6 und 7 nur noch wenig verändern wird. Insbesondere Nachbrüche des senkrecht stehenden und teilweise durchwurzelten Bodens und damit eine Verschiebung der Böschungsoberkante näher zum Uferweg wurden erwartet. Weiter wurde davon ausgegangen, dass über den Winter 2019/2020 aufgrund der kleineren Abflüsse die Girlandenbildung eher oberhalb der Buhne Nr. 9 fortschreiten wird.

Die im Herbst 2019 beschriebene erwartete Entwicklung konnte anlässlich einer Begehung im November 2020 bestätigt werden *(Bild 15)*. Die Gesamtsituation des Strömungsverlaufs und der Buhnenwirkung war an sich aber vergleichbar mit der Situation, welche anlässlich der Erhebung vom Oktober 2019 angetroffen wurde.

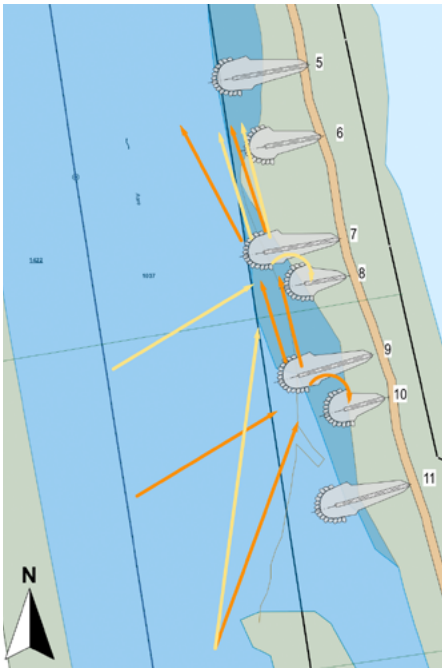

Bild 16: Der Strömungsverlauf und damit auch der Angriffspunkt auf das Ufer variiert je nach Abfluss. Bei kleinen Abflüssen wurde ein steiler Anströmwinkel beobachtet, die Strömung trifft auf die Buhne 9 (orange Pfeile). Bei grösseren Abflüssen ist der Anströmwinkel flacher, die Strömung trifft weiter unten bei der Buhne 7 auf das Ufer (gelbe Pfeile).

In den Buhnenfeldern wurde bis im Winter 2020/2021 weder eine Gefährdung der Buhnenwurzel noch des Uferwegs festgestellt oder eine Entwicklung im Uferbereich beobachtet, welche problematisch werden könnte. Die langanhaltend hohen Abflüsse im Sommer 2021 haben unterhalb der Buhne 3 neue Uferabbrüche bewirkt. Die Verantwortlichen des Tiefbauamts haben daraufhin beschlossen, den Uferweg infolge der Abrutsch- und Absturzgefahr hinter die Buhnenwurzel zu verlegen. Auf bauliche Massnahmen zur Unterbindung der Prozesse wurde verzichtet.

Im Rahmen des Monitorings liess sich gut beobachten, dass sich je nach Abflussmenge in der Aare der Winkel der Anströmung und damit zusammenhängend auch der Angriffspunkt der Hauptströmung auf das Ufer und die Buhnen verändert. Je kleiner die Abflussmenge, um so steiler der Anströmwinkel und um so grösser der Abflussanteil, welcher ins Widerwasser abgelenkt wird *(Bild 16)*.

Im gesamten Beobachtungszeitraum konnte festgestellt werden, dass Erosionsprozesse an den Ufern bei mittleren und kleinen Abflüssen stattfanden. Erkennbar war dies anlässlich von Feldbegehungen anhand senkrecht stehender Uferböschungen.

Entwicklung Kiesbank

Seit dem Jahr 2008 hob sich die Sohle im Bereich des ehemaligen Hauptgerinnes bei km 17,4 an, wie sich aus dem Vergleich der Querprofilaufnahmen der Jahre 1999 bis 2015 schliessen lässt. Bis ins Jahr 2011 wuchs die Kiesbank hauptsächlich etwas in die Höhe. Die dadurch verursachte Strömungskonzentration hat zwischen den Jahren 2011 und 2015 zu einer Erosion des rechten Ufers geführt. Die Kiesbank konnte in der Folge auch in die Breite wachsen. Die mittlere Sohlenhöhe veränderte sich seit dem Jahr 2007 kaum *(Bild 17)*.

