

# Hydroabrasionsbeurteilung einer Ultra-Hochleistungs-Faserbetonsohle mittels Feldmessung und Abrasionsmodell

*Nevin Cracknell, Ismail Albayrak, Adriano Lais, Robert Boes und Kerstin Wassmann*

## Zusammenfassung

Hydraulische Komponenten wasserbaulicher Anlagen sind besonders dann von hydroabrasivem Verschleiss betroffen, wenn in der Strömung Sedimente aus hartkörnigem Material bei hohen Fließgeschwindigkeiten auf die Berandung einwirken. Die Sohle von Sedimentumleitstollen oder Wehren von Flussstauhaltungen ist daher speziell durch hydroabrasiven Verschleiß gefährdet, da sie hauptsächlich bei Hochwasser und dadurch bei generell hohem Geschiebetrieb und hohen Sohlenschubspannungen betrieben werden.

Im Auftrag der Holcim AG überwachte die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich die Abrasion in einem Tiefauslass der Wehranlage Matteschwelle an der Aare in Bern, der nach Jahren massiver Hydroabrasionsschäden mit einem Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) der Leistungsklasse UB gemäss SIA-Merkblatt 2052 (2016) saniert worden war. Dieser UHFB weist die höchste einachsiale Zugfestigkeit bei gleichzeitig hohem Abrasionswiderstand innerhalb der UHFB-Betonsorten auf. Für das Abrasionsmonitoring wurde die Sohle des Tiefauslasses mittels 3D-Laserscan in einem Zeitabstand von fünf Jahren vermessen und der Abrasionsabtrag erfasst.

Der Beitrag stellt die Resultate und Erkenntnisse dieser Messkampagne dar und geht auf die in der vergangenen Dekade an der VAW mittels Labor- und Feldversuchen entwickelten mechanistischen Abrasionsmodelle ein.

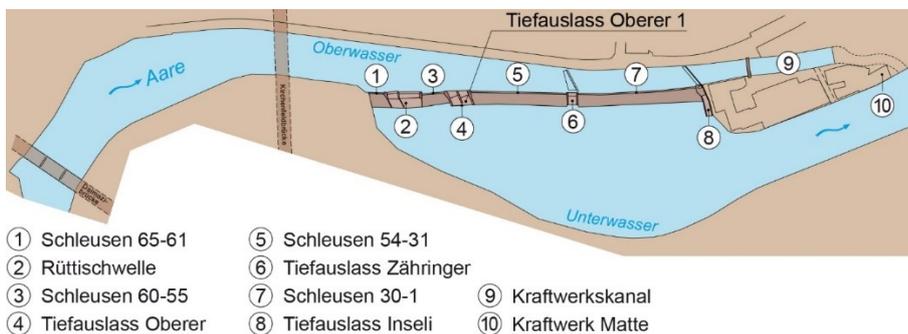
Der am UHFB beobachtete moderate hydroabrasive Verschleiss im schräg angeströmten Tiefauslass ist auf einen Kurveneffekt zurückzuführen, der das von der Aare transportierte Geschiebe konzentriert auf der Kurveninnenseite und damit entlang des rechten Wehrpfeilers des Tiefauslasses abführt. Weder stellten sich Abrasionsschäden im zentralen Bereich des Tiefauslasses, noch eine Abrasionsrinne entlang des linken Wehrpfeilers ein. Trotz dieses im Vergleich zu Sedimentumleitstollen (SBT) «atypischen» Abrasionsmusters konnte eine Analogie zur Berechnung der flächengemittelten Abrasionstiefe  $A$  und der maximalen Abrasionstiefe  $A_{max}$  im Bereich der wandnahen Abrasionsrinne in Anwendung des mechanistischen Abrasionsmodells von Auel et al. (2017) gefunden werden. Mit diesem angepassten Verfahren und den getroffenen Annahmen zum Wehrbetrieb und zur Geschiebefracht lässt sich die gemessene, wandnahe mittlere jährliche Abrasionsrate von 0.7 mm/a bestimmen. Mit dieser Arbeit wird den planenden Ingenieurinnen und Ingenieuren ein Instrument an die Hand gegeben, Abrasionsraten bei ähnlich konzipierten Anlagen abzuschätzen.

## 1 Einführung

Das Unternehmen Energie Wasser Bern (ewb) betreibt an der Aare das Kraftwerk Matte in der Stadt Bern. Zur Kraftwerksanlage gehört die Wehranlage Matteschwelle, der eine Schlüsselfunktion für die Hochwasserregulierung und den Sedimenthaushalt in der Aare zukommt. Die Anlage

der Matteschwelle und das Kraftwerk Matte am Ende des Kraftwerkkanals sind in Abb. 1 dargestellt. Die Matteschwelle ist ca. 350 m lang, ermöglicht die seitliche Entlastung des Wassers aus dem Kraftwerkskanal (Seitenentlastung) und besteht aus vier Schleusen, der Rüttischwelle und den drei Tiefauslässen Oberer, Zähringer und Inseli.

