Praxisanleitung für die Planung und Bemessung (Dimensionierung) von Rampen

Version 09.05.2022

INSTITUT FÜR WASSERBAU UND HYDROMETRISCHE PRÜFUNG, 1090 Wien, Severingasse 7
T+43 1 402 68 02, office.iwb@baw.at
BIC BUNDATWW, IBAN AT 95 0100 0000 0506 0409, UID ATU 16284900, DVR 0702439

Diese Seite ist bewusst leer (für doppelseitigen Druck)

Inhaltsverzeichnis

1 Vorbemerkung 4
2 Festlegung der erforderlichen Rampenhöhe 4
3 Bei der Dimensionierung zu beachtende Sonderfälle 6
4 Bemessung einer strukturierten Beckenrampe (Riegelrampe) 7
4.1 Anwendungsbereich, Definitionen 7
4.2 Ablauf der Dimensionierung 8
4.3 Hydraulik 9
4.4 Bemessung Riegel- und Beckensteine 11
4.4.1 Nicht eingestaut 11
Eingestaut 11
5 Beispiele 12
5.1 Beispiel 1 13
5.2 Beispiel 2 16
6 Weitere Bemessungsformeln 19
6.1 Riegelsteinbemessung nach Korecky 19
6.2 Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen 20
7 Nachbettschutz 21
8 Literatur 23

1 Vorbemerkung

Die nachfolgende Zusammenstellung von Formeln für die Hydraulik und Steindimensionierung von strukturierten Beckenrampen (Rampenkonstruktionen aus Riegeln und Becken) sowie weiteren Rampentypen enthält den aktuellen Stand zum Zeitpunkt April 2022. Auf theoretische Hintergründe und Details wird bewusst nur am Rande eingegangen um die Anleitung kurz und übersichtlich zu halten. Tiefer gehende Informationen sind den angegebenen Literaturstellen zu entnehmen.

Aufgrund der Heterogenität der Strömungsverhältnisse auf einer Rampe und der Verwendung des natürlichen Baumaterials Steine (Gestalt der Steine, Lagerung der Einzelsteine) liegen den empirisch abgeleiteten Formeln große Unsicherheiten zu Grunde. Zum Teil sind die Formeln nur anhand weniger Modellversuche entwickelt und dementsprechend wenig abgesichert. Das kann man auch daran erkennen, dass die Anwendung verschiedener Formeln oft eine große Streubreite für die Steingrößen liefert. In kritischen Fällen (hohe Belastung, hohes Schadenspotential, Potential an Materialeinsparung) ist daher nach wie vor der physikalische Modellversuch die zuverlässigste Methode zur Rampenbemessung.

2 Festlegung der erforderlichen Rampenhöhe

Ist die Rampe ein Baustein von Maßnahmen für die Stabilisierung einer Gewässersohle, ergibt sich die Höhe der Rampe aus jener Sohlhöhendifferenz, die mit dem morphologischen Gleichgewichtsgefälle sowie einer Vergrößerung der Lauflänge nicht zu überwinden ist (Abbildung 1). Die Ermittlung des sohlmorphologischen Gleichgewichtsgefälles I_G ist z. B. in Hengl und Stephan (2008) beschrieben. Das sohlmorphologische Gefälle und damit die Rampenhöhe ist abhängig von:

1. Fließquerschnitt des Gewässers,
2. der Hydrologie und
3. dem Geschiebe (sowohl Menge als auch Korngröße).

Falls sich einer dieser drei Punkte im zeitlichen Verlauf ändert (z.B. langfristige Abnahme der Geschiebemenge), ändert sich auch die erforderliche Rampenhöhe. Weiters zu beachten sind die Unsicherheiten in der Ermittlung des sohlmorphologischen Gleichgewichtsgefälles, welches sich auf die Rampenhöhe auswirkt (Abbildung 1).

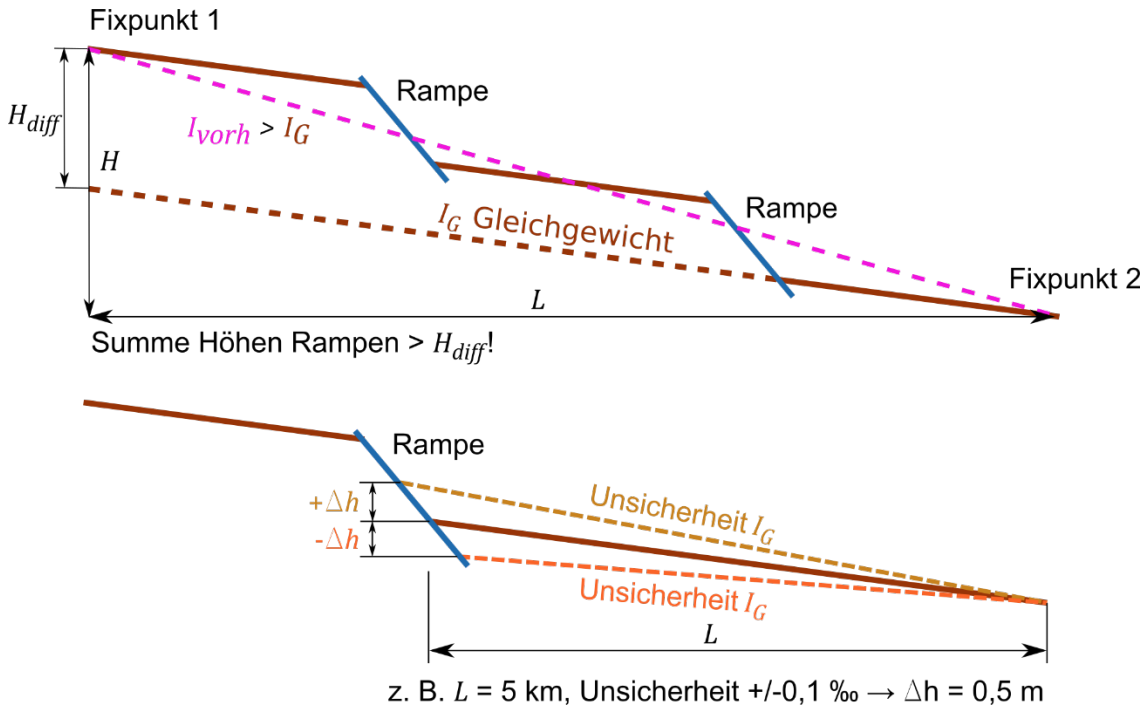

Abbildung 1: Einpassung von Rampen in das Längsprofil eines Gewässer

Durch die Länge des Bauwerks ist die erforderliche Rampenhöhe immer größer als die sich aus dem sohlmorphologischen Gleichgewichtsgefälle ergebende Höhendifferenz Δh_{Sohle}.

Je geringer die Differenz zwischen Rampengefälle I_R und Gefälle der anschließenden Gewässerstrecken I_G ist, desto höher wird das Bauwerk.