Die Prognosen zum Wachstum der Kiesbank gegen die Fliessrichtung waren wichtig für die Bestimmung des Anströmwinkels auf die Buhnen und die durch Buhnen zu schützenden Abschnitte *(Bild 18)*.

Im Sommer 2021 wurden für die Aare in Bern über mehrere Wochen sehr hohe Abflüsse gemessen. Während dieser Zeit wurden grosse Geschiebemengen verfrachtet, was auch einen Einfluss auf die morphologische Entwicklung in der Hunzigenau hatte. Die grosse Kiesbank im Hauptgerinne wurde überströmt und von neuem Geschiebe überlagert, zudem wurde auch Geschiebe durch den südlichen Seitenarm transportiert und im Mündungsbereich im Hauptgerinne abgelagert. Durch diese Prozesse wurde die grosse Kiesbank in diesem Bereich vorübergehend zurückgedrängt. Die Buhnen 9 und 10 wurden zwischenzeitlich nicht mehr angeströmt, da die Kiesablagerung aus dem Seitenarm den beiden Buhnen vorgelagert ist *(Bild 19)*.

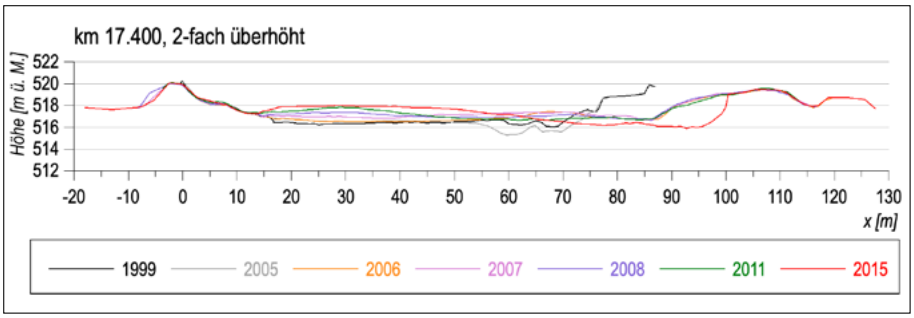

Bild 17: Die im Auftrag des BAFU erhobenen Aufnahmen 1999 bis 2015 des Querprofils km 17,4 der Aare zeigen das Wachstum der Kiesbank über die Jahre und die deutliche Erosion des rechten Ufers im Zeitraum 2011 bis 2015.