Bei Zuflüssen von über 300 - 350 m<sup>3</sup>/s wird der Kraftwerksbetrieb eingestellt und die Rüttischwelle sowie die Tiefauslässe Oberer, Zähringer und Inseli geöffnet. Bei höherem Abfluss müssen die 4 m breiten Tafelschützen der Schleusen manuell bedient werden. Vor den beiden Tiefauslässen Zähringer und Inseli sind Kiesabweiser quer über den Oberwasserkanal angeordnet. Diese sollen das von der Aare transportierte Geschiebe durch die Tiefauslässe ableiten und so eine Verlandung des Kraftwerkskanals verhindern. Die Drucksegmentschützen der beiden Auslässe 1 und 2 des Tiefauslasses Oberer werden für die automatische Feinregulierung des Oberwasserpegels genutzt, der auf 500.30 m ü.M. gehalten wird.



**Abb. 1** Matteschwelle Bern mit den verschiedenen Betriebsorganen und dem KW Matte. Der Tiefauslass Oberer 1 bei ④ steht im Fokus dieser Untersuchung

Ein grosser Teil des Schwellentischs besteht aus einer Holzabdeckung aus Lärchenplanken, aber auch Basaltpflasterungen (Abb. 2a) und verschiedene Betone sind zum Schutz gegen Hydroabrasion verbaut. Dennoch erfuhr die Matteschwelle über die Jahre immer wieder signifikante Schäden infolge hydroabrasiven Verschleisses. Besonders der Tiefauslass Oberer 1 wird durch hydroabrasiven Verschleiss stark beansprucht (Abb. 2a), da gemäss ewb mehr Geschiebe über jenen Tiefauslass abgeleitet wird als über die anderen. Im Jahr 2015 wurde daher die Sohle des Tiefauslasses Oberer 1 mit einem Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) instandgesetzt (Abb. 2b). Der Lieferant des Betons, die Holcim (Schweiz) AG, hatte daraufhin die VAW beauftragt, das Verhalten des UHFB zu überwachen und die Entwicklung der Abnutzung zu dokumentieren.



**Abb. 2** Tiefauslass Oberer 1 der Matteschwelle: a) Hydroabrasiver Verschleiss der Sohle im wandnahen Bereich des rechten Wehrpfeilers. Initial herausgeschlagene Schmelzbasaltplatten förderten die Ausdehnung des Schadens (Quelle: ewb); b) sanierte Sohle aus UHFB (Aufnahme während Referenzvermessung im März 2017)

## 2 Methodik und Abrasionsmodell

Die VAW setzte ein 3D-Laserscanning ein, um den Materialabtrag der Sohle des Tiefauslasses Oberer 1 auf der Basis einer Referenzmessung im März 2017 und einer Folgemessung 5 Jahre später im März 2022 zu erfassen. Die hochaufgelösten Sohlentopografien stellen das Abrasionsmuster räumlich dar. Zur Analyse wurde u.a. das mechanistische Abrasionsmodell von Auel et al. (2017) hinzugezogen, das an der VAW mittels Labor- und Feldmessungen entwickelt wurde.

### 2.1 Messtechnik und Registrierungsfehler

Für das Abrasionsmonitoring kam ein 3D-Laserscanner zum Einsatz (Modell: Leica ScanStation P15). Die räumliche Auflösung einer aufgenommenen 3D-Punktwolke beträgt 3 mm x 3 mm innerhalb eines radialen Abstands von 10 m. Die Genauigkeit der 3D-Position einer Einzelmessung ist gemäss Herstellerangabe 3 mm bei einer Messdistanz von 40 m. Damit 3D-Punktwolken aus verschiedenen Perspektiven zusammengefügt und georeferenziert werden konnten, waren schwarz-weiße Zielmarken (*Targets*) im Blickfeld des Laserscanners platziert. Diese *Targets* wurden mittels elektronischem Tachymeter (Modell: Leica FlexLine TS02) über bekannte Fixpunkte der amtlichen Vermessung ins Landeskoordinatensystem eingemessen. Die Genauigkeit der Streckenmessung beträgt 1.5 mm +2 mm/1000 m. Die Genauigkeit der aufgenommenen Sohlenlage des UHFB hängt also von mehreren Faktoren ab und wird hier als Registrierungsfehler der 3D-Punktwolken von ±2 mm angegeben.

Für die Bestimmung der lokalen Abrasionstiefen des UHFB wurden die Laserscan-Punktwolken aus den Jahren 2017 und 2022 auf einem 1 cm x 1 cm Raster gemittelt und deren Differenz gebildet (Abschn. 4.2). Die Änderung der gerasterten Höhendaten entspricht dem lokalen Abrasionsabtrag  $\Delta z$ . Die Fortpflanzung des Registrierungsfehlers eines Laserscans von ±2 mm führt infolge der Subtraktion der beiden Geländemodellen zu einem maximalen Fehler der ermittelten, lokalen Abrasionstiefen  $\Delta z$  von ±4 mm. Der Mittelwert über die gesamte Fläche ergibt den mittleren Abrasionsabtrag  $A$ , der in der Zeit zwischen den beiden Messungen entstand.