Die Höhe der Rampenkrone ist so festzulegen, dass beim bettbildenden Abfluss die Strömung im Oberwasser der Rampe nicht beschleunigt wird und es damit zu Sohlerosion kommt. Falls die Rampe zusätzlich die Gewässersohle heben soll, ist die geplante Sohllage im Oberwasser als Ausgangsniveau für die Festlegung der Wehrhöhe w zu verwenden. Beim bettbildenden Abfluss soll die Energielinie des auf die Rampe zuströmenden Gewässers, die sich aus der Rampenhydraulik ergebende Energielinie genau im Oberwasserprofil schneiden (Abbildung 2).

Falls im Unterwasser der Rampe ein Kolk entstehen kann, ergibt sich daraus ebenfalls eine zusätzliche Höhe Δh_{Kolk}, um eine für Fische nicht zu überwindende Stufe im Wasserspiegel am unteren Ende des Bauwerks zu verhindern.

Die Länge der Rampe L_R sowie deren Höhe H_R können mit den nachstehenden Gleichungen ermittelt werden.

$$L_R \approx (\Delta h_{Sohle} + w) \cdot I_R \cdot [1 + 1/(I_R - I_G)] + L_K \cdot I_G / I_R \quad (1)$$

$$H_R = w + \Delta h_{Sohle} + \Delta h_{Gefälle} + \Delta h_{Kolk} = L_R \cdot I_R \quad (2)$$

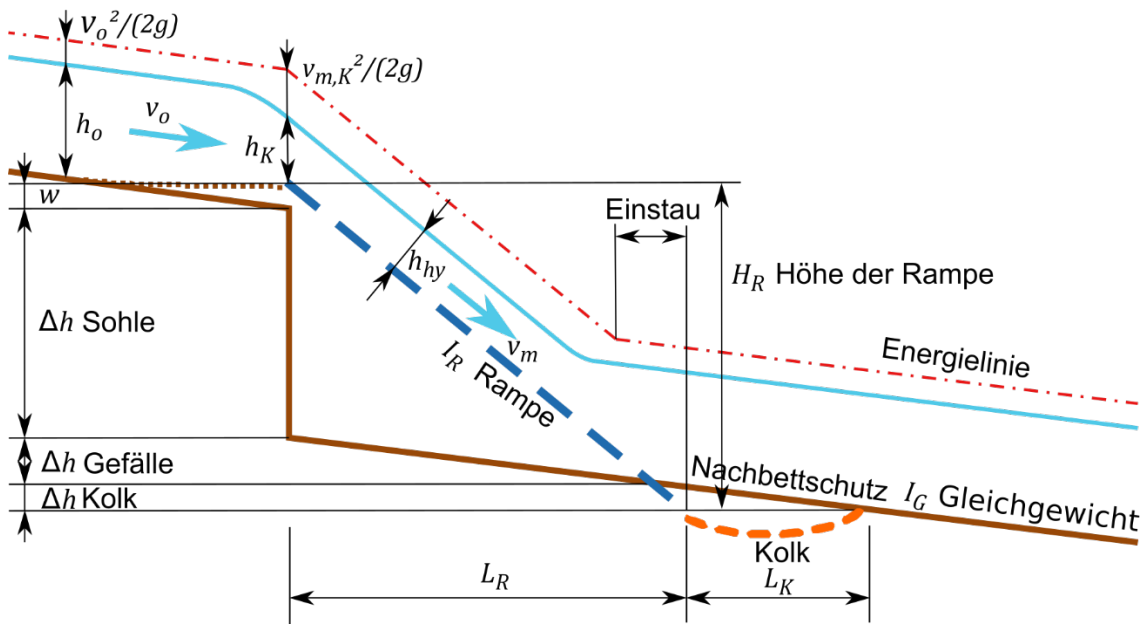

Abbildung 2: Definitionsskizze für die Längen und Höhen einer Rampe

3 Bei der Dimensionierung zu beachtende Sonderfälle

Alle empirischen Bemessungsformeln wurden für im Grundriss gerade verlaufende Rampen mit konstanter Breite und Gefälle sowie über die Breite gleichmäßiger Anströmung entwickelt.

Liegt die Rampe in einer Kurve sind die in Teilen des Querschnitts vorhandenen höheren Belastungen (spezifischer Abfluss, Sohlschubspannungen) bei der Steindimensionierung zu berücksichtigen.

Bei Rampen, die in Fließrichtung breiter werden tritt beschleunigter Abfluss auf und damit ein gegenüber dem Sohlgefälle der Rampe höheres Energieliniengefälle.

Bei Hochwasser und den damit verbundenen großen Fließtiefen im Unterwasser der Rampe kann es sein, dass entweder die gesamte Rampe oder zumindest ein Teil des Bauwerks eingestaut wird. Durch den Einstau sinkt die Belastung auf das Bauwerk (das für die Bemessung maßgebende Energieliniengefälle ist kleiner als das Rampengefälle). Dies ermöglicht unter Umständen kleinere Steine für den Bau zu verwenden.

Praktisch ist der Stabilitätsnachweis sowohl für den Abfluss unmittelbar vor Beginn des Einstaus als auch für die maximale Belastung bei eingestauter Rampe zu führen.

4 Bemessung einer strukturierten Beckenrampe (Riegelrampe)

4.1 Anwendungsbereich, Definitionen

Die in diesem Teilkapitel vorgestellte Methode für die Berechnung der Fließtiefen auf einer Rampe sowie die Festlegung der Steingrößen ist umfassend in Hengl und Stephan (2022a und 2022b) beschrieben. Hier ist nur die Vorgangsweise für die praktische Anwendung dargestellt, ohne auf die Grundlagen dieses empirischen Ansatzes einzugehen.

Diese Methode hat den nachstehenden Anwendungsbereich:

- Gefälle 1 bis 4 % (1:100 bis 1:25)
- Riegelabstand 3,25 bis 15 m (eine Extrapolation für deutlich größere Abstände sollte auf Grund des Aufbaus der Methode möglich sein)
- Die Riegelsteine sind im Ober- und Unterwasser durch Stützsteine der gleichen Größe gesichert (Abbildung 3).

