

Lineare Durchgängigkeit an Kreuzungsbauwerken



Empfehlungen der
Oberen Wasserbehörde



Vorwort der Abteilungsleiterin

Liebe Leserinnen und Leser,

hier geben wir Ihnen eine Handlungshilfe für die Herstellung der Passierbarkeit an Kreuzungsbauwerken an die Hand.

Kreuzungsbauwerke stellen durch ihre häufig betonierte Sohle und den sich oft nachfolgend anschließenden Absturz Wanderhindernisse für zahlreiche aquatische Lebewesen dar. Sie trennen zusammengehörige Gewässerabschnitte und beeinträchtigen damit die betroffenen Ökosysteme.

Ein Ziel der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ist die Erreichung eines guten ökologischen Zustands des Gewässers. Zur Verwirklichung dieses Zieles ist die Gewährleistung der Passierbarkeit an Kreuzungsbauwerken von grundlegender Bedeutung.



Für die Wirksamkeit der Maßnahmen muss eine Betrachtung der Merkmale des jeweiligen Gewässers erfolgen. Denn nicht jede aufgezeichnete Lösung passt an jedem Standort. Eine Abstimmung mit den zuständigen Behörden ist daher in allen Fällen erforderlich.

In dieser Broschüre werden verträgliche und machbare Maßnahmen zur naturnahen Gestaltung von Kreuzungsbauwerken aufgezeigt. Denn, dass wir unsere Gewässer an verschiedenen Stellen kreuzen müssen, steht außer Frage. Damit stellen wir Ihnen einen Baustein bereit, um die Ziele der WRRL gemeinsam zu erreichen.

Wir hoffen, dass das vorliegende Werk Ihnen bei Ihrer Arbeit hilfreich ist und wünschen Ihnen eine interessante und aufschlussreiche Lektüre.

Ihre
Karin Ohm-Winter
Abteilungsleiterin Umwelt



Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	6
2. Grundlagen	6
2.1 Definition Kreuzungsbauwerke	6
2.2 Beeinträchtigung der linearen Durchgängigkeit durch Kreuzungsbauwerke	6
2.3 Anforderungen der Gewässerökologie an die Beschaffenheit von Kreuzungsbauwerken	9
2.4 Auswirkungen von Wanderhindernissen auf die Gewässerökologie	14
3. Maßnahmenkatalog	16
DuV.1 Neubau eines Durchlasses oder einer Verrohrung	18
DuV.2 Entfernen eines Durchlasses oder einer Verrohrung	22
DuV.3 Ersetzen eines Durchlasses oder einer Verrohrung	25
DuV.4 Sanierung eines Durchlasses oder einer Verrohrung	30
S.1 Beseitigen von Sohlenstufen <30 cm	35
S.2 Beseitigung von Sohlenstufen >30 cm	41
M.1 Umgestaltung eines Massivsohlenabschnitts	47
Literaturverzeichnis	53

1. Einführung

Fließgewässer werden seit Jahrtausenden durch den Menschen vielfältig genutzt. Durch anthropogenen Einfluss gelangen nicht nur umweltschädliche Substanzen in Gewässer, auch die natürliche Fließcharakteristik wurde vielerorts durch wasserbauliche Eingriffe verändert (Patt et al., 2009).

Uferbefestigungen, Maßnahmen zur Schiffbar-machung oder zur Begradigung beeinflussen naturraum-typische Lebensgemeinschaften und tragen wesentlich zur Fragmentierung von Lebensräumen in Fluss-Ökosystemen bei (Kemp & O’Hanley, 2010).

Die Wiederherstellung der Längsverbindung in Fließgewässern ist zu einem bedeutendem Ziel der Flussrenaturierung geworden (Lake et al., 2007).

So wird in der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) die Durchgängigkeit von Gewässern als wichtige Voraussetzung für die Ansiedlung, Entwicklung und den Bestand von gewässertypspezifischen Fischarten und benthischen Wirbellosen bewertet (EU, 2000).

Als durchgängig zählt ein Gewässer, wenn die Migration aquatischer Organismen und der Transport von Sedimenten nicht gestört wird (Keuneke et al., 2017).

Neben natürlich auftretenden Strukturen werden Gewässerabschnitte durch anthropogene Eingriffe voneinander getrennt. Großräumige Barrieren, wie Wasserkraftwerke und Staudämme, haben erhebliche Auswirkungen auf die Flussökologie (Williams, 2008).

In vielen Einzugsgebieten machen jedoch kleinere Hindernisse den Großteil der künstlichen Barrieren aus und haben einen starken Einfluss auf die lokale Artenzusammensetzung (Franklin & Bartels, 2012).