### 2.2 Abrasionsmodell

Für Abrasionsabschätzungen in Sedimentumleitstollen (SBT) schlagen Auel et al. (2017) folgende Gleichung für die Bestimmung der vertikalen Abrasionsrate  $A_r$  in m/s vor:

$$A_r = \frac{Y_M}{k_v \cdot f_{st}^2} \frac{(s-1)g}{230} q_s \left( 1 - \frac{q_s}{q_s^*} \right) \quad [1]$$

wobei  $Y_M$ : Elastizitätsmodul [N/m<sup>2</sup>],  $k_v$ : Abrasionskoeffizient [-],  $f_{st}$ : Spaltzugfestigkeit [N/m<sup>2</sup>],  $s$ : Dichteverhältnis Sediment zu Wasser ( $s=2.65$ ),  $g$ : Gravitationskonstante, 9.81 m/s<sup>2</sup>,  $q_s$ : spezifische Geschiebetransportrate [kg/(s·m)] und  $q_s^*$ : spez. Geschiebetransportkapazität [kg/(s·m)].

Nebst den materialspezifischen Faktoren Elastizitätsmodul  $Y_M$  und Spaltzugfestigkeit  $f_{st}$  fließen auch die spezifische Geschiebetransportrate  $q_s$  und -kapazität  $q_s^*$  als Eingangsparameter in die Abschätzung ein. Der Term  $(1 - q_s/q_s^*)$  in Gl. [1] repräsentiert den „tool and cover effect“ und gibt den Anteil der freiliegenden, der Abrasion ausgesetzten Oberfläche der Sohle an. Dabei kann der Term Werte innerhalb von 0 bis 1 annehmen: Bei hohen spezifischen Sedimenttransportraten  $q_s$  im Bereich der spezifischen Geschiebetransportkapazität  $q_s^*$  ist die Oberfläche durch eine Sedimentschicht vor hydroabrasiven Einwirkungen geschützt, während die Oberfläche bei tiefen spezifischen Sedimenttransportraten größtenteils freiliegt und somit der Hydroabrasion ausge-

setzt ist. In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass die spezifische Sedimenttransportkapazität  $q_s^*$  die spezifische Sedimenttransportrate  $q_s$  um Größenordnungen übersteigt, sodass der Term  $1 - q_s/q_s^*$  gegen 1 strebt.

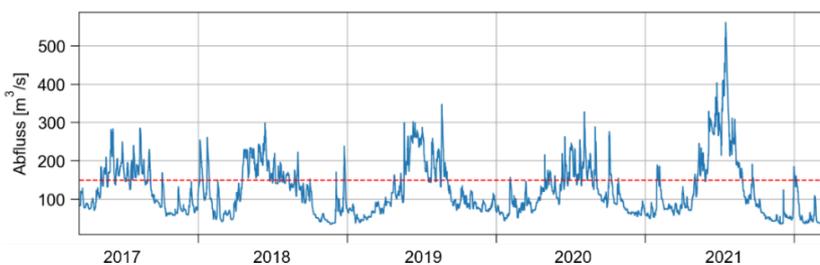
Ein weiterer wesentlicher Parameter für die Abrasionsabschätzung ist der Abrasionskoeffizient  $k_v$ . Auel *et al.* (2017) bestimmten  $k_v$  basierend auf Abrasionsdaten aus der Literatur sowie von Feldmessungen an SBT. Sie stellten fest, dass  $k_v$  mit steigender Materialzugfestigkeit  $f_t$  zunimmt und sich für Beton und Stein mit  $f_t > 1$  MPa zu stabilisieren scheint. Für Beton empfehlen die Autoren einen Abrasionskoeffizienten von  $k_v \approx 10^5$  für  $f_t > 1$  MPa. Für den SBT Asahi in Japan wurde ein  $k_v = (1.9 \pm 0.7) \cdot 10^5$  ermittelt. Diese Werte stimmen gut mit den Ergebnissen von *in-situ* Versuchen in zwei Schweizer SBT, Pfaffensprung und Runcahez überein (Müller-Hagmann *et al.*, 2020).

### 3 Grundlagen

#### 3.1 Geschiebefracht und Abfluss

Unterhalb der Matteschwelle wird ein Großteil des Geschiebes abgelagert, das die Aare bei Hochwasser durch die Matteschwelle abführt. Diese Ablagerungen werden periodisch ausgebagert. Zwischen der Referenz- und der Folgemessung 2022 wurde gemäss Betreiber ein loses Geschiebevolumen von rund 66'900 m<sup>3</sup> im Unterwasser der Matteschwelle entnommen, was unter Annahme einer Ablagerungsdichte von 1.85 t/m<sup>3</sup> einer gravimetrischen Geschiebefracht von  $M_s = 123'765$  t entspricht. Diese Fracht passt mit im Mittel rund 24'750 t/a gut ins langjährige Mittel von 29'150 t/a gemäss einer Geschiebehaushaltsstudie (Flussbau AG, 2016).