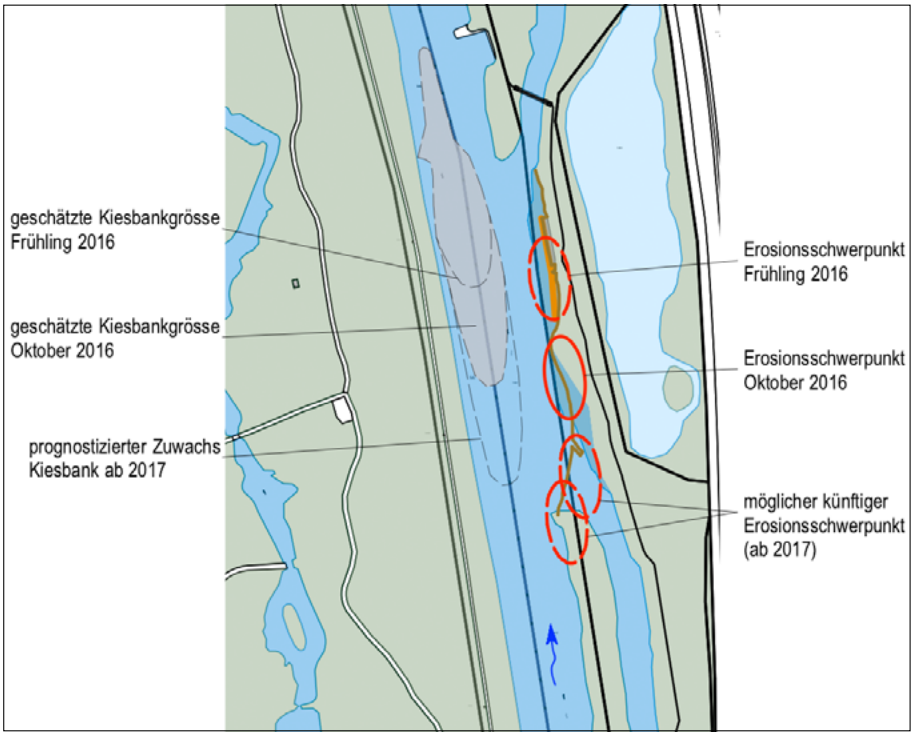

Bild 18: Im Rahmen der Projektierung wurde eine Prognose zum Wachstum der Kiesbank erstellt. Höhe und Ausdehnung der Kiesbank haben einen relevanten Einfluss auf den Anströmwinkel und den Angriffspunkt der Strömung auf das Ufer.

Bild 19: Während der hohen Abflüsse im Sommer 2021 wurde viel Geschiebe umgelagert. Anhand der Geschiebeablagerung vor den Buhnen 9 und 10 wurde ersichtlich, dass eine beträchtliche Geschiebemenge durch den Seitenarm transportiert wurde. Die Buhnen 9 und 10 wurden vorübergehend nicht mehr angeströmt. Aufnahme vom September 2021, Blick in Fliessrichtung.

Schäden an den Buhnen und Instandstellung

Auf Luftbildaufnahmen vom April 2020 mit sehr guter Auflösung wurde festgestellt, dass an den langen Buhnen 3, 5 und 7 der Buhnenkopf an der Oberwasserseite abgerutscht war. Bei Begehungen vor Ort war ebenfalls erkennbar, dass zwischen den Blöcken am Buhnenrücken in Ufernähe Spalten aufklafften, welche auf ein Abrutschen der gesamten benetzten Oberwasserseite der Buhnen 7 und 9 hinwiesen. Spätere Aufnahmen der Sohle mit Echolot im oberen Teil des Perimeters (Buhnen 6 bis 10) zeigten, dass bei den langen Buhnen 7 und 9 der Buhnenkopf um 1,4 resp. 1,6 m abgerutscht war.

Die beiden Buhnen 7 und 9 wurden instand gestellt, soweit sie mit einem Schreitbagger vom Ufer aus erreichbar waren. Neue Blöcke wurden auf die vorhandenen, abgerutschten Blöcke bis hoch zum Rücken aufgebaut. Ziel der Instandstellung war die Stärkung der Buhnen an der beschädigten Oberwasserseite von der Fundation bis zum Rücken und soweit erreichbar bis zum Buhnenkopf.

Sohlenvermessung

Im März und im Mai 2021 wurde bei einem Abfluss von ca. 90 m^3/s resp. ca. 165 m^3/s eine Echolotpeilmessung der Sohle vorgenommen. Neben den erwarteten Buhnenkolken unterhalb der langen Buhnen wurde durch die Sohlenvermessung ein grosser Widerwasserkolk sichtbar, welcher zum Zeitpunkt der Vermessungen vom März und Mai 2021 der kurzen Buhne 10 vorgelagert war *(Bild 20)*. Die relativ starke Ausprägung dieses Widerwasserkolks lässt sich folgendermassen erklären: Aufgrund der steilen Anströmung auf die Buhne 9 wurde ein wesentlicher Anteil des Abflusses in das Widerwasser abgelenkt. Die Ausdehnung des Widerwasserkolks in Uferrichtung wird durch die kurze Buhne 10 eingeschränkt, sodass eine Ausdehnung des Kolks nur in die Tiefe möglich ist.