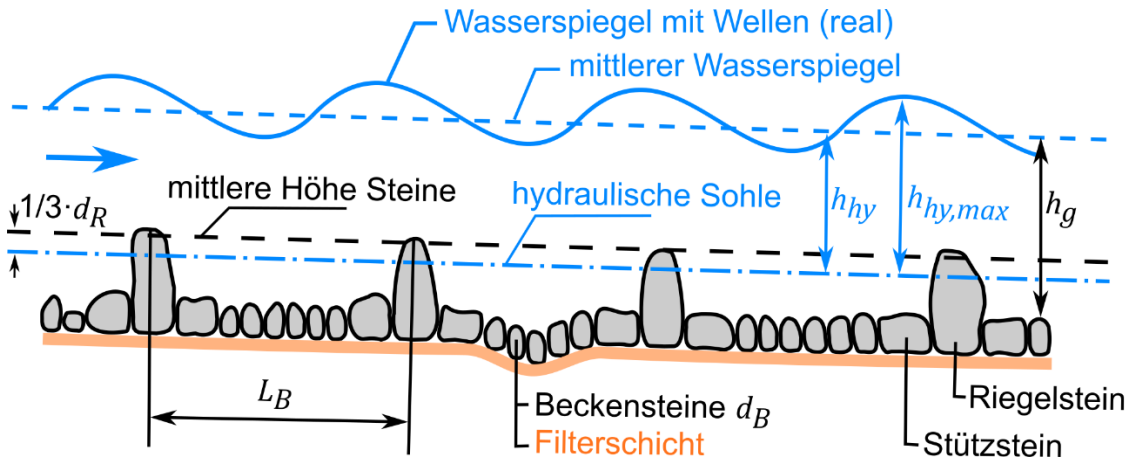

Abbildung 3: Definitionsskizze

Die in der Berechnung verwendeten Durchmesser der Riegelsteine d_R und Beckensteine d_B entsprechen dem sich aus der Masse des Einzelsteins m und der Massendichte ρ_s (z.B. 2 650 kg/m³) ergebenden äquivalenten Kugeldurchmesser.

$$d = \left(\frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho_s}\right)^{1/3} \quad \text{bzw.} \quad m = \frac{d^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_s \tag{3}$$

Die Beckensohle muss nicht eben sein, es können auch muldenförmig vertiefte Becken ausgeführt werden.

Für die Berechnung der Hydraulik (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) wird eine hydraulische Sohle definiert, die um das Maß $d_R/3$ unter der mittleren Höhe der Riegelsteine liegt (Abbildung 3). Alle Fließtiefen beziehen sich auf diese hydraulische Sohle. Da diese Fließtiefen nur Mittelwerte sind und tatsächlich hohe Wellen auftreten können, ist für die Festlegung der Uferhöhen die Energielinie maßgebend.

L_B ist die mittlere Beckenlänge bzw. der mittlere Abstand der Riegelachsen. Bei Rampen mit nicht gerade verlaufenden Riegeln ergibt sich die mittlere Beckenlänge L_B aus der Summe der Riegellängen (ohne Riegel am unteren Ende der Rampe), geteilt durch die Sohlfläche der Rampe.

4.2 Ablauf der Dimensionierung

Praktisch lässt sich die Dimensionierung z. B. in einem Tabellenkalkulationsprogramm einfach umsetzen. Die dafür erforderlichen Zelleneinträge und Tabellen sind nachfolgend dargestellt.

Als Grundlage benötigt werden Zellen für:

- Gefälle der Rampe I_E
- Sohlbreite b_R
- Mittlere Beckenlänge L_B
- Böschungsneigung m
- Rauheit der Böschung (Steindurchmesser d_{90}, oder äquivalente Sandrauheit k oder Strickler-Wert k_{St}
- Bemessungsabfluss Q

Mit weiteren Zelleneinträgen für die geschätzten Steingrößen (Riegel d_R und Becken d_B) wird iterativ die Hydraulik (Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit) ermittelt (siehe 4.3). Falls für den Gewässerabschnitt mit der Rampe bereits eine Wasserspiegelberechnung vorliegt, kann diese Hydraulik für die erste Schätzung der Steingrößen gemäß 4.4 verwendet werden.

Als erste Näherung kann für den Fließwiderstand der Rampe ein Strickler-Wert von 15 $m^{1/3}/s$ angesetzt werden.

Unabhängig von der Schätzung der Steingrößen (zu groß oder zu klein) erhält man die gleiche Lösung, wobei die Beckensteingröße schneller konvergiert als die Riegelsteingröße.

Mit der Hydraulik wird die Schätzung der Steingrößen verbessert (siehe 4.4). Mit den neuen Steingrößen wird wieder die Hydraulik gemäß 4.3 berechnet. Die Schritte Berechnung der Hydraulik und Verbesserung der Steingrößen werden so lange wiederholt bis eine ausreichende Genauigkeit erreicht ist.

Die so erhaltenen Steingrößen sind die auf Grund der auf der Rampe auftretenden Strömungskräfte erforderlichen Dimensionen. Bei kleinen Gewässern und/oder Bemessungsabflüssen, können aus fischökologischen Gründen größere Riegelsteine erforderlich sein, um ausreichende Wassertiefen in den Durchlässen und Becken zu erhalten.

4.3 Hydraulik

Zuerst wird der vom Abfluss unabhängige Formwiderstand der Riegel berechnet:

$$\lambda_R = \frac{p_a \cdot d_R \cdot \pi}{L_B} \qquad p_a = \begin{cases} 1{,}0 \text{ für } I_E \leq 2\% \\ 2 - 0{,}5 \cdot I_E \text{ für } 2\% < I_E < 3\% \\ 0{,}5 \text{ für } I_E \geq 3\% \end{cases} \qquad (4)$$

p_a ist ein empirischer Kalibrierparameter. Für die Berechnung von p_a in Gl. 4 wird I_E in Prozent eingesetzt.

In Tabelle 1 werden der Bemessungsabfluss und eine geschätzte Fließtiefe eingetragen. Die weiteren Spalten enthalten die im Anschluss an die Tabelle angeführten Gleichungen. In Spalte 10 steht die Differenz aus den Spalten 8 und 9. Mit der Zielwertsuche aus dem Tabellenkalkulationsprogramm (Zielwert = 0 in Spalte 10, veränderbare Zelle = h_{hy} in Spalte 2) erhält man die fertige Hydraulik für den Bemessungsabfluss. Analog kann für jeden anderen gewünschten Durchfluss die Hydraulik ermittelt werden.

Tabelle 1: Tabellarische Ermittlung des Fließwiderstands einer Beckenrampe

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q (m^3/s)	h_{hy} (m)	A (m^2) Gl. (5)	v_m (m/s) $= Q/A$	$U_{Bö}$ (m) Gl. (6)	$\lambda_{Bö}$ Gl. (7)	λ_0 Gl. (8)	λ_{ges1} Gl. (9)	λ_{ges2} Gl. (10)	Spalte 8 minus 9 $(\lambda_{ges1} - \lambda_{ges2} = 0)$

$$A = \left(b_R + h_{hy} \cdot m\right) \cdot h_{hy} \qquad \text{für Trapezprofil} \qquad (5)$$

$$U_{Bö} = 2 \cdot h_{hy} \cdot \sqrt{1 + m^2} \qquad \text{für Trapezprofil} \qquad (6)$$

$$\lambda_{Bö} = \left(-2 \cdot \log_{10}\left(\frac{k_{Bö}}{14{,}84 \cdot \frac{\mathrm{A}}{U_{Bö}}}\right)\right)^{-2} \qquad (7)$$

