

## 4 Wechselwirkung zwischen Abfluss und Sohlenlage bei seitlicher Entlastung

Seitliche Entlastungsbauwerke in Fliessgewässern sind gängige Massnahmen, um bei Hochwasserereignissen einen Teil des Abflusses auszuleiten. Die seitliche Entlastung reduziert den Durchfluss und damit die Geschiebetransportkapazität im Hauptgewässer, was zu Geschiebeablagerungen führt. In diesem Kapitel wird die Wechselwirkung zwischen dem Abfluss über eine seitliche Entlastung und der Veränderung der Sohlenlage im Hauptgerinne anhand von 1D- und 2D-Modellansätzen erörtert und veranschaulicht und es werden Empfehlungen für praktische Modellanwendungen gegeben. Zudem werden Aspekte der ökologischen Flutung von Retentionsräumen kurz diskutiert.

Seline Frei, Eva Gerke, Robert Boes und David Vetsch

### 4.1 Einleitung

Seitliche Entlastungsbauwerke in Fliessgewässern wie Streichwehre und überströmbare Dämme sind gängige Massnahmen, um bei grossen Hochwasserereignissen einen Teil des Abflusses in einen seitlichen Retentionsraum oder einen Hochwasserkorridor auszuleiten. So kann das Überschwemmungsrisiko für flussabwärts gelegene Gebiete verringert werden. Es gibt sowohl regulierte als auch unregulierte seitliche Entlastungen, wobei die meisten in der Schweiz unreguliert sind (Bühlmann und Boes 2014).

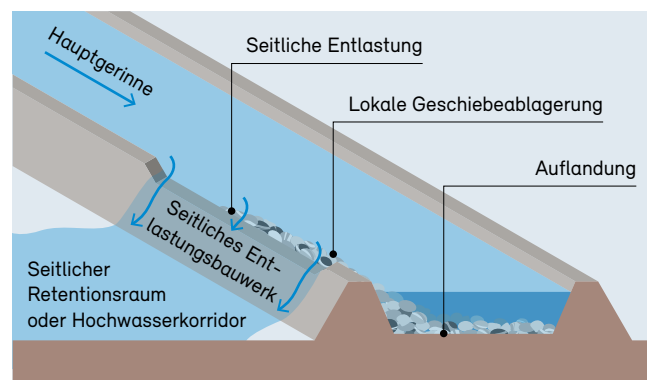
Der Abfluss über die seitliche Entlastung tritt ein, sobald die Wasserspiegellage die Damm- oder Wehrkrone erreicht. Die Kronenhöhe ist nach hydrologischen und hochwasserschutztechnischen Zielen zu bemessen, wobei das Schutzziel in der Schweiz auf einer Risikobewertung beruht und aufgrund des Schadenspotenzials des hochwassergefährdeten Gebietes festgelegt wird (BAFU 2005). Der Bemessungsabfluss der seitlichen Entlastung ist somit ein projektspezifischer Wert. Seitliche Entlastungen werden im Hochwasserschutz als Teil des Bemessungskonzepts oder für die Systemsicherheit bei Extremereignissen (Überlastfall) eingesetzt. Solche Bauwerke werden typischerweise flussaufwärts von stark gefährdeten Gebieten wie etwa Siedlungen und Industrieanlagen in Betracht gezogen, sofern geeignete Retentionsräume vorhanden sind oder Hochwasserkorridore zur seitlichen Ableitung des Wassers genutzt werden können. Die seitliche Entlastung führt zu einer Reduktion des Abflusses und damit der Geschiebetransportkapazität im Hauptgerinne. Folglich kann es zu lokalen Geschiebeablagerungen im Bereich des

Streichwehrs und zu einer Auflandung im flussabwärts gelegenen Gerinne kommen (Abb. 22). Die Erhöhung der Sohlenlage kann die seitliche Entlastung im Vergleich zu einer Situation ohne Geschiebe deutlich vergrössern.

Mit zunehmender Dauer des Hochwassers dehnt sich die Auflandung weiter in Richtung des flussabwärts gelegenen Hauptgerinnes aus. Während des abfallenden Asts der Hochwasserwelle setzt dort, wo es zu einer lokalen Geschiebeablagerung und Auflandung gekommen war, wieder eine Erosion ein. Die Wechselwirkung zwischen seitlicher Entlastung und Veränderungen der Geschiebedynamik im Fluss darf bei der Bemessung von Streichwehren nicht vernachlässigt werden. Bemessungsrichtlinien für

#### Abbildung 22

Seitliches Entlastungsbauwerk mit lokaler Geschiebeablagerung und Auflandung aufgrund der seitlichen Entlastung während eines Hochwasserereignisses. Abbildung angepasst aus Rosier (2007).