Die Geschiebetransportkörper passieren bei moderaten Hochwassern die Schleusen 65-55 und die Rüttischwelle unter der Schwellenkronen (Abb. 1) und werden hauptsächlich durch den ersten Tiefauslass, den Tiefauslass Oberer, ins Unterwasser der Matteschwelle abgeleitet. Es wird angenommen, dass dabei die Geschiebefracht hälftig auf die Tiefauslässe Oberer 1 und 2 aufgeteilt wird. D.h., eine Geschiebefracht  $M_s = 61'883$  t wurde in der Zeitperiode von 2017 – 2022 durch den Tiefauslass Oberer 1 transportiert. Die hydrometrische Messstation Bern Schönau des Schweizerischen Bundesamtes für Umwelt liegt ca. 2 km oberstrom der Matteschwelle und bietet eine geeignete Datengrundlage zur Abschätzung der Betriebszeit  $t_b$ , bei der Geschiebe durch den Tiefauslass Oberer abgeleitet wurde (Abb. 3). Demnach belastete Geschiebematerial die Sohle des Tiefauslasses Oberer während  $t_b = 12'888$  h in der Periode zwischen der Referenz- und der Folgemessung (Geschiebetrieb ab  $Q > 150$  m<sup>3</sup>/s). Die spezifische Geschiebetransportrate  $q_s = M_s/(b \cdot t_b)$  bestimmt sich damit zu  $q_s = 0.157$  kg/(s·m), wobei die Breite des Tiefauslasses Oberer 1  $b = 8.5$  m beträgt.



**Abb. 3** Abflussganglinie der Aare in stündlicher Auflösung bei der Messstelle Bern, Schönau des Schweizerischen Bundesamtes für Umwelt zwischen der Referenz- und der Folgemessung, die im März der Jahre 2017 und 2022 stattfanden. Abflüsse oberhalb der rotgestrichelten Linie ( $Q > 150$  m<sup>3</sup>/s) sind geschieberelevant

### 3.2 Materialeigenschaften Ultrahochleistungs-Faserbeton

Für die Verstärkung der Sohle des Tiefauslasses Oberer 1 wurde ein UHFB der Leistungsklasse UB gemäss SIA-Merkblatt 2052 (2016) ausgewählt. Er weist die höchste einachsiale Zugfestigkeit bei gleichzeitig hohem Abrasionswiderstand innerhalb der UHFB-Betonsorten auf. Damit unterscheidet er sich deutlich von herkömmlichen faserverstärkten und hochfesten Betonen. Beim Einbau wurde in Erwartung eines hydroabrasiven Verschleißes die Schichtstärke von 30 mm auf 60 mm erhöht, um eine möglichst lange interventionsfreie Liegezeit auf dem Wehrtisch zu gewährleisten. Die Spaltzugfestigkeit  $f_{st}$  und der Elastizitätsmodul  $Y_M$  sind Eingangsparameter für die Bestimmung der Abrasionsrate  $A_r$ , Gl. [1]. Die Betoneigenschaften des UHFB sind dem Produktdatenblatt der Holcim (Schweiz) AG entnommen. Die Zugfestigkeit  $f_t$  ist mit 13.6 MPa angegeben, woraus sich die Spaltzugfestigkeit  $f_{st}$  nach Bamforth et al. (2008) zu  $f_{st} = 15.1$  MPa abschätzen lässt. Der Elastizitätsmodul wurde mit  $Y_M = 47.9$  GPa erfasst.

## 4 Abrasionsmonitoring

Die Referenz- und Folgemessung fanden beide bei trockener und schöner Witterung statt. Vorbereitend wurde die Sohle vor den Laseraufnahmen jeweils von ewb mittels Hochdruckreiniger von Ablagerungen befreit und gereinigt.

### 4.1 Beobachtungen und Strömungsstrukturen

Entlang des rechten Wehrpfeilers ist eine Abrasionsrinne durchsetzt mit Schlaglöchern zu beobachten (Abb. 4a). Am Ende des rechten Wehrpfeilers im Bereich der Pfeilernase wurden Schmelzbasaltplatten untergraben und abgetragen. Außer dieser Rinne sind visuell keine Schäden an der Betonsohle feststellbar.

Der Tiefauslass Oberer zweigt seitlich ab und wird folglich schräg zur Hauptströmungsrichtung im Oberwasserkanal des KW Matte angeströmt. Diese Schräganströmung verursacht eine Strömungsablösung am Pfeilerkopf des bezogen auf den Tiefauslass Oberer 1 rechten Wehrpfeilers (Abb. 4b). Das Eindrehen der Strömung in den Tiefauslass Oberer 1 erfolgt auf einer Kurvenbahn. Die Strömung ist in der Abzweigung dreidimensional und weist ähnliche Eigenschaften wie die Strömung in einer Flussbiegung auf (Neary & Odgaard, 1993). Die an der Oberfläche eintretende Strömung hat einen erheblichen Impuls in Richtung der Hauptkanalströmung, sodass der Bereich der Ablösung resp. die Fliehkraft der Drehbewegung an der Oberfläche größer als an der Sohle ist, wo das Wasser langsamer abfließt. Diese Abweichung erzeugt eine sekundäre Zirkulationsströmung, eine sogenannte Sekundärströmung erster Art im Tiefauslass Oberer 1.