Mit $k_{Bö} = 1{,}5 \cdot d_{90}$ oder $k_{Bö} = 1{,}5 \cdot (21/k_{St})^6$

$$\lambda_0 = \left(-2 \cdot \log_{10}\left(\frac{1{,}5 \cdot d_B}{14{,}84 \cdot \mathrm{A}/b_R}\right)\right)^{-2} \qquad (8)$$

$$\lambda_{ges1} = \frac{8 \cdot g \cdot \frac{A}{b_R + U_{Bö}} \cdot I_E}{v_m^2} \qquad (9)$$

$$\lambda_{ges2} = ((\lambda_R + \lambda_o) \cdot b_R + \lambda_{Bö} \cdot U_{Bö})/(b_R + U_{Bö}) \qquad (10)$$

Wenn für ein übergeordnetes Abflussmodell der Strickler- oder Manning-Wert der Rampe benötigt wird, kann dieser mittels Gl. (11) ermittelt werden.

$$k_{st} = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda_{ges}}} \cdot \left(\frac{A}{b_R + U_{Bö}}\right)^{-1/6} \qquad (11)$$

4.4 Bemessung Riegel- und Beckensteine

4.4.1 Nicht eingestaut

Tabelle 2 ist die Ergänzung von Tabelle 1 für die Ermittlung der Steingrößen.

Tabelle 2: Tabellarische Ermittlung der Steingrößen

11	12	13	14	15	16	17
d_R (m) Gl. (12)	m_R (kg) Gl. (13)	$r_{hy,Sohle}$ (m) Gl. (14)	d_{Bmax} (m) Gl. (15)	m_{Bmax} (kg) Gl. (15)	d_{Bmin} (m) Gl. (16)	m_{Bmin} (kg) Gl. (16)

Die nachfolgende empirische Gleichung für die Riegelsteine (Gl. 12) ist über die Betrachtung eines Kräftegleichgewichts abgeleitet (Hengl und Stephan 2022b). Die Beckensteingrößen werden über einen Bereich von zulässigen Sohlschubspannungen definiert (Gl. 15 und 16).

$$d_R = \frac{1{,}5 \cdot p_{aR} \cdot \rho_w \cdot v^2}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot (\tan\phi \cdot \cos\alpha - \sin\alpha)} \tag{12}$$

Mit Kalibrierparameter $p_{aR} = 0{,}5$, innerer Reibungswinkel $\Phi = 35°$ und $\alpha = \tan^{-1} I_E$.

$$m_R = \frac{d_R^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_s \tag{13}$$

$$r_{hy,Sohle} = \frac{v^2}{8 \cdot g \cdot I_E} \cdot (\lambda_o + \lambda_R) \tag{14}$$

$$d_{Bmax} = \frac{r_{hy,Sohle} \cdot I_E}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot 0{,}065} \quad \text{bzw.} \quad m_{Bmax} = \rho_s \cdot \frac{d_{Bmax}^3 \cdot \pi}{6} \tag{15}$$

$$d_{Bmin} = \frac{r_{hy,Sohle} \cdot I_E}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot 0{,}09} \quad \text{bzw.} \quad m_{Bmin} = \rho_s \cdot \frac{d_{Bmin}^3 \cdot \pi}{6} \tag{16}$$

Im Bereich der Durchlässe (Schlitze) für den Fischaufstieg wird die Beckensohle besonders hoch beansprucht. Hier ist die Sohle mit den größeren Steinen eng verzahnt zu sichern.

Eingestaut

Unter Umständen ist es möglich in eingestauten Bereichen der Rampe kleinere Riegelsteine zu verwenden. Da die Entlastung durch Einstau vom Fuß der Rampe gegen die

Fließrichtung fortschreitend abnimmt, ist beim Stabilitätsnachweis die Position des betrachteten Riegels im Längsprofil der Rampe zu berücksichtigen.

An der betrachteten Position ist der Stabilitätsnachweis sowohl für den Abfluss unmittelbar vor Beginn des Einstaus als auch für die maximale Belastung bei eingestauter Rampe zu führen. Dazu wird für den Einstaubereich das Maximum des Produkts Hydraulischer Radius mal Energieliniengefälle bei Einstau benötigt.

$$d_{R,Einstau} = \frac{max\left(\frac{A}{b_R + U_{Bö}} \cdot I_E\right)}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot 0{,}04} \tag{17}$$

Falls sich aus dieser Gleichung für Durchflüsse zwischen Einstaubeginn und Entlastung durch den Einstau größere Steine ergeben, sind trotzdem die Steingrößen für den Bemessungsabfluss aus Gl. (12) ausreichend. Der Lastfall Einstau wird in der Regel nur bei sehr früh und dementsprechend stark überströmten Rampen maßgebend sein.

5 Beispiele

Die nachfolgenden zwei Beispiele dienen einerseits zur Illustration der praktischen Anwendung als auch zur Kontrolle des richtigen Gebrauchs der oben angegebenen Formeln. Es wird daher empfohlen vor der ersten praktischen Verwendung der Dimensionierungsmethode diese Beispiele durchzurechnen.

5.1 Beispiel 1

Tabelle 3: Basisdaten des Beispiels 1

2,0	Gefälle [%]
140	Sohlbreite b_R [m]
15	mittlere Beckenlänge L_B [m]
0	Böschungsneigung m [-] senkrechte Wand im Beispiel (1: m = 1:0)
0,0005	Rauheit der Böschung $k_{Bö}$ [m] glatte Wand (Plexiglas im Modellversuch)
3500	Bemessungsabfluss Q [m³/s]
2650	Massendichte Steine ρ_s [kg/m³]
1000	Massendichte Wasser ρ_w [kg/m³]
35	Innerer Reibungswinkel Steine Φ [°]
0,50	Kalibrierparameter für die Riegelsteingrößen p_{aR}

Aus dem Gefälle der Rampe von 2 % ergeben sich der Winkel für die Sohlneigung α und der Kalibrierparameter p_a für die Hydraulik:

$$\alpha = \frac{180}{\pi}\tan^{-1}(2/100) = 1{,}1458°$$

$$p_a = 1{,}0$$

Erste Schätzung für die Riegelsteine:

0,95	Schätzung Riegelsteine d_R [m]
0,45	Schätzung Beckensteine d_{Bmax} [m]

Aus den Riegelsteinen folgt der Widerstandsbeiwert λ_R (Gl. 4)

$$\lambda_R = \frac{1{,}0 \cdot 0{,}95 \cdot \pi}{15{,}0} = 0{,}1990$$

Unter Verwendung der Tabelle 1 (Seite 10) mit den entsprechenden Gleichungen ergeben sich die Werte in der dritten Zeile der nachfolgenden Tabelle (gerundet). Nach Zielwertsuche mit dem Ziel 0 in Spalte 10 und h_{hy} als veränderlichen Zellwert ergibt sich die vierte