Quelle: VAW, ETH Zürich

seitliche Entlastungsbauwerke, die keine Rücksicht auf die Auflandung nehmen, befinden sich in Bühlmann und Boes (2014), Giesecke *et al.* (2014) und Jäggi *et al.* (2015). Um die Auswirkung der Erhöhung der Sohlenlage auf die seitliche Entlastung zu berücksichtigen, führte Rosier (2007) im Labor des Forschungsinstituts PL-LCH der EPFL mehrere Rinnenexperimente durch.

Die im Wasserbau und in der Beurteilung des Hochwasserisikos gebräuchlichen numerischen Modelle, d. h. 1D- und 2D-Modelle, die auf den Flachwassergleichungen basieren, können als Hilfsmittel für die Bemessung von Streichwehren unter Berücksichtigung von Sohlenveränderungen verwendet werden. Die Simulationssoftware BASEMENT (Vetsch *et al.* 2020) wurde eingesetzt, um die Wechselwirkung zwischen seitlicher Entlastung und Veränderungen der Sohlenlage zu analysieren, wobei Erkenntnisse aus Rinnenexperimenten (Rosier 2007) zur Validierung der Ergebnisse herangezogen wurden. In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten und Anforderungen des Modells aufgezeigt und Empfehlungen formuliert.

Ein weiterer Aspekt, der in der Schweiz eher neu ist, ist die Nutzung der seitlichen Entlastung zur Verbesserung der ökologischen Bedingungen in Retentionsräumen, was als «ökologische Flutung» bezeichnet wird (s. Box 7). Dabei wird das Wasser nicht nur bei grossen, sondern auch bei kleineren Hochwasserereignissen in die Retentionsräume abgeleitet. Dies kann die Bildung von dynamischen Auenbiotopen unterstützen. In Deutschland wurde die ökologische Flutung bereits erfolgreich eingesetzt, beispielsweise im Polder Altenheim am Rhein, der seit 1987 besteht (Pfarr *et al.* 2014).

## 4.2 Abschätzung des seitlichen Entlastungsabflusses

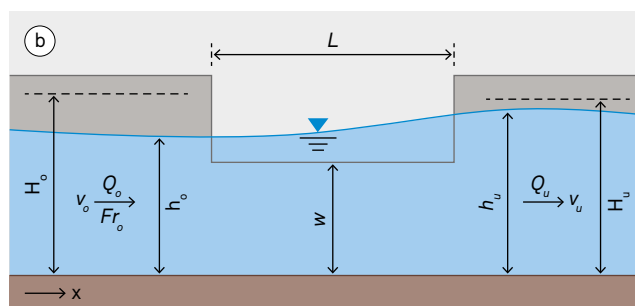
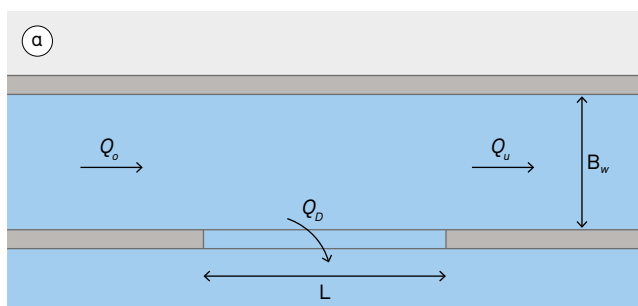
### 4.2.1 Gängige Ansätze

Die klassischen Wehrgleichungen zur Abschätzung des Abflusses gehen davon aus, dass die Strömung senkrecht zur Wehrachse auf das Wehr zufliesst. Im Gegensatz dazu nähert sich die Strömung bei seitlichen Entlastungsbauwerken in einem Winkel von  $< 90^\circ$ . Abbildung 23 zeigt die Draufsicht und die Seitenansicht eines Streichwehrs in einem Gerinne mit strömendem Abfluss, bei dem das Wasser in Richtung eines seitlichen Retentionsraums oder eines Hochwasserkorridors abgeleitet wird. Alle nachfolgend beschriebenen Variablen sind in Abbildung 23 dargestellt.

Die Wassertiefe entlang des Streichwehrs nimmt bei strömenden Bedingungen (Fliessgeschwindigkeit  $<$  Wellengeschwindigkeit; Abb. 23b) zu und bei schiessenden (Fliessgeschwindigkeit  $>$  Wellengeschwindigkeit) ab. Daher ist die seitliche Entlastung pro Einheitslänge bei einem schiessenden Abfluss deutlich geringer als bei einem strömenden und lässt sich kaum voraussagen (Jäggi *et al.* 2015). Seitliche Entlastungen werden für schiessenden Abfluss nicht empfohlen (Hager 2010) und sollten daher nur in strömenden Flussabschnitten in Betracht gezogen werden, in denen die Froude-Zahl im Oberwasser  $Fr_o = v_o / (g \cdot A / B_w)^{0.5} < 0,75$  (Hager 2010; Giesecke *et al.* 2014) ist, wobei  $v_o = Q_o / A$  die über den Fliessquerschnitt  $A$  gemittelte Anströmungsgeschwindigkeit ist,  $Q_o$  der Gerinneabfluss,  $A$  der Fliessquerschnitt,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $B_w$  die Gerinnebreite auf Höhe des Wasserspiegels. In der Literatur gibt es mehrere Ansätze zur

Abbildung 23

(a) Draufsicht und (b) Seitenansicht eines seitlichen Entlastungsbauwerks, die den Wasserspiegel bei strömendem Abfluss zeigen. Alle Variablen sind im Haupttext definiert. Abbildung angepasst aus Bollrich (2013).