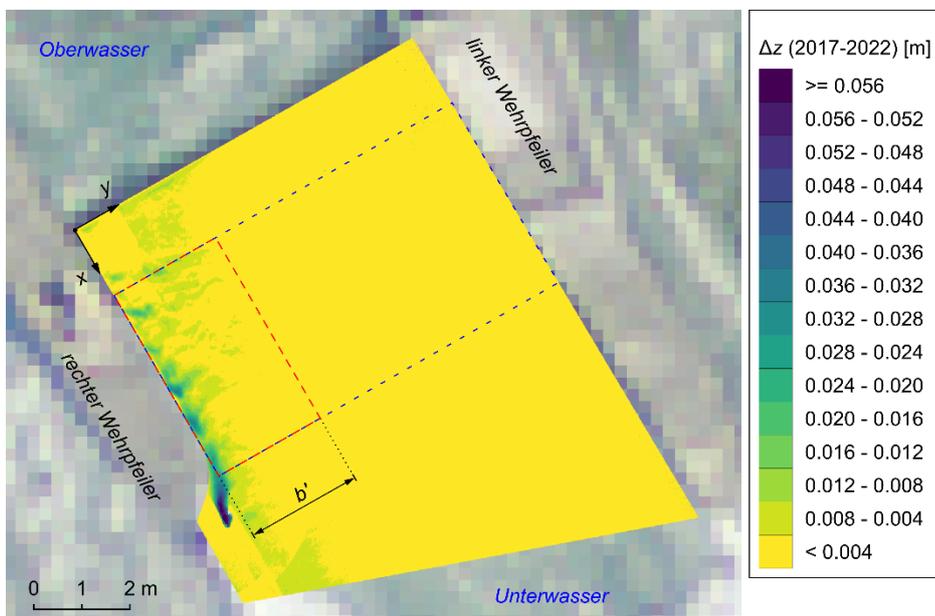
**Abb. 4** a) Abrasionsrinne im UHFB im wandnahen Bereich zum orographisch rechten Wehrpfeiler des Tiefauslasses Oberer 1, Jahr 2022; b) Strömungsablösung am Pfeilerkopf bei komplett geöffneter Drucksegmentschütze

## 4.2 Hydroabrasiver Verschleiss der Sohle zwischen den Jahren 2017 und 2022

Die Änderungen der Höhenlagen  $\Delta z$  infolge des hydroabrasiven Verschleißes des UHFB sind dem Differenzplot in Abb. 5 zu entnehmen. Der gewählte kleinste Anzeigebereich auf der Farbskala in Abb. 5 beträgt  $\Delta z < 4$  mm und umfasst demnach sämtliche Werte innerhalb der Messgenauigkeit.

Deutlich ist Abrasionsabtrag rechtsseitig im Tiefauslass Oberer 1 erkennbar. Anfänglich ist der Abrasionsabtrag moderat und umfasst in der Querrichtung einen grösseren Bereich. Die von Verschleiß betroffene Fläche wird in Fließrichtung schmaler und geht gegen das Pfeilerende hin über in eine Abrasionsrinne entlang des rechten Pfeilers (s.a. Abb. 5a). Das Abrasionsmuster zeigt mehrere Schlaglöcher in der Rinne, die darauf hindeuten, dass sich die Abrasion ungleichmäßig ausbreitet (Demiral Yüzügüllü, 2021). Die lokalen Abrasionstiefen liegen größtenteils unter 4 mm (gelbe Fläche) und weisen somit keine signifikante Abrasion in Anbetracht des Fehlerbereichs auf.

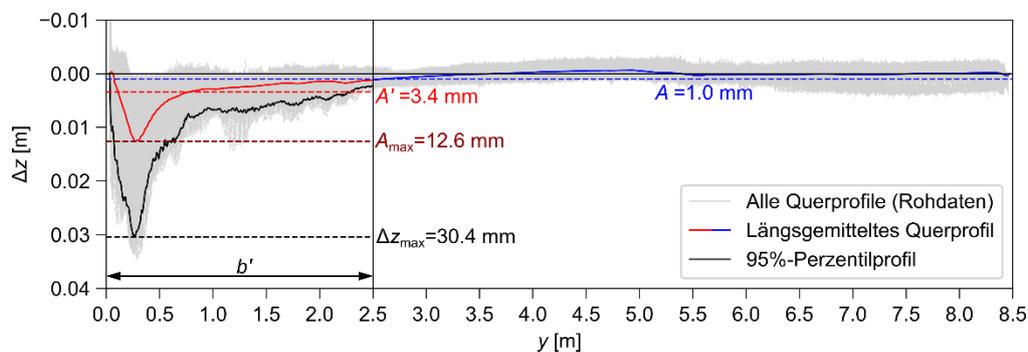
Zusätzlich zum Differenzplot wurde die flächengemittelte Abrasionstiefe  $A$ , die maximale Abrasionstiefe  $A_{max}$  und das Verhältnis von maximaler Abrasionstiefe zum Flächenmittelwert  $A_{max}/A$  für die in Abb. 5 blau umrandete Fläche bestimmt (Tab. 1). Dafür wurde ein längsgemittelttes Querschnittsprofil erstellt (Abb. 7). Die flächengemittelte Abrasionstiefe liegt mit  $A = 1.0$  mm innerhalb des Messfehlerbereichs. Die maximale Abrasionstiefe  $A_{max}$  im längsgemittelten Querprofil beträgt  $A_{max} = 12.6$  mm. Verglichen mit  $A_{max}$  weisen die erwähnten Schlaglöcher lokal höhere Abrasionstiefen von  $\Delta z_{max} = 30.4$  mm auf (tiefster Punkt des 95%-Perzentilprofils über alle Querprofile in Abb. 6). Die blau umrandete Fläche grenzt den Bereich am Ende des rechten Wehrpfeilers aus, der durch Schmelzbasaltplatten geschützt war. Dieser Bereich ist demnach nicht repräsentativ für das Verhalten des UHFB gegen Abrasion und wurde nicht in die Datenauswertung miteinbezogen.