Zeile der Tabelle. Je nach verwendetem Tabellenkalkulationsprogramm und gewähltem Startwert können sich die Ergebnisse geringfügig, aber vernachlässigbar unterscheiden.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	h_{hy}	A Gl. (5)	$v_m = Q/A$	$U_{Bö}$	$\lambda_{Bö}$ Gl. (7)	λ_0 Gl. (8)	λ_{ges1} Gl. (9)	λ_{ges2} Gl. (10)	Spalte 8 minus 9 $(\lambda_{ges1} - \lambda_{ges2} = 0)$
3500	4,000	560,00	6,25	8,00	0,006248	0,06614	0,1521	0,2511	-0,09906
3500	4,702	658,24	5,32	9,41	0,006248	0,06161	0,2446	0,2446	0,000020

Mit der berechneten Hydraulik ergeben sich für die Tabelle 2 (Seite 11) die folgenden Werte:

11	12	13	14	15	16	17
d_R (m) Gl. (12)	m_R (kg) Gl. (13)	$r_{hy,Sohle}$ (m) Gl. (14)	d_{Bmax} (m) Gl. (15)	m_{Bmax} (kg) Gl. (15)	d_{Bmin} (m) Gl. (16)	m_{Bmin} (kg) Gl. (16)
1,926	9918	4,694	0,875	930	0,632	351

Mit den verbesserten Steingrößen d_R und d_{Bmax} wird die Hydraulik neu berechnet und diese Schleife weiter iteriert bis die Änderung von d_R weniger als 1 cm beträgt. In manchen Fällen geht die Iteration etwas schneller, wenn für die Verbesserung die Mittelwerte aus neuer und vorangegangener Schätzung eingesetzt werden. Für dieses Beispiel erhält man nach 6 Iterationsschleifen folgendes Ergebnis für die Steingrößen:

11	12	13	14	15	16	17
d_R (m) Gl. (12)	m_R (kg) Gl. (13)	$r_{hy,Sohle}$ (m) Gl. (14)	d_{Bmax} (m) Gl. (15)	m_{Bmax} (kg) Gl. (15)	d_{Bmin} (m) Gl. (16)	m_{Bmin} (kg) Gl. (16)
1,472	**4423**	5,373	**1,002**	**1395**	**0,724**	**526**

Wie bereits oben erwähnt, kann sich das Ergebnis, je nach gewähltem Hilfsprogramm von dem hier angegebenen geringfügig unterscheiden.

Mit obigen Steingrößen ergibt sich diese Hydraulik:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	h_{hy}	A Gl. (5)	$v_m = Q/A$	$U_{Bö}$	$\lambda_{Bö}$ Gl. (7)	λ_0 Gl. (8)	λ_{ges1} Gl. (9)	λ_{ges2} Gl. (10)	Spalte 8 minus 9 $(\lambda_{ges1} - \lambda_{ges2} = 0)$
3500	**5,387**	754,26	4,64	10,77	0,006248	0,08393	0,3647	0,3646	0,00008

Für die Wasserspiegellagenberechnung in einem Abflussmodell ergibt sich mit Gl. (11) ein Strickler-Wert von 11,2 $m^{1/3}/s$. Im Abflussmodell ist die hydraulische Sohle gemäß Definition in Abbildung 3 als Sohlenlage zu verwenden.

Mit den ermittelten Steingrößen und der obigen Tabelle können Fließtiefen für beliebige Durchflüsse berechnet werden um letztendlich eine Pegelbeziehung für die Rampe zu erhalten (Abbildung 4). Für die Abflüsse 1400 bzw. 2100 m³/s ergeben sich Fließtiefen von 3 m bzw. 3,88 m.

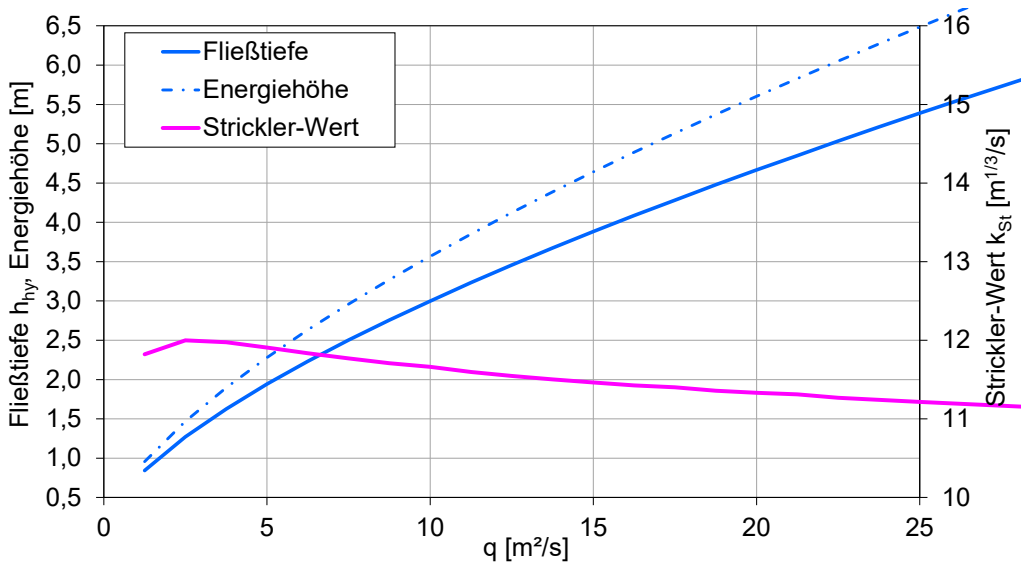

Abbildung 4: Hydraulik zu Beispiel 1

Die Rampe in diesem Beispiel wurde betreffend Steingrößen in einem wasserbaulichen Modellversuch optimiert. In diesem Modellversuch konnte gezeigt werden, dass auch kleinere Steine ein stabiles Bauwerk ergeben (Abbildung 5).

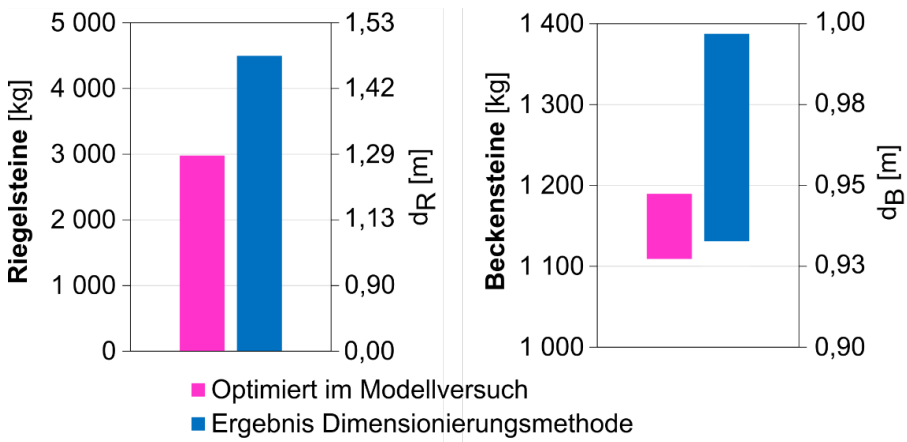

Abbildung 5: Vergleich Steingrößen aus Dimensionierung mit Optimierung im Modellversuch zu Beispiel 1