Quelle: VAW, ETH Zürich

Abschätzung des seitlichen Entlastungsabflusses  $Q_D$ , die in der Regel auf der Annahme beruhen, dass am Streichwehr kein Energieverlust entsteht.

De Marchi (1934) schlug zur Berechnung des seitlichen Entlastungsabflusses für einen rechteckigen und horizontalen Kanal mit einem seitlichen, scharfkantigen Wehr die folgende Gleichung vor:

$$\frac{dQ_D}{dx} = \frac{2}{3} \cdot C_M \cdot \sqrt{2g} \cdot (h_W - w)^{2/3} \quad (1)$$

$\frac{dQ_D}{dx}$  Abflussänderung entlang des seitlichen Entlastungsbauwerks [ $\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]

$C_M$  Seitlicher Überfallkoeffizient [-]

$Q_D$  Seitlicher Entlastungsabfluss [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]

$h_W = h_W(x)$  Abflusstiefe entlang des seitlichen Entlastungsbauwerks [m]

$w$  Wehrkronenhöhe [m]

$g$  Erdbeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ]

Der Ansatz von De Marchi basiert auf der Lösung einer Gleichung für ungleichförmigen, instationären Abfluss und nicht konstanter Abflusstiefe  $h_W(x)$  entlang des Bauwerks (Di Bacco und Scorzini 2019). Für seitliche scharfkantige Wehre in rechteckigen und trapezförmigen Gerinnen bei strömenden Bedingungen kann der Überfallkoeffizient  $C_M$  nach dem vereinfachten Ansatz von Hager (1987) bestimmt werden (Gl. 2). Es gibt nur wenig Literatur zu den seitlichen Überfallkoeffizienten von breitkronigen (z. B. Ranga Raju 1979), rundkronigen (z. B. Izadinia und Heidarpour 2016) oder dachförmigen seitlichen Entlastungsbauwerken. Der seitliche Überfallkoeffizient hat einen starken Einfluss auf den berechneten Entlastungsabfluss. Hier wird der De Marchi-Ansatz mit  $C_M$  nach Hager (1987) verwendet:

$$C_M = 0.728 \sqrt{\frac{2+Fr_0^2}{2+3Fr_0^2}} \quad (2)$$

Für viele Situationen können Oberwasserabfluss  $Q_o$ , Unterwasserabfluss  $Q_u$  und die Strömungsverhältnisse im Unterwasser (Unterwasser-Geschwindigkeit  $v_u$ , Wassertiefe  $h_u$ ,

Energiehöhe  $H_u$  und Gerinnebreite  $B$ ) definiert werden. Unter der Annahme, dass entlang des seitlichen Entlastungsbauwerks kein Energieverlust auftritt, können die Strömungsverhältnisse im Oberwasser (Oberwasser-Geschwindigkeit  $v_o$ , Wassertiefe  $h_o$  und Energiehöhe  $H_o$ ) mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung berechnet werden. Di Bacco und Scorzini (2019) schlugen die folgende Gleichung vor, um die erforderliche Länge des seitlichen Entlastungsbauwerks  $L$  zur Verminderung von  $Q_o$  auf  $Q_u$  zu berechnen:

$$L = \frac{3B}{2C_M} \cdot (\Phi_u - \Phi_o) \quad (3)$$

wobei  $\Phi_i = \frac{2H_i - 3w}{H_i - w} \cdot \sqrt{\frac{H_i - h_i}{h_i - w}} - 3 \cdot \arcsin\left(\frac{H_i - h_i}{h_i - w}\right)$  und  $i = o, u$

#### 4.2.2 Auswirkungen der Morphodynamik

Die seitliche Entlastung während eines Hochwasserereignisses verringert die Geschiebetransportkapazität im Hauptgerinne. Dadurch kann es zu lokalen Geschiebeablagerungen im Bereich des Streichwehrs und zu einer Auflandung im Hauptgerinne flussabwärts kommen (Abb. 22). Die lokale Geschiebeablagerung beginnt am Anfang des Streichwehrs und erreicht ihre maximale Höhe am stromabwärts gelegenen Ende des Wehrs. Die seitliche Entlastung kann sich aufgrund der Auflandung um das Dreifache erhöhen (Rosier 2007).