Durch die Zweitvermessung konnten im Vergleich mit der Erstmessung die theoretischen Ansätze bestätigt werden, wonach bei kleinen Abflüssen ebenso grosse oder gar grössere Kolktiefen auftreten können als bei grösseren Abflüssen.

Kolkbildung: Vergleich Theorie und Erfahrung

Für die Bemessung der Buhnen wurden Berechnungen für Buhnenkolk in Aufweitungen nach *Hunzinger (1998)* vorgenommen *(siehe Abschnitt 3)*.

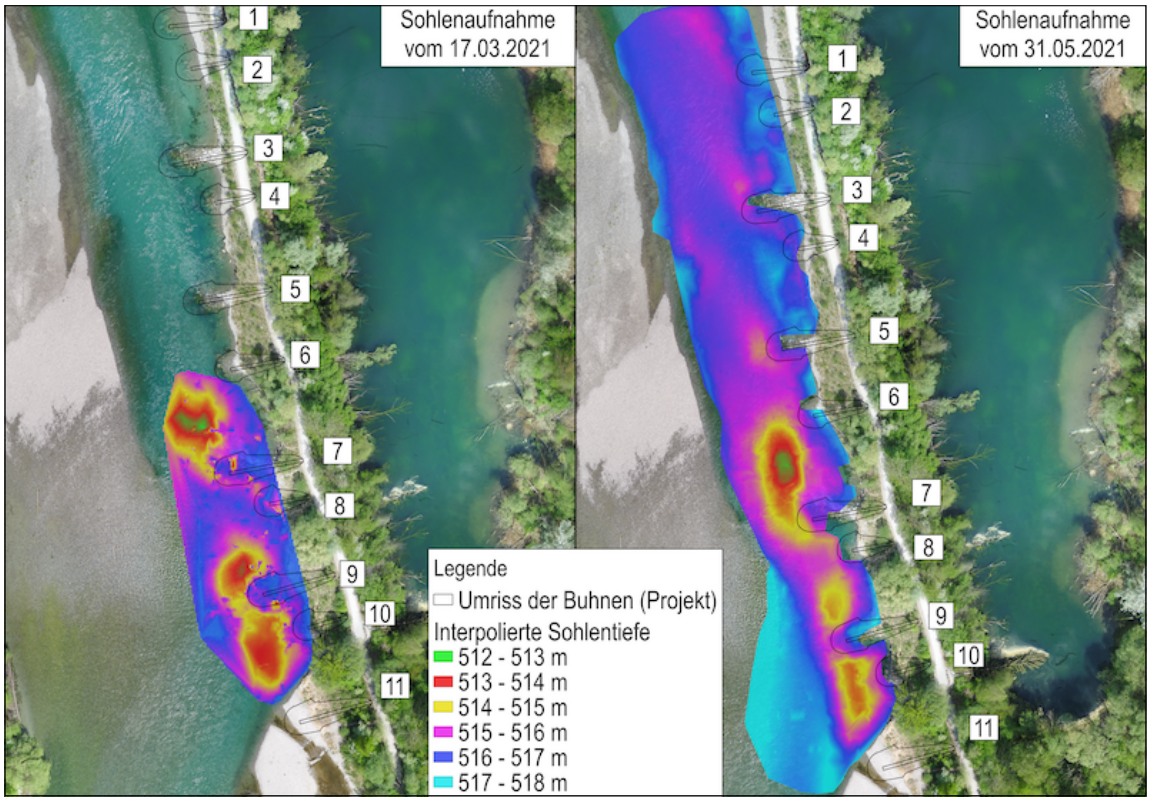

Bild 20: Rasterinterpolation der mittels Echolotpeilmessung erhobenen Sohlenhöhe im März und im Mai 2021 bei Abflüssen von ca. 90 m³/s resp. ca. 165 m³/s.