**Abb. 5** Abrasionsabtrag  $\Delta z$  im Tiefauslass Oberer 1 zwischen den Jahren 2017 und 2022. Die blau umrandete Fläche zeigt die «region of interest» über die gesamte Breite  $b$ , die rot umrandete bezieht sich auf die reduzierte Breite  $b'$  (Quelle Hintergrund: swisstopo)

**Tab. 1** Flächenmittelwert der Abrasionstiefe  $A$ , maximale längsgemittelte Abrasionstiefe  $A_{max}$ , Verhältnis  $A_{max}/A$ , Abrasionsrate  $A_r$ , maximale lokale Abrasionstiefe  $\Delta z_{max}$  und Verhältnis  $\Delta z_{max}/A$

$A$ [mm]	$A_{max}$ [mm]	$A_{max}/A$ [-]	$A_r$ [ $10^{-11}$ m/s]	$\Delta z_{max}$ [mm]	$\Delta z_{max}/A$ [-]
1.0	12.6	12.6	2.2	30.4	30.4



**Abb. 6** Querprofile und längsgemitteltes Querprofil des Abrasionsabtrags  $\Delta z$  im Tiefauslass Oberer 1 zwischen den Jahren 2017 und 2022 im Bereich der blau umrandeten Fläche (vgl. Abb. 5). Abrasionsraten  $A$  bezogen auf  $b$  (blau) und  $A'$  bezogen auf  $b'$  (rot) sind angegeben

## 5 Analyse und angepasstes Verfahren

Zur Analyse der Abrasion wurde das mechanistische Modell nach Auel et al. (2017), sowie die neuesten Erkenntnisse von Demiral Yüzügüllü (2021) herangezogen. In Bezug auf SBTs sind die Sekundärströmungen der ersten und zweiten Art von besonderem Interesse. Die erste Art tritt in Kanalkrümmungen auf (Abschn. 4.1), wo eine durch Zentripetalkräfte induzierte Spiralströmung eine Konzentration des Sedimenttransports an der Innenseite der Krümmung bewirkt (Müller-Hagmann et al., 2020). In offenen geraden Kanälen mit Abflusstiefenverhältnissen  $b/h < 4 \dots 5$  wird die Strömung als schmale offene Kanalströmung bezeichnet, und es treten Sekundärströmungen zweiter Art auf (Demiral Yüzügüllü, 2021). Aufgrund der Rauigkeit der Seitenwände resp. der Inhomogenität und Anisotropie der Turbulenz treten im Querprofil abwechselnd Auf- und Abwärtsströmungen auf, die zu niedrigeren bzw. höheren Scherspannungszonen an der Sohle führen. Bei kleinen Abflusstiefenverhältnissen  $b/h < 2.3$  werden mittige Abrasionsrinnen beobachtet, wohingegen zwei dominante Abrasionsrinnen in Wandnähe bei größeren Abflusstiefenverhältnissen auftreten (Auel, 2014; Demiral Yüzügüllü, 2021). Zu den typischen Abrasionsmustern gehören bei größeren Abflusstiefenverhältnissen zusätzlich zufällig über die Gerinnebreite verteilte Schlaglöcher, die aufgrund von Sprungbewegungen des transportierten Sediments in der turbulenten Strömung entstehen. Der Wandeffekt ist bei  $b/h > 4 \dots 5$  nur noch gering und es entwickelt sich, speziell bei idealisierten Laborbedingungen, ein 2D-Strömungsfeld im zentralen Abflussbereich.

Desweiteren sind in der Literatur verschiedene mittlere Verhältnisse von  $A_{max}/A$  zwischen 1.6...2.2 nach Müller-Hagmann et al. (2020) und  $A_{max}/A = 2.6$  nach Demiral Yüzügüllü (2021) angegeben.  $A_{max}$  wird als charakteristisches Mass zur Abschätzung der Tiefe der Abrasionsrinnen herangezogen.

Die Beobachtungen an der Matteschwelle (Abschn. 4.2) weichen von den charakteristischen Abrasionsmustern in offenen geraden Kanälen ab, die im Wesentlichen an die Sekundärströmung

der zweiten Art gekoppelt sind. Das Abflusstiefenverhältnis im Tiefauslass Oberer 1 ist  $b/h \approx 11$  mit  $h \approx 0.8$  m. Bei diesem Abflusstiefenverhältnis ist bei über die Breite  $b$  homogen verteiltem Geschiebeeintrag zu erwarten, dass sich wandnahe Abrasionsrinnen und über die Breite zufällig verteilte Schlaglöcher bilden (s.o.). Die Schlaglöcher im zentralen Bereich sowie die Abrasionsrinne entlang des linken Wehrpfeilers fehlen jedoch. Wendet man Gl. [1] an und setzt die Eingangsparameter ein (s. Kap. 2 und 3), so ergibt sich ein ähnlicher Flächenmittelwert  $A = 0.6 \dots 1.1$  mm, hingegen wird  $A_{max}$  resp. das charakteristische Maß für die Tiefe der Abrasionsrinne mit dem Relativwert  $A_{max}/A = 2.6$  deutlich unterschätzt (vgl. Tab. 2 mit Tab. 1). Der Grund für diese markante Abweichung ist die starke Gewichtung der großen Fläche ohne signifikante Abrasionsschäden (Abb. 6 und Abb. 7).