Rosier (2007) stellte eine empirische und iterative Methode zur Abschätzung der lokalen Geschiebeablagerungen aufgrund einer seitlichen Entlastung vor, die auf physikalischen Experimenten basiert (s. a. Rosier *et al.* 2008). Die iterative Berechnung ist aufwändig und erfordert die Erstellung eines numerischen Modells und eine hydrodynamische Simulation für jeden Iterationsschritt. Eine detaillierte Abschätzung der Auflandung und der seitlichen Entlastung mit Hilfe numerischer Simulationen, einschliesslich des Geschiebetransports, wird aber für die Planung von Streichwehren empfohlen und hier präsentiert.

### 4.3 Numerische Modellierung seitlicher Entlastungsbauwerke

#### 4.3.1 Modellansätze

Um die Auswirkungen der Auflandungsdynamik auf die seitliche Entlastung zu beurteilen, wurden mit der Software BASEMENT Version 2.8.2 verschiedene numerische

Modellansätze evaluiert. BASEMENT ist eine Freeware zur Simulation der Hydro- und Morphodynamik von Fließgewässern ([www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch)), die an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazialogie (VAW) der ETH Zürich entwickelt wurde. Bei dieser Evaluation wurden mehrere hydrodynamische (fixierte Flusssohle, kein Geschiebetransport) und morphodynamische Simulationen mit den verschiedenen Modellansätzen durchgeführt und die Ergebnisse mit beobachteten experimentellen Daten von Rosier (2007) verglichen. Insbesondere wurden trapezförmige und rechteckige Kanäle mit Streichwehren simuliert. Vier verschiedene numerische Modellansätze wurden getestet, von denen drei ausgewählt wurden (Abb. 24):

(a) **1D**: Die seitliche Entlastung über ein Streichwehr wird in einem 1D-BASEMENT-Modell mit einer Reduktion des Abflusses durch spezifische Senken-Termen (Gl. 1) an jedem Querprofil entlang des Wehrs berücksichtigt. Für die

einzelnen Senken-Termen müssen spezifische  $C_M$ -Werte definiert werden. Die Reduktion des Strömungsimpulses aufgrund des seitlichen Entlastungsabflusses wird in BASEMENT berücksichtigt.

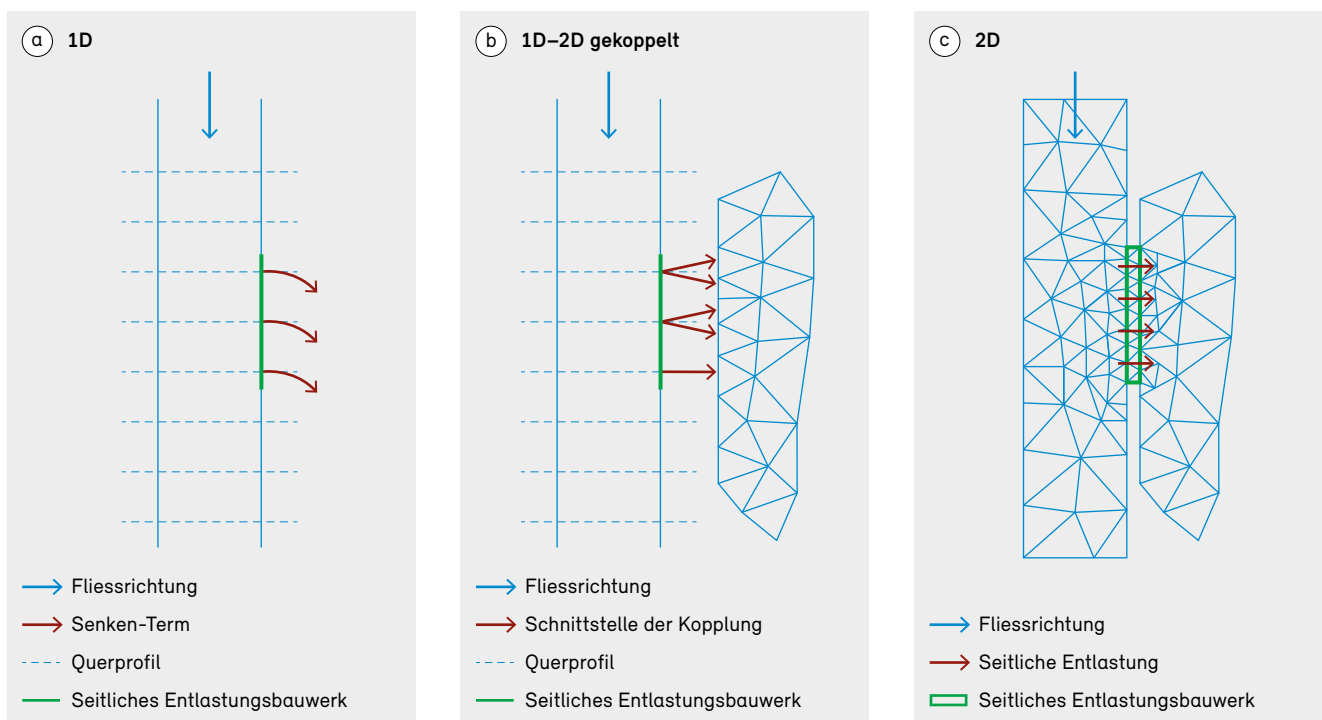
(b) **1D-2D gekoppelt**: Die laterale Kopplung umfasst ein 1D-Gerinne und einen 2D-Überflutungsbereich. Die seitliche Entlastung wird mit Hilfe von Gl. 1 berechnet; zudem muss ein spezifischer  $C_M$ -Wert definiert werden. Die Reduktion des Strömungsimpulses aufgrund des seitlichen Entlastungsabflusses wird in BASEMENT berücksichtigt.