5.2 Beispiel 2

Tabelle 4: Basisdaten des Beispiels 2

2,9	Gefälle [%]
14	Sohlbreite b_R [m]
5,25	mittlere Beckenlänge L_B [m]
1,5	Böschungsneigung m [-]
0,92	Rauheit der Böschung $k_{B\ddot{o}}$ [m]
155	Bemessungsabfluss Q [m³/s]
2650	Massendichte Steine ρ_s [kg/m³]
1000	Massendichte Wasser ρ_w [kg/m³]
35	Innerer Reibungswinkel Steine Φ [°]
0,50	Kalibrierparameter für die Riegelsteingrößen p_{aR}

Aus dem Gefälle der Rampe von 2,9 % ergeben sich der Winkel für die Sohlneigung α und der Kalibrierparameter p_a für die Hydraulik:

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \tan^{-1}(2{,}9/100) = 1{,}6611°$$

$$p_a = 2 - 0{,}5 \cdot 2{,}9 = 0{,}55$$

Erste Schätzung für die Riegelsteine:

0,50	Schätzung Riegelsteine d_R [m]
0,40	Schätzung Beckensteine d_{Bmax} [m]

Aus den Riegelsteinen folgt der Widerstandsbeiwert λ_R (Gl. 4)

$$\lambda_R = \frac{0{,}55 \cdot 0{,}50 \cdot \pi}{5{,}25} = 0{,}1646$$

Unter Verwendung der Tabelle 1 (Seite 10) mit den entsprechenden Gleichungen ergeben sich die Werte in der dritten Zeile der nachfolgenden Tabelle (gerundet). Nach Zielwertsuche mit dem Ziel 0 in Spalte 10 und h_{hy} als veränderlichen Zellwert ergibt sich die vierte

Zeile. Je nach verwendetem Tabellenkalkulationsprogramm und gewähltem Startwert können sich die Ergebnisse geringfügig, aber vernachlässigbar unterscheiden.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	h_{hy}	A Gl. (5)	$v_m = Q/A$	$U_{Bö}$	$\lambda_{Bö}$ Gl. (7)	λ_0 Gl. (8)	λ_{ges1} Gl. (9)	λ_{ges2} Gl. (10)	Spalte 8 minus 9 $(\lambda_{ges1} - \lambda_{ges2} = 0)$
155	1,000	15,50	10,00	3,61	0,073761	0,12099	0,0200	0,2422	-0,22214
155	2,028	34,56	4,48	7,31	0,070568	0,07840	0,1835	0,1838	-0,00031

Mit der berechneten Hydraulik ergeben sich für die Tabelle 2 (Seite 11) die folgenden Werte:

11	12	13	14	15	16	17
d_R (m) Gl. (12)	m_R (kg) Gl. (13)	$r_{hy,Sohle}$ (m) Gl. (14)	d_{Bmax} (m) Gl. (15)	m_{Bmax} (kg) Gl. (15)	d_{Bmin} (m) Gl. (16)	m_{Bmin} (kg) Gl. (16)
1,389	3719	2,147	0,581	272	0,419	102

Mit den neu berechneten Steingrößen d_R und d_{Bmax} wird die Hydraulik neu berechnet und diese Schleife weiter iteriert bis die Änderung von d_R weniger als 1 cm beträgt. Es ergeben sich folgende Steingrößen:

11	12	13	14	15	16	17
d_R (m) Gl. (12)	m_R (kg) Gl. (13)	$r_{hy,Sohle}$ (m) Gl. (14)	d_{Bmax} (m) Gl. (15)	m_{Bmax} (kg) Gl. (15)	d_{Bmin} (m) Gl. (16)	m_{Bmin} (kg) Gl. (16)
0,989	**1341**	2,661	**0,720**	**517**	**0,520**	**195**

Wie bereits oben erwähnt, kann sich das Ergebnis, je nach gewähltem Hilfsprogramm von dem hier angegebenen geringfügig unterscheiden.

Mit obigen Steingrößen ergibt sich diese Hydraulik:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q	h_{hy}	A Gl. (5)	$v_m = Q/A$	$U_{Bö}$	$\lambda_{Bö}$ Gl. (7)	λ_0 Gl. (8)	λ_{ges1} Gl. (9)	λ_{ges2} Gl. (10)	Spalte 8 minus 9 $(\lambda_{ges1} - \lambda_{ges2} = 0)$
155	**2,339**	40,95	3,79	8,43	0,069698	0,09712	0,2900	0,2899	0,00012

Für die Wasserspiegellagenberechnung in einem Abflussmodell ergibt sich mit Gl. (11) ein Strickler-Wert von 14,9 $m^{1/3}/s$. Im Abflussmodell ist die hydraulische Sohle gemäß Definition in Abbildung 3 als Sohlenlage zu verwenden.

Mit den ermittelten Steingrößen und der obigen Tabelle können Fließtiefen für beliebige Durchflüsse berechnet werden um letztendlich eine Pegelbeziehung für die Rampe zu erhalten (Abbildung 6). Für die Abflüsse 50 bzw. 100 m³/s ergeben sich Fließtiefen von 1,24 m bzw. 1,84 m.

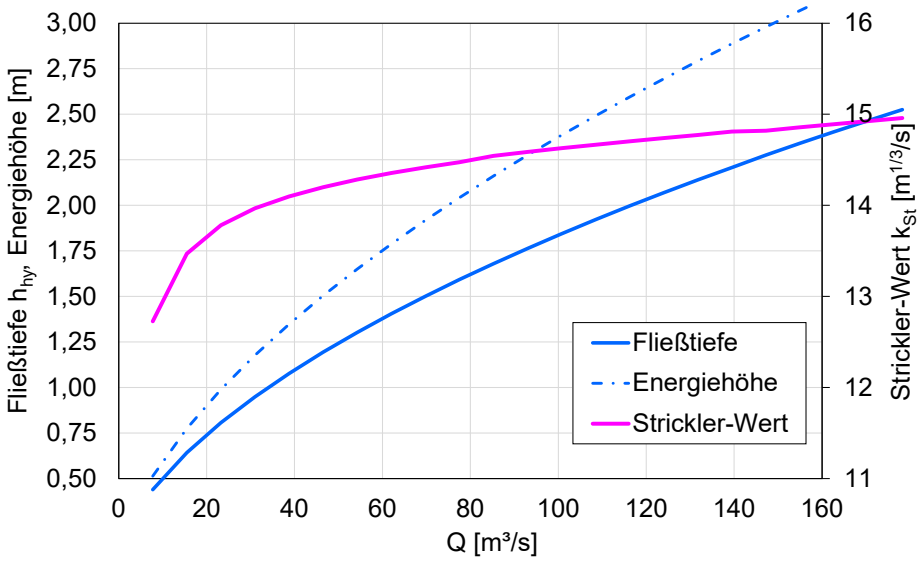

Abbildung 6: Hydraulik zu Beispiel 2

Für dieses Beispiel ergeben sich sowohl im Modellversuch als auch aus der Dimensionierung ähnliche Steingrößen (Abbildung 7).