Für die Berechnung des Buhnenkolks in Aufweitungen wurde von einer Gerinnebreite von 80 m ausgegangen. Die tiefsten berechneten Kolke, welche bei Abflüssen von ca. 120 m³/s auftreten, erreichen eine Tiefe von ca. 4,2 m unter die mittlere Sohle. Effektiv gemessen wurden Kolktiefen von bis zu 5 m unter die mittlere Sohle bei einem Abfluss von ca. 90 m³/s *(Bild 21)*.

Ursache für die grösseren Ausmasse des Buhnenkolks könnte eine Verstärkung der kolkbildenden Strömung durch die Ablenkung der Buhnen (Widerwasser), eine gröbere Kornverteilung des anstehenden Materials als für die Berechnung angenommen oder eine grössere wirksame Sohlenbreite sein (gemessen wird auf dem Luftbild vom April 2020 eine Sohlenbreite von ca. 85 m am Ort des Kolks).

Es wurden Sensitivitätsbetrachtungen für die Parameter B und dm vorgenommen: Für eine Breite von 85 m werden nach *Hunzinger (1998)* Buhnenkolke bis zu einer maximalen Tiefe von 4,4 m erwartet, und zwar bei Abflüssen zwischen 120 und 160 m³/s. Die Verwendung eines grösseren mittleren Korndurchmessers (5 cm anstelle von 3,8 cm) führt theoretisch ebenfalls zu tieferen Kolken, allerdings in geringerem Ausmass.

Aufgrund der vorgenommenen Sensitivitätsprüfung der zwei Parameter Gerinnebreite B und mittlerer Korndurchmesser dm kann ausgeschlossen werden, dass Unsicherheiten in der Annahme dieser Parameter Hauptursache für die Unterschätzung der Kolktiefen sind. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass lokale Effekte und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Strömungen tiefere Kolke verursachen, als dies durch die herkömmlichen Ansätze berechnet werden kann.

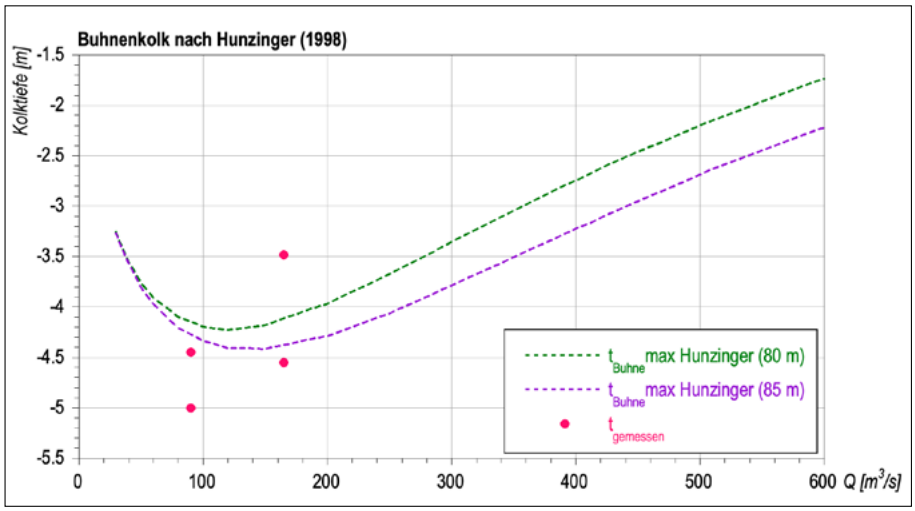

Bild 21: Maximale Buhnenkolktiefe nach Hunzinger [2] für Sohlenbreiten von 80 und 85 m. Die maximale gemessene Tiefe von rund 5 m unter die mittlere Sohle wurde bei einem Abfluss von ca. 90 m³/s aufgenommen. Die gemessenen maximalen Kolktiefen sind 0,2–0,6 m tiefer als dies mit dem herkömmlichen Ansatz berechnet wurde.