**Tab. 2** Abrasionsrate  $A_r$  nach Auel et al (2017), Abrasionstiefe  $A$  sowie Verhältnis  $A_{max}/A$  nach Demiral (2020) und die daraus abgeleitete maximale Abrasionstiefe  $A_{max}$  für verschiedene Abrasionskoeffizienten  $k_v$

$k_v$ [ $10^5$ ]	$A_r$ [ $10^{-11}$ m/s]	$A$ [mm]	$A_{max}/A$ [-]	$A_{max}$ [mm]
1.9	1.2	0.6	2.6	1.6
1.0	2.3	1.1	2.6	2.8

Eine Erklärung für die Abweichung bieten das beobachtete Strömungsfeld und das Abrasionsmuster. Wie im Abschn. 4.2 dargestellt, löst die Strömung am Pfeilerkopf des rechten Wehrpfeilers ab und es bildet sich eine Sekundärströmung der ersten Art aus. Daher ist im Tiefauslass Oberer 1 eine verhältnismässig größere Konzentration des Sedimenttransports an der Innenseite der Kurve anzunehmen, wozu es jedoch eine gewisse Entwicklungslänge bedarf. Wie das Abrasionsmuster erkennen lässt (Abschn. 4.2), ist davon auszugehen, dass der Kurveneffekt das Geschiebe erst gegen Ende des Pfeilers auf die rechte Seite führt. Der Kurveneffekt bewirkt demnach vice versa, dass auf der Kurvenaußenseite kein Geschiebe transportiert wird, folglich das einwirkende Sediment für den hydroabrasiven Verschleiß fehlt. Der konzentrierte Geschiebedurchgang auf der Innenseite verursacht den konzentriert auf der rechten Seite beobachteten Abtrag der Sohle. Folgend wird ein angepasstes Verfahren vorgestellt, mit der sich die wandnahe Abrasionsrate  $A_r'$  und die maximale Abrasionstiefe  $A_{max}'$  mit den vorgestellten Modellen dennoch abschätzen lässt:

Im Allgemeinen sind bei Bemessungsabflüssen in SBTs die Verhältnisse meist  $b/h < 2$  (Demiral Yüzügüllü, 2020) und somit viel kleiner als beim Grundablass Oberer 1. Die von Auel et al. (2017) entwickelte Gl. [1] ist auch auf Kurvenströmungen anzuwenden, wie Müller-Hagmann et al. (2020) am SBT Pfaffensprung zeigen. Wird bei der Abschätzung der Abrasion am Tiefauslass Oberer 1 die gesamte Breite berücksichtigt, obwohl sich der Geschiebetransport auf die rechte Innenseite konzentriert, so wird die wandnahe Abrasionsrate bei  $b/h \approx 11$  unterschätzt. Um das Abrasionsmodell zweckentsprechend anwenden zu können, wurde die Breite  $b$  in der Berechnung auf die hinsichtlich Geschiebebelastung betroffene Breite  $b'$  reduziert, über welche noch Abrasion stattgefunden hatte ( $b' = 2.5$  m). Dadurch nimmt die spezifische Sedimenttransportrate  $q_s$  in Gl. [1] um den Faktor  $b/b'$  und damit die Abrasionsrate  $A_r'$  im gleichen Verhältnis zu. Mit dem angepassten Modell konnte die wandnahe Abrasion sinnvoller berücksichtigt werden, wobei  $A_{max}$  weiterhin aufgrund des vorhandenen Verhältnisses  $A_{max}/A'$  von 3.7 im Vergleich zu 2.6 unterschätzt wurde (Tab. 3). Die Modellergebnisse passen für  $k_v = 1.1 \cdot 10^5$  bzgl.  $A_r$  und  $A$  mit den Messwerten überein.

**Tab. 3** Abrasionsrate  $A_r'$ , Abrasionstiefen  $A'$  und maximale längsgemittelte Abrasionstiefe  $A_{max}'$  für verschiedene Abrasionskoeffizienten  $k_v$  berechnet nach angepasstem Verfahren in Anwendung der Gl. [1] mit  $A_{max}/A = 2.6$  sowie abgeleitet aus dem Messdatensatz innerhalb des wandnahen Bereichs bis  $b'$

$k_v$ [10 <sup>5</sup> ]	angepasstes Verfahren			Messdaten im wandnahen Bereich				
	$A_r'$ [10 <sup>-11</sup> m/s]	$A'$ [mm]	$A_{max}'$ [mm]	$A_r$ [10 <sup>-12</sup> m/s]	$A'$ [mm]	$A_{max}$ [mm]	$A_{max}/A'$ [-]	$\Delta z_{max}/A'$ [-]
1.9	4.2	1.9	5.0	7.3	3.4	12.3	3.7	8.8
1.0	7.9	3.7	9.5					