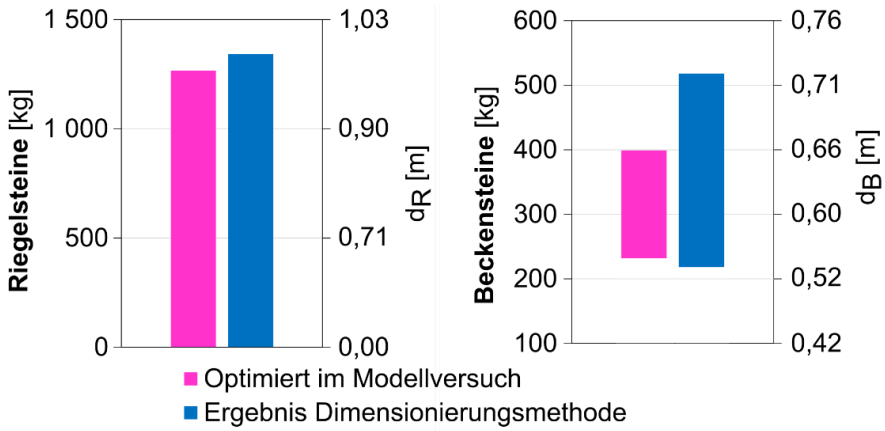

Abbildung 7: Vergleich Steingrößen aus Dimensionierung mit Optimierung im Modellversuch zu Beispiel 2

6 Weitere Bemessungsformeln

6.1 Riegelsteinbemessung nach Korecky

Der Ansatz von Korecky (2007) ermöglicht, speziell bei hoch belasteten Bauwerken, eventuell kleinere Steine zu verwenden. Es werden beim Bemessungsereignis (in der Regel HQ_{100}) bewusst Umlagerungen von Riegelsteinen akzeptiert, also eine Sicherheit kleiner 1. D. h., dass nach größeren Hochwässern eventuell Reparaturkosten anfallen, um die Fischdurchgängigkeit und damit die vollständige Funktion der Rampe wiederherzustellen. Da strukturierte Beckenrampen bei Überlastung sehr gutmütig reagieren, ist bei kleinen Veränderungen am Bauwerk nicht zu erwarten, dass damit die Gesamtfunktion als Stützbauwerk beeinträchtigt wird.

Anwendungsbereich Gefälle: ca. 1 bis 3,3 % (1:100 bis 1:30)

Die Formel für die Bestimmung der Riegelsteingröße enthält einen sogenannten Toleranzgrad Ω, der dem Prozentsatz an Steinen entspricht, die beim gewählten Abfluss in Bewegung kommen können (z. B. bedeutet Ω = 0,03, dass maximal 3 % der Steine umgelagert werden). Daraus ergibt sich bei entsprechender Wahl des Toleranzgrades die Möglichkeit, kleinere Steine zu verwenden.

Auf Basis des spezifischen Abflusses q, des Gefälles I_R und des Toleranzgrades Ω kann die erforderliche Riegelsteingröße m_R direkt berechnet werden.

$$m_R = \frac{\rho_s}{g} \cdot \frac{9{,}81 \cdot q^2}{2650 \cdot (-0{,}197 \cdot \Omega^{-0{,}035} \cdot \ln I_R - 0{,}275 \cdot \Omega^{-0{,}129})^2} \qquad \Omega \geq 0{,}003 \qquad (18)$$

Auf Grund der Versuchsanordnung (die aus drei Steinreihen bestehenden Riegel wurden auf ein Unterbett aufgelegt und nicht in die Sohle eingebunden) kann die obige Formel bei sehr kleinen Toleranzgraden auch schwerere Riegelsteine liefern als der im Abschnitt 4.4 beschriebene Ansatz nach dem Kräftegleichgewicht mit Berücksichtigung der Einbindung in die Sohle.

Für das Beispiel in Kapitel 5.1 mit 2 % Gefälle und einem spezifischen Abfluss q von 25 m³/(s·m) ergeben sich in Abhängigkeit vom Toleranzgrad folgende Riegelsteingrößen:

Ω	m_R [kg]
0,01	3767
0,02	3408
0,03	3243

Diese sind zwar etwas größer als die Riegelsteine aus dem Modellversuch mit 3 t, aber deutlich leichter als die 4,4 t aus der Bemessung mit dem Kräftegleichgewicht.

6.2 Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen

Diese Bauform wurde in der Schweiz entwickelt. Bei diesem Rampentyp sind große Steine auf einer grobkörnigen Unterschicht unregelmäßig über die Fläche des Bauwerks verteilt. Es wird lediglich eine Belegungsdichte (Anzahl Steine je Flächeneinheit) angegeben. Innerhalb vorgegebener Grenzen darf sich das Sohlgefälle der Rampe mit der Zeit reduzieren. D.h. es sind bei Hochwasser begrenzte Bewegungen am Bauwerk zulässig. Um mit der Abflachung des Sohlgefälles verbundene negative Aspekte in der Oberwasserstrecke zu vermeiden, wird das Bauwerk mit einem etwas höheren Gefälle errichtet und eventuell auch eine Pufferzone im Oberwasser vorgesehen. Diese Bauform ist bei entsprechend geringem Gefälle auch für große spezifische Abflussbelastungen von mehr als 10 m³/(s·m) bei Hochwasser geeignet.

Abbildung 8: Unstrukturierte Blockrampe an der Landquart (links bei ca. 0,28 m³/s, rechts bei ca. 11 m³/s), Quellen: links - Tamagni et al. 2017, rechts – BAW/IWB

Eine ausführliche Praxisanleitung für die Planung dieses Rampentyps einschließlich Beispielen ist im Internet frei verfügbar (Tamagni et al. 2017). Gemäß der Praxisanleitung ist die Anwendbarkeit dieses Rampentyps bis zu einem maximalen Gefälle von 3 % möglich.

In Tamagni et al. 2017 wird die Thematik Nachbettschutz nicht direkt erwähnt. Es wird lediglich vorgeschlagen, den Anschluss im Unterwasser zu beobachten und wenn erforderlich das Bauwerk zu verlängern. Da die Energieumwandlung aber ähnlich wie bei anderen Rampen erfolgt und am unteren Ende des Bauwerks in Sohlennähe erhöhte Turbulenzen auftreten, ist die Ausführung eine Nachbettsicherung entsprechend den Hinweisen in Kapitel 0 zu empfehlen.