6. Fazit

Verbauungssystem: Wirkung und Zuverlässigkeit

Die überströmbaren Buhnen in der Hunzigenau lenken seit ihrem Bau die Hauptströmung zuverlässig vom Ufer weg; die Uferlinie konnte grösstenteils gehalten werden, einzig im unteren Teil musste der über die Buhnenwurzeln führende Weg etwas nach hinten verlegt werden. Die weitere Entwicklung der Kiesbank wurde nicht eingeschränkt respektive die bestehende Kiesbank wurde nicht durch die abgelenkte Strömung erodiert. Die kurzen Buhnen, welche den langen Buhnen vorgelagert sind, erfüllen ihre Funktion, indem sie die Widerwasserströmung bremsen und ablenken und dadurch die Girlandenbildung einschränken.

Dass die ablenkende Wirkung der Buhnen anhält, obwohl die Verbauungshöhe

am Buhnenkopf aufgrund der abgerutschten flussaufwärts gerichteten Seite massiv reduziert ist, bestätigt den gutmütigen Versagensmechanismus dieses Bautyps und weist auf eine hohe Restwirkung hin. Allerdings ist die Restwirkung abhängig von der Sohlenlage und der verbleibenden Verbauungshöhe am Buhnenrücken in Ufernähe.

Im Rahmen des Monitorings hat sich bestätigt, dass die grössten Belastungen auf das Ufer und die Buhnen nicht bei Hochwasserabflüssen, sondern bei mittleren bis kleinen Abflüssen auftreten.

Vielfältiges Strömungsbild und Habitate

Im Bereich der Buhnen ist das Strömungsbild sehr vielfältig. Rasch fliessendes Wasser und langsam strömende Widerwasser liegen dicht beieinander. Die Lücken zwischen den Blöcken der Buhnen bilden wertvolle Fischunterstände.

Kritische Punkte bei der Dimensionierung

Die Formeln für die Abschätzung der Tiefe der morphologischen und der Buhnenkolke reagieren sensitiv auf den Parameter Sohlenbreite B. Auf die mittlere charakteristische Korngrösse d_m reagieren die Formeln weniger empfindlich.

Kritische Punkte bei der Ausführung

Da die Buhnen teilweise unter Wasser gebaut wurden, konnten die ausgeführten Arbeiten nicht optisch überprüft werden. Die Ausstattung des Baggers mit GPS hilft bei der Überprüfung der Einbauhöhen. Die Qualität der Verzahnung der Blöcke ist bei dieser Art der Ausführung hingegen einzig abhängig vom Können und Gefühl des Baggerführers. Da die eingesetzten Maschinisten sehr viel Erfahrung aufwiesen, wird von einer guten Verzahnung ausgegangen. Überprüfen lässt sich die Qualität des Bauwerks unterhalb der Wasserlinie kaum. Dies gilt allerdings auch für andere Bauwerke, welche unter Wasser gebaut werden.

Kritische Punkte im Unterhalt

Uferferne Bauten können schlecht unterhalten oder instand gestellt werden, solange das betroffene Ufer respektive das Bauwerk weiterhin belastet ist. Der Buhnenkopf einer überströmbaren Buhne ist so weit vom Ufer entfernt, dass er für Unterhaltsarbeiten höchstens bei Niederwasser über den Buhnenrücken und teilweise nicht mal dann erreicht werden kann.

Lehren für die Bemessung

Die Fundation ist auf die maximalen errechneten Kolktiefen auszulegen. Ist eine Verbauung auf die notwendige Tiefe aus technischen Gründen nicht möglich, sind je nach Differenz eine oder auch zwei Reihen an Vorlageblöcken vorzusehen.

Eine Neigung der Oberstromseite der Buhnen von 1:1 (45 °) hat sich als zu steil erwiesen. Der gewünschte Effekt der Selbststabilisierung durch Nachrutschen des Vorlageblocks in den Kolk ist nicht eingetreten, es scheint die gesamte Oberstromseite in den Kolk abgerutscht zu sein.

Durch die steile Ausführung der Oberstromseite wird ein grösserer Anteil des Abflusses als Widerwasser an das Ufer gelenkt, als dies bei einer flacheren Ausführung der Fall wäre. Die stärkeren Widerwasserströmungen wiederum verursachen tiefere Kolke in den Buhnenfeldern. Bei einer flacheren Oberstromseite vergrössert sich der Abflussanteil, der über den Buhnenrücken strömt, was zu einer Entlastung der Ufer im Oberwasser der Buhnen führt.