(c) **2D**: Die Geometrie des Streichwehrs und die Topografie des Überflutungsbereichs werden modelliert.  $C_M$  muss für diese Simulation nicht spezifiziert werden.

Beispiele für diese Ansätze sind auf der BASEMENT-Webseite zu finden ([www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch) > Download > Test cases).

Abbildung 24

(a) 1D-, (b) gekoppelter 1D-2D- und (c) 2D-Ansatz, die in der Software BASEMENT zur Simulation der seitlichen Entlastung an einem seitlichen Entlastungsbauwerk verwendet werden.



### 4.3.2 Vergleich verschiedener Modellansätze

1D- oder gekoppelte 1D-2D-Modelle sind für gerade Flussläufe am besten geeignet. Diese Modelle benötigen in der Regel weniger topografische Daten und eine kurze Rechenzeit. Keiner dieser Modelltypen zeigt die Strömungsablenkung im Hauptgerinne und im Überflutungsbereich. Gekoppelte 1D-2D-Modelle können von Vorteil sein, wenn das Strömungsfeld im Überflutungsbereich von Bedeutung ist. Was die seitliche Entlastung betrifft, so ist der seitliche Überfallkoeffizient der empfindlichste Parameter, und eine entsprechende Sensitivitätsanalyse wird empfohlen. Gute Ergebnisse für rechteckige Gerinne mit scharfkantigem Wehr und für trapezförmige Gerinne mit dachförmigem Wehr können

mit dem seitlichen Überfallkoeffizient von Hager (1987) (Gl. 2) erzielt werden. Tabelle 3 zeigt einen Vergleich der 1D- und der gekoppelten 1D-2D-Simulationen mit der 2D-Simulation, bei der kein  $C_M$ -Wert notwendig ist, und mit dem physikalischen Experiment von Rosier (2007).

Für das 2D-Modell muss die Topografie angegeben und die Rauheit der Wehrkrone spezifiziert werden. Die seitliche Entlastung reagiert aber weniger empfindlich auf die Rauheit als das 1D- oder das gekoppelte 1D-2D-Modell auf den seitlichen Überfallkoeffizienten. Das 2D-Modell gibt die Strömungsablenkung im Hauptgerinne und im Überflutungsbereich an.

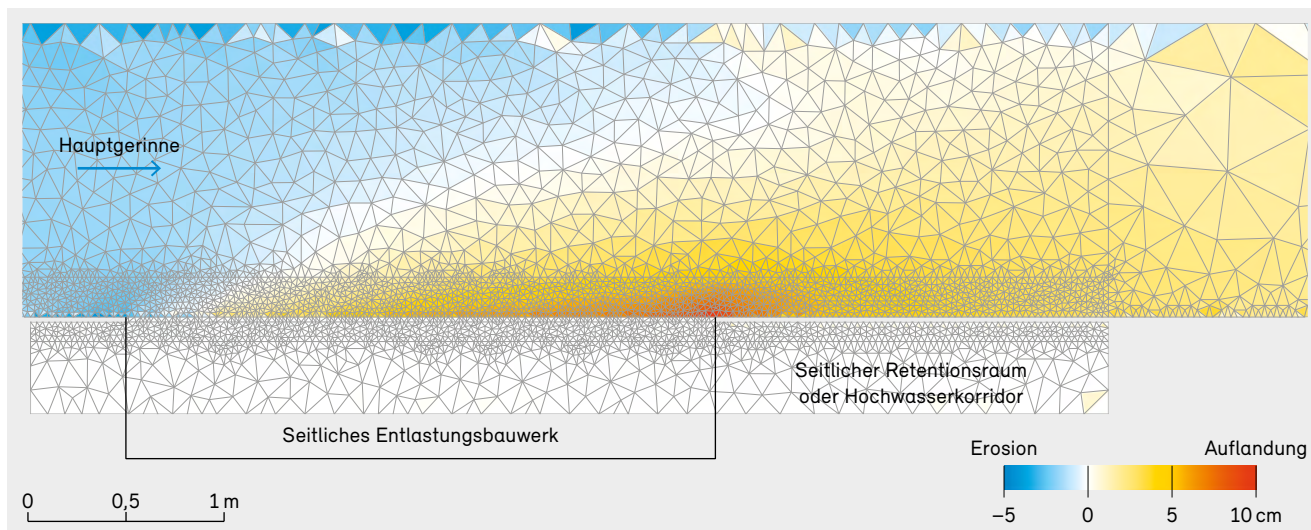
**Tabelle 3**

Vergleich der seitlichen Entlastung ( $Q_D$  in  $l s^{-1}$ ) zwischen den hydrodynamischen und morphodynamischen Simulationen und dem physikalischen Experiment B02 von Rosier (2007). Das rechteckige Gerinne hat folgende Abmessungen: Breite = 1,5 m, Sohlengefälle = 0,2 %, Länge des seitlichen Entlastungsbauwerks  $L = 3$  m, Wehrhöhe  $w = 10$  cm, konstanter Abfluss  $Q_0 = 181 l s^{-1}$ .