7 Nachbettschutz

Der Nachbettschutz dient folgenden Zwecken:

- Reduktion von durch hohe Formwiderstände auf der Rampe verursachte großskalige Turbulenzen mit hohen Fließgeschwindigkeitsschwankungen die zu Sohlerosion und damit Kolkbildung führen. Gleichzeitig wird die Kolkbildung begrenzt.
- Schutz der Ufersicherungen im Kolkbereich.
- Abfangen von begrenzten Eintiefungen in der Unterwassersohle um eine Abtreppung des Wasserspiegels am Rampenfuß zu verhindern. Es bildet sich lokal eine etwas steilerer Gewässerabschnitt.
- Reduktion des Aufwands für die Fußsicherung der Rampe

Die für die Nachbettsicherung erforderliche Steingröße d_{NB} (äquivalenter Kugeldurchmesser) wird mittels Sohlschubspannungsansatz direkt aus den Ergebnissen der hydraulischen Berechnung für den im Unterwasser der Rampe gültigen Bemessungsabfluss ermittelt:

$$d_{NB} \approx \frac{\tau}{\theta_{zul} \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_w)} = \frac{r_{hy,Sohle} \cdot I_E}{\theta_{zul} \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}} \qquad \text{mit } \theta_{zul} = 0{,}01 \text{ bis } 0{,}02 \qquad (19)$$

Mit dem angegeben zulässigen Shields-Wert θ_{zul} dimensionierte Steine lagern sich bei Hochwasser um und sammeln sich in auftretenden Kolken. Damit wird die Kolktiefe begrenzt. Größerer Steine verschlechtern daher den Schutz vor tiefen Kolken, kleinere Steine können ins Unterwasser abgetragen werden.

Bei breiten Beckenrampen empfiehlt sich eine Belegung mit zwei Steinlagen in einem 3 bis 5 m breiten Randstreifen entlang der Ufer und des Rampenfußes. Für die Fläche dazwischen reicht eine flächige Steinauflage mit einer Belegungsdichte von σ_{NB} = 20 % (Abbildung 9). Falls auf Grund der geringen Breite des Gerinnes ein Randstreifen die Ausbildung eines Kolkes verhindern würde, sollte stattdessen eine ausreichend tiefe Fundierung der Ufersicherung ausgeführt werden.

$$\sigma_{NB} = \frac{d_{NB}^2 \cdot \pi \cdot N}{4 \cdot A_{Sohle}} \qquad \text{mit } N = \text{Anzahl der Steine auf der Fläche } A_{Sohle} \qquad (20)$$

Bei kugelförmigen Steinen entspricht σ_{NB} = 0,7 der dichtest möglichen Packung.

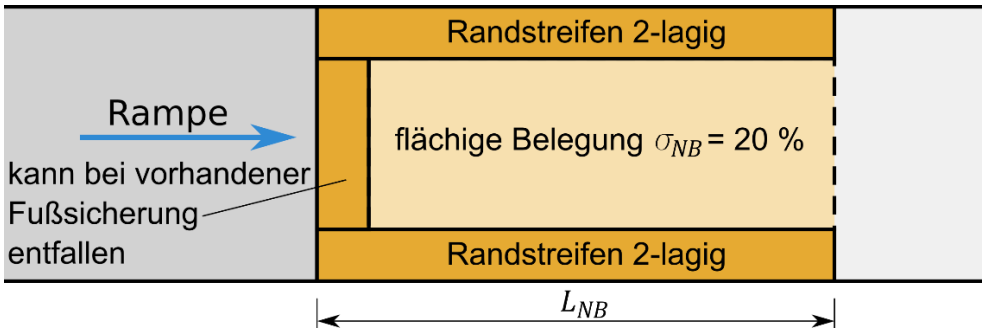

Abbildung 9: Skizze zur Ausführung eines Nachbettschutzes im Anschluss an eine breite Rampe

Es ist darauf zu achten, dass die Randstreifen dicht an die Ufersicherungen anschließen, um vor Unterspülung zu schützen (Korecky 2007).

Die Länge der Nachbettsicherung richtet sich nach dem zu erwartenden Kolk sowie der Dauer des Geschiebeausfalls bzw. Geschiebemangels. Untersuchungen zur tatsächlich erforderlichen Nachbettlänge sind kaum vorhanden. Bei Rampen mit Geschiebemangel bzw. länger andauerndem Geschiebeausfall wird eine Nachbettlänge von 80 bis 150 % der Länge der Rampe empfohlen. Bei Geschiebetransport über das Bauwerk beträgt die erforderliche Nachbettlänge etwa zwei bis drei Gerinnebreiten. Die hier angegebenen Nachbettlängen geben den derzeitigen Wissensstand wieder und liegen auf der sicheren Seite. Unabhängig davon wird empfohlen in einem Intervall von etwa 5 Jahren sowie nach größeren Hochwässern die Sohlentwicklung im Bereich des Nachbettschutzes zu kontrollieren.

Auf der Fläche des Nachbettschutzes kann auch ein Kolk vorgeformt werden. Es ist aber kein Problem die Kolkbildung dem Gewässer zu überlassen. Die Steine des Nachbettschutzes sammeln sich in den Tiefpunkten von Kolken und begrenzen damit die Kolktiefen.

8 Literatur

Hengl, M.; Stephan, U. (2008). Ermittlung des sohlmorphologischen Gleichgewichtsgefälles von Fließgewässern. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 60, Heft 11-12, S. 193-199.

Hengl, M.; Stephan, U. (2022a). Beckenrampen – Fließtiefenberechnung bei stark überströmten Riegeln. Wasserwirtschaft 112, Heft 4, S. 19-25.

Hengl, M.; Stephan, U. (2022b). Beckenrampen – Dimensionierung und Stabilität bei Hochwasser. Wasserwirtschaft 112, Heft 4, S. 26-32.

Korecky, N. (2007): Flach geneigte Riegelrampen: Bauwerksbemessung sowie konstruktive Ausführung des Ufer- und Nachbettschutzes. Schriftenreihe des Bundesamts für Wasserwirtschaft Nr. 28, Wien.

Korecky, N.; Hengl, M. (2008): Stabilität und Bemessung von flach geneigten, aufgelösten Riegelrampen. Wasserwirtschaft 98, Heft 1-2, S. 32-36.

MUNLV (2005): Handbuch Querbauwerke. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

Pagliara S., Chiavaccini P. (2006). Flow Resistance of Rock Chutes with Protruding Boulders. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.132, No.6, 545-552.

Tamagni, S.; Weitbrecht, V.; Boes, R. M.; Hunzinger, L.; Opferkuch, F. (2017): Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen - Eine Praxisanleitung. VAW-Mitteilungen 240, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Schweiz. https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/2010-2019.html oder https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2010-2019/240.pdf (Linküberprüfung am 12.4.2022).

Ullmann M., Stephan U., Haunschmid R., Petz-Glechner R., Petz W. (2009). Modellversuch Aufgelöste Rampen, Ökologie und Hydraulik – Endbericht. Amt der Oö. Landesregierung/Oberflächengewässerwirtschaft.

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