## 6 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Fallstudie konnte die Abrasionsbelastung des Tiefauslasses Oberer 1 der Berner Matteschwelle basierend auf verschiedenen Annahmen mittels Abrasionsmodell grob abgeschätzt und mit den Resultaten der Vermessung verglichen werden. Aufgrund der abweichenden Bedingungen (Schräganströmung des Tiefauslasses), wurde das Abrasionsmodell mit Hilfe eines angepassten Verfahrens angewendet. Dieses angepasste Verfahren, das den Fokus einzig auf den wandnahen Bereich bei  $b'/h \approx 3$  (2.5 m / 0.8 m = 3.1) legt, widerspiegelt die gemessene mittlere Abrasionstiefe  $A'$  und die maximale längsgemittelte Abrasionstiefe  $A_{max}'$  der wandnahen Abrasionsrinne. Es stellt somit eine praxistaugliche Vorgehensweise für Abrasionsabschätzungen der lokal auf der Innenseite eines seitlich abzweigenden Tiefauslasses dar. Die reduzierte Breite kann mit  $b' \approx 3 \cdot h$  angesetzt werden. Die hier aufgezeigten Verhältnisse  $A_{max}/A' = 3.7$  und  $\Delta z_{max}/A' = 8.8$  können zudem zur Abschätzung der interventionsfreien Liegezeit der Sohle im wandnahen Bereich hinzugezogen werden.

Die wandnahe Hydroabrasion des hier untersuchten UHFB schreitet demnach entlang des rechten Wehrpfeilers im Tiefauslass Oberer 1 unter Annahme gleicher Belastungsgrößen künftig mit einer Rate von ca. 0.7 mm pro Jahr fort.

Idealerweise wäre das Abrasionsmonitoring für die Anwendung des Abrasionsmodells nach Auel et al. (2017) oder nach Demiral Yüzüğüllü (2021) um folgende Messgrößen auszudehnen:

- Geschiebedurchgang durch das Wehrfeld *Geophon-Messung*
- Korngrößenverteilung und Mohshärte des Geschiebes *Laboranalyse*
- Schützenöffnung *Schützensteuerung, -regelung*
- Abfluss und Abflusstiefen *Pegel- u. Geschwindigkeitsmessungen*
- Materialkennwerte, Standardtestmethoden:
  - Spaltzugfestigkeit *sog. Brasilianertest, Probekörper D/L = 150 mm/300 mm*
  - Elastizitätsmodul (Young's modulus) *Norm: ASTM C848*

Die Bestimmung der Materialeigenschaften nach Standardmessmethoden ist von entscheidender Bedeutung, da ansonsten der Abrasionskoeffizient  $k_v$  neu kalibriert werden müsste. Die Spaltzugfestigkeit  $f_{st}$  geht quadratisch in Gl. [1] ein und ist damit der sensitivste Parameter. Sie ist am Probekörper direkt zu bestimmen.

## Literatur

- Auel, C. (2014). Flow characteristics, particle motion and invert abrasion in sediment bypass tunnels. *VAW-Mitteilungen*, 229 (R. Boes, Hrsg.). Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW, ETH Zürich.
- Auel, C., Albayrak, I., Sumi, T., & Boes, R. M. (2017). Sediment transport in high-speed flows over a fixed bed: 2. Particle impacts and abrasion prediction. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(9), 1384-1396.
- Bamforth, P. B., Chisholm, D., Gibbs, J., & Harrison, T. (2008). Properties of concrete for use in Eurocode 2: How to optimise the engineering properties of concrete in design to Eurocode 2. *The Concrete Center Report CCIP-029*.
- Demiral Yüzüğüllü, D. (2021). Hydroabrasion at hydraulic structures and steep bedrock rivers. *VAW-Mitteilungen*, 261 (R. Boes, Hrsg.). Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW, ETH Zürich.
- Flussbau AG (2016). Aare Wehr Engehalde – Pegelabsenkung bei Hochwasser. Flussbau AG, 04.08.2016 (unveröffentlicht)
- Müller-Hagmann, M., Albayrak, I., Auel, C., & Boes, R. M. (2020). Field investigation on hydroabrasion in high-speed sediment-laden flows at sediment bypass tunnels. *Water*, 12(2), 469.
- Neary, V. S., & Odgaard, A. J. (1993). Three-dimensional flow structure at open-channel diversions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(11), 1223-1230.
- SIA 2052 (2016). Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) - Baustoffe, Bemessung und Ausführung. Merkblatt Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

## Anschrift der Verfasser

Nevin Cracknell, Dr. Ismail Albayrak, Adriano Lais, Prof. Dr. Robert Boes  
 ETH Zürich  
 Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW  
 Höggerbergstrasse 26, CH-8093 Zürich  
 cracknell@vaw.baug.ethz.ch, albayrak@vaw.baug.ethz.ch, lais@vaw.baug.ethz.ch,  
 boes@vaw.baug.ethz.ch

Dipl.-Ing. Kerstin Wassmann  
 Holcim (Schweiz) AG  
 Customer Solutions & Technical Center, Zementweg 1, CH-5303 Würenlingen  
 kerstin.wassmann@holcim.com