	Hydrodynamisch	Morphodynamisch	Morphodynamisch (mit Sohlsicherung)
Physikalisches Experiment von Rosier (2007)	–	52	–
1D-Modell ( $C_M = 0,6$ für alle 11 Senken-Termen)	33	48	43
Gekoppeltes 1D-2D-Modell ( $C_M = 0,6$ )	33	47	43
2D-Modell	32	42	40

**Abbildung 25**

Lokale Geschiebeablagerung entlang des Entlastungsbauwerks und Auflandung flussabwärts im Hauptgerinne (2D-Modell des Versuchs B02 von Rosier [2007], seitliches Entlastungsbauwerk  $L = 3$  m).



### 4.3.3 Auswirkungen der Morphodynamik

Zur Bemessung von seitlichen Entlastungsbauwerken in Fließgewässern mit ausgeprägtem Geschiebetransport werden morphodynamische Simulationen empfohlen. Die Auflandung flussabwärts des Streichwehrs und die daraus resultierende höhere seitliche Entlastung lassen sich mit allen drei Modellansätzen simulieren. Die räumliche Ausdehnung der lokalen Geschiebeablagerung im Bereich des Streichwehrs kann allerdings mit einem 1D-Modell nicht erfasst werden. Seitliche Entlastung, Auflandung sowie Geometrie und Lage der lokalen Geschiebeablagerung, die im morphodynamischen 2D-Modell (Abb. 25) berechnet wurden, stimmen gut mit den Ergebnissen der physikalischen Experimente von Rosier (2007) überein.

Tabelle 3 vergleicht die seitliche Entlastung für die hydro- und morphodynamischen Simulationen sowie das physikalische Experiment von Rosier (2007). Die seitliche Entlastung ist in den morphodynamischen Simulationen, in denen die Geschiebeablagerung berücksichtigt wird, deutlich grösser. Im rein hydrodynamischen Modell könnte die seitliche Entlastung unterschätzt und der

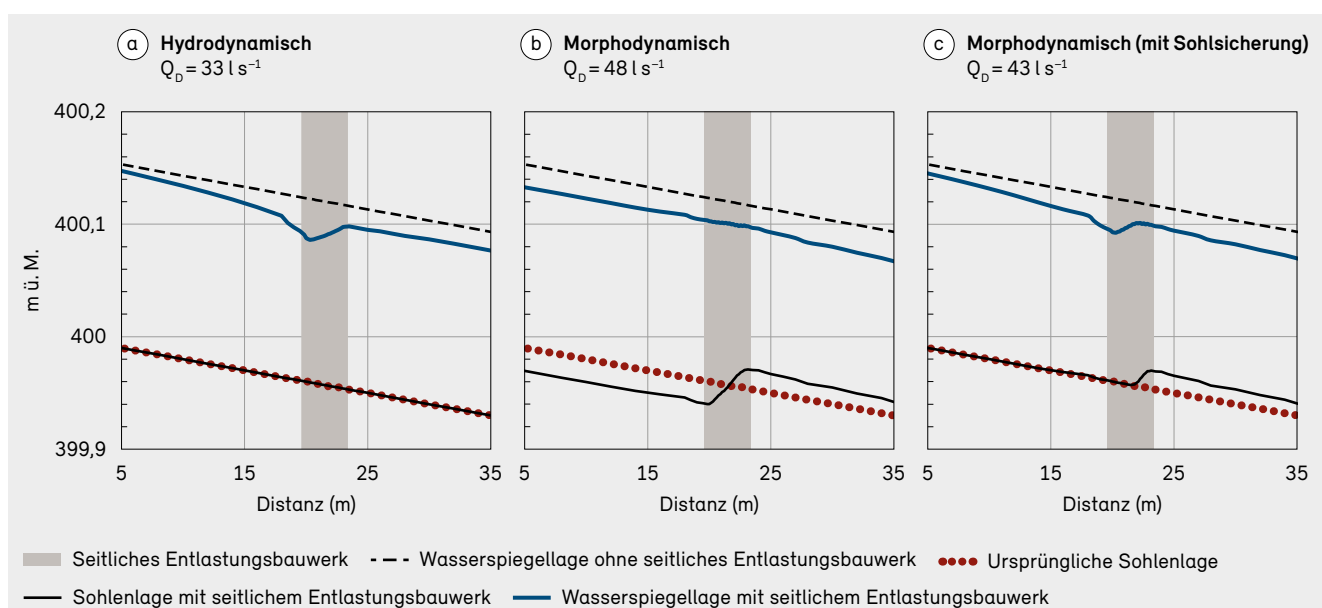
Retentionsraum oder der Hochwasserkorridor könnten mit einer ungenügenden Kapazität bemessen werden.