Ausblick

Damit die Erfahrungen aus der Hunzigenau bei Bedarf auch auf andere Abschnitte der Aare übertragen werden können, wurden die Buhnennormalien entsprechend angepasst. Anpassungen wurden für die folgenden Bauwerksteile vorgenommen:

- Neigung Oberstromseite: flachere Ausführung
- Buhnenfuss: wird näher zum Ufer gezogen
- Fundationstiefe: die technisch machbare Verbauungstiefe ist erreicht, daher wird eine zweite Blockvorlagereihe vorgeschlagen
- Buhnenmantel: Blöcke werden über den ganzen Mantel zweilagig aufgebaut

Die Folgen dieser Anpassung sind vielseitig. So werden aufgrund der massiveren Ausführung der Buhnen mehr Blöcke benötigt, was zu einer Verteuerung des Bauwerks führt. Je nach Verlauf des Gewässers sind die kurzen und langen Buhnen so nahe beieinander anzuordnen, dass die Blöcke im Bereich der Fundation aneinander anschliessen und dadurch die Sohle lokal durchgehend verbaut ist. Es ist allerdings davon auszugehen, dass der Verbau auf der Höhe der Fundation meistens eingekiest ist und das Substrat dem einer unverbauten Sohle entspricht.

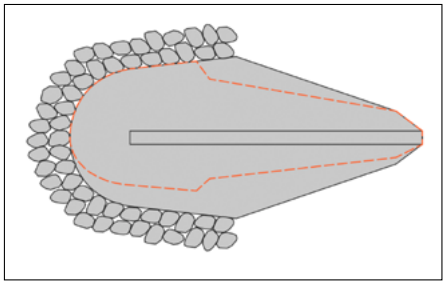

Bild 22: Situation der überarbeiteten Buhnennormalie im Vergleich zur eingebauten Buhne (orange gestrichelt).

7. Dank

Der Oberingenieurkreis II hat uns einerseits mit der Projektierung und Begleitung der Ausführung des Uferschutzes betraut und uns andererseits durch die Beauftragung von verschiedenen Monitorings am gleichen Objekt die Chance gegeben, kritische Punkte in der Dimensionierung zu erkennen und die ablaufenden Prozesse besser zu verstehen.

Quellen:

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wasser (2021): Die erforderliche Geschiebefracht. Fachbericht zum Modul «Geschiebehaushalt – Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Flussbau AG SAH.

Hunzinger, Lukas M. (1998): Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung; Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich.

Mende, Matthias (2014): Naturnaher Uferschutz mit Lenkbuhnen – Grundlagen, Analytik und Bemessung. Dissertation an der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Tiefbauamt des Kantons Bern, OIK II und Gemeinden. Nachhaltiger Hochwasserschutz Aare Thun-Bern, Technischer Bericht mit Kostenschätzung. Stand vor Genehmigung. aarewasser (Hunziker, Zarn & Partner, Kellerhals + Haefeli AG, Gerber Raumplanung, BHP Raumplan AG, Basler & Hofmann West AG, Geobau Ingenieure AG, Bührer + Dällenbach Ingenieure AG, HYDRA, punctowald, KARCH, FloraConsult, Tiefbauamt Kanton Bern OIK II, naturaqua PBK, Impuls AG Wald Landschaft Naturgefahren, CSD Ingenieure AG, Egger Kommunikation, TBF + Partner AG), Bern, 31.5.2012.

Zarn Benno, (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich.

Autorinnen und Autoren:

Nina Ryser, Flussbau AG SAH, nina.ryser@flussbau.ch

Lukas Hunzinger, Flussbau AG SAH, lukas.hunzinger@flussbau.ch

Silvia Hunkeler, Tiefbauamt des Kantons Bern, silvia.hunkeler@be.ch