Die Wasserspiegel- und die Sohlenlage für die hydrodynamische Simulation und für die morphodynamischen Simulationen mit und ohne Sohlsicherung sind in Abbildung 26 für den 1D-Modellansatz dargestellt. Mit den 1D-2D- und 2D-Modellansätzen werden die gleichen Ergebnisse erzielt. Stromabwärts des Streichwehrs kann sich eine beträchtliche Menge an Sedimenten ablagern und folglich die Querschnittsfläche verringern (Abb. 26b). Unterhalb des Streichwehrs ist weniger Wasser im Gerinne, so dass es zu keinem Anstieg des Wasserspiegels kommt (Abb. 26). Aufgrund der Staukurve vor der seitlichen Entlastung (Abb. 26a) wird eine Sicherung der Sohle empfohlen (Tab. 3 und Abb. 26c). Die Auflandung im Hauptgerinne und die lokale Geschiebeablagerung im Bereich des Streichwehrs nehmen mit zunehmender Länge des seitlichen Entlastungsbauwerks zu.

Im Gegensatz zur Auflandung im Hauptgerinne und der lokalen Geschiebeablagerung im Bereich des Streichwehrs reagiert die seitliche Entlastung rasch auf

Abbildung 26

Wasserspiegel- und Sohlenlage für den 1D-Modellansatz, für (a) hydrodynamische, (b) morphodynamische und (c) morphodynamische (mit Sohlsicherung) Simulationen. Die Einstellungen der Simulationen sind in Tabelle 3 beschrieben.



Abflussänderungen. Die Analyse mit einer kurzen Hochwasserganglinie zeigt im Vergleich zu einer Simulation mit einer langen Hochwasserganglinie weniger Auflandungen im Hauptgerinne, weniger lokale Geschiebeablagerungen im Bereich des Streichwehrs und eine geringere seitliche Entlastung. Während des abfallenden Asts der Hochwasserganglinie werden die Auflandungen im Hauptgerinne und die lokalen Geschiebeablagerungen im Bereich des Streichwehrs wieder vollständig abgetragen und die vor dem Hochwasser vorhandene Sohlenlage wird wiederhergestellt.

#### 4.3.4 Einfluss der räumlichen Diskretisierung

Das Hauptgerinne in 1D- oder gekoppelten 1D-2D-Modellen wird mit Querprofilen diskretisiert. Für hydrodynamische Simulationen können Wassertiefe, Geschwindigkeit und seitliche Entlastung mit drei bis vier Querprofilen entlang des Streichwehrs simuliert werden. Mehrere Querprofile (bis zu 10) entlang des Streichwehrs führen zu glatteren morphodynamischen Simulationsergebnissen.

In 2D-Modellen wird das System räumlich in Gitterzellen unterteilt (Abb. 24c, 25). Am Streichwehr sind kleine Gitterzellen notwendig, um die lokale Geschiebeablagerung bei morphodynamischen Simulationen zu erfassen. Als Faustregel gilt, dass die Gitterzellen im Bereich des seitlichen Entlastungsbauwerks kleiner als  $B/20$  sein sollten, um die lokale Geschiebeablagerung im Bereich des Streichwehrs zu erfassen. Bei hydrodynamischen Simulationen und stromauf- und -abwärts des Streichwehrs können grössere Gitterzellen sinnvoll sein.

## 4.4 Empfehlungen für praktische Anwendungen

Empirische Ansätze (Gl. 1) können für eine grobe Schätzung der seitlichen Entlastung verwendet werden, sind aber auf stationäre Strömungsbedingungen beschränkt und berücksichtigen keine Sohlenveränderungen im Hauptgerinne. Die vorgestellten numerischen Modelle simulieren im Allgemeinen instationäre hydrodynamische Strömungen, wie etwa bei Hochwasserereignissen unter Berücksichtigung der Verminderung des Abflusses aufgrund der seitlichen Entlastung. Alle vorgestellten Modelltypen (1D, 1D-2D gekoppelt und 2D) zeigen die Auflandung

stromabwärts des Streichwehrs, die die seitliche Entlastung und damit die erforderliche Bemessungskapazität des Retentionsraums oder des Hochwasserkorridors erhöhen kann. Der seitliche Überfallkoeffizient  $C_M$  in den 1D- und den gekoppelten 1D-2D-Modellansätzen ist mit Unsicherheiten behaftet, während mit dem von Hager (1987) vorgeschlagenen vereinfachten Ansatz gute Ergebnisse erzielt werden können. In einem 2D-Modell wird  $C_M$  obsolet und zusätzlich zur Gerinneströmung kann auch die Strömung im Überflutungsbereich simuliert werden. Nur 2D-Modelle erfassen die lokale Geschiebeablagerung im Bereich des Streichwehrs, weshalb sie sich am besten für die Simulation von Sohlenveränderungen im Bereich von Entlastungsbauwerken eignen.

Die Vorteile (grün) und Nachteile (rot) der drei Modellansätze zur Simulation von seitlichen Entlastungsbauwerken sind in Tabelle 4 aufgeführt. Es wird empfohlen, seitliche Entlastungsbauwerke anhand von morphodynamischen Modellen zu konzipieren. Die Wahl des Modellansatzes zur Simulation der seitlichen Entlastung, d. h. 1D, 1D-2D gekoppelt oder 2D, hängt von den Modellanforderungen, der Datenverfügbarkeit und den Zielen ab.

Tabelle 4

Vorteile (grün) und Nachteile (orange bis rot) der drei Modellansätze zur Simulation der seitlichen Entlastung.

	1D	1D–2D gekoppelt	2D
Modell der seitlichen Entlastung	Senke, mit Gl. 1	Modellkopplung, mit Gl. 1	Geometrie des Streichwehrs
Parameter der seitlichen Entlastung	Für jedes Querprofil mit seitlicher Entlastung: <i>Wehrkronenhöhe</i> <i>Wehrkronenlänge</i> $C_M$	Wehrkronenhöhe $C_M$	<i>Rauheit</i> der Wehrkrone
<b>Hydrodynamische Ergebnisse</b>			
Vorhersage der seitlichen Entlastung	Gut	Gut	Gut
Strömung im Gerinne	Keine Umlenkung <sup>1</sup>	Keine Umlenkung <sup>1</sup>	Umlenkung
Strömung im Überflutungsbereich	Kein Überflutungsbereich	Ungefähres Strömungsfeld (90° am Zuflussrand)	2D-Strömungsfeld
<b>Morphodynamische Ergebnisse</b>			
Vorhersage der seitlichen Entlastung aufgrund von Ablagerung	Gut	Gut	Gut
Ablagerung	Auflandung flussabwärts gut, aber keine transversale Unterscheidung der lokalen Geschiebeablagerung	Auflandung flussabwärts gut, aber keine transversale Unterscheidung der lokalen Geschiebeablagerung	Gut
Relative Berechnungszeit	Kurz	Mittel	Lang

<sup>1</sup> Die Strömung im Hauptgerinne wird am seitlichen Entlastungsbauwerk nicht umgelenkt.

### Box 7: In der Praxis – Ökologische Flutung von Retentionsräumen

Eva Gerke, VAW, ETH Zürich

Das Ziel der ökologischen Flutung besteht darin, stabile, sich selbst erhaltende und hochwassertolerante Populationen zu etablieren, d. h. die Flora und Fauna an regelmässige Überflutungen zu gewöhnen (Meurer und Pfarr 2018). Seltene Überschwemmungen mit einer Wiederkehrperiode von 30 Jahren oder mehr sind dagegen für die dynamische Entwicklung der Biodiversität von Auen in Retentionsräumen nicht ausreichend.

Eine wirksame ökologische Flutung ist nur dann möglich, wenn das Wasser bereits bei geringerem Abfluss in die Retentionsräume abgeleitet werden kann. Dazu ist ein geregeltes Einlaufbauwerk erforderlich, das getrennt von dem für den Hochwasserschutz genutzten Entlastungsbauwerk positioniert werden kann. Der Retentionsraum muss frei durchströmt werden und sauerstoffarme Stillwasserzonen sind zu vermeiden. Eine hohe Fliessdynamik

begünstigt zudem die für Auen typischen Erosions- und Sedimentationsprozesse. Die Landnutzung ist ebenfalls zu beachten. Geeignet sind vor allem ursprüngliche Auen oder abgetrennte Auengebiete. Wenn der Retentionsraum bereits landwirtschaftlich genutzt wird, ist eine ökologische Flutung wenig sinnvoll. Bei einer gemischten Nutzung kann jedoch ein Teil der Fläche für eine ökologische Flutung in Frage kommen.

Ein Beispiel für die Durchführung von ökologischen Flutungen ist das Hochwasserrückhaltegebiet Altenheim am Oberrhein in Baden-Württemberg (Deutschland). Die Häufigkeit und Dauer der ökologischen Flutung ebenso wie der Umfang der Wasserentnahme werden gemäss dem jeweiligen Rheinabfluss gesteuert. Der Stand der Wiederherstellung der biotischen Lebensgemeinschaften in den Auen wird mit Stichproben überwacht. Insgesamt ist eine Entwicklung hin zu einer höheren Artenvielfalt und einer sichtbaren Dominanz hochwassertoleranterer Arten in den häufig überfluteten Bereichen festzustellen (Pfarr 2014).