2. Grundlagen

2.1 Definition Kreuzungsbauwerke

Zur Überquerung von Fließgewässern werden Bauwerke quer zur Fließrichtung errichtet, welche als Kreuzungsbauwerke bezeichnet werden (siehe Tab. 1). Brücken verfügen über eine lichte Weite größer 2 m und einer eigenen Tragkonstruktion. Sie verringern den natürlichen Abflussquerschnitt nur um maximal 40 %. Kreuzungsbauwerke mit einer lichten Weite kleinere als 2 m werden als Durchlässe bezeichnet. Diese weisen i.d.R. einen freien Wasserspiegel auf, können jedoch den Abflussquerschnitt erheblich einengen.

Verrohrungen führen ein Gewässer unter flächenhaften Hindernissen hindurch, ihr Verhältnis von Länge zu Höhe ist größer 30. Furten kreuzen das Gewässer auf Höhe der Gewässersohle, wobei die abgeflachten Uferböschungen als Auffahrtrampen dienen. Überleitungen leiten ein Gewässer über eine Fläche bzw. Gewässer. Bei Dükern wird das Gewässer unter einem Hindernis ggf. unter Druck hindurchgeführt. (DIN 19661-1, 1998)

Technische Richtlinien für Kreuzungsbauwerke konzentrieren sich in der Regel auf hydraulische Gesichtspunkte. Für die Erhaltung von Lebensräumen und Gemeinschaften sowie der Durchgängigkeit eines Fließgewässersystems ist es jedoch erforderlich auch ökologische Anforderungen bei der Planung und Errichtung zu berücksichtigen

2.2 Beeinträchtigung der linearen Durchgängigkeit durch Kreuzungsbauwerke

Eine Vielzahl der vorhandenen Kreuzungsbauwerke wurde aus rein hydraulischer Sicht

Tabelle 1: Arten von Durchleitungsbauwerken (nach DIN 19661-1: 1998-07)

Bauwerk		
Brücke	Überleitung des Verkehrs	<ul style="list-style-type: none"> • Einengung des Abflussquerschnitts um max. 40 % • freier Wasserspiegel mit Freibord
Durchlass	Durchleitung des Gewässers unter Verkehrsweg	<ul style="list-style-type: none"> • i.d.R. freier Wasserspiegel • Erhebliche Einengung des Abflussquerschnitts
Verrohrung	Durchleitung unter großflächigen Hindernissen	<ul style="list-style-type: none"> • i.d.R. freier Wasserspiegel • Verhältnis Länge zu Höhe > 30
Furt	Kreuzung auf ähnlichem Niveau wie Gewässersohle	<ul style="list-style-type: none"> • Abgeflachte Uferböschung als Auffahrtrampen
Überleitung/ Düker	Durchleitung des Gewässers über/ unter Fläche, Hindernis oder Gewässer	<ul style="list-style-type: none"> • Düker: Durchleitung unter Druck

entworfen, wohingegen ihre Auswirkungen auf ökosystemare Prozesse nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Unsachgemäßer Einbau und fehlende Wartung tragen zusätzlich zur Problematik bei (Mueller et al., 2008). Dies führt vielerorts zur Unterbrechung des Fließgewässer-Kontinuums, insbesondere durch die Einschränkung der aufwärts gerichteten Wanderung. Abhängig vom Bauwerktyp, der räumlichen Ausdehnung, Errichtung und Unterhaltung können negative Auswirkungen und deren Ausmaß variieren (Jackson, 2003; Träbing et al., 2013).

Massiv befestigte Gewässersohle

Zu den ökologisch relevanten Beeinträchtigungen zählt eine durchgehende oder abschnittsweise Befestigung der Sohle mit Beton oder Sohlenpflasterung (Sellheim, 2001). Wird das natürliche Flussbett durch eine künstliche Struktur ersetzt, verändern sich die Bedingungen im Wanderkorridor stark. Durch die fehlende Substratauflage wird primär die Wanderung von Makrozoobenthos und bodenorientierten Fischen beeinträchtigt (LUBW, 2008). Durch die glatte Sohle er-

höht sich die Fließgeschwindigkeit und durch die Befestigung geht der Lebensraum des Interstitials (Lückensystem in der Gewässersohle) und die Möglichkeit zur vertikalen Wanderung der Makrozoobenthos verloren.

Reduzierter Fließquerschnitt

Während Brücken und Furten die Flussbreite nur geringfügig einengen, reduzieren Verrohrungen und Durchlässe den Fließquerschnitt meist erheblich. Da in den betroffenen Gewässerabschnitten die Fließgeschwindigkeiten stark zunehmen und vermehrt Turbulenzen auftreten (Coffman, 2005), sind insbesondere nicht ausreichend dimensionierte Kreisprofile nachteilig zu bewerten (Doehring et al., 2011).

Diese Auswirkungen können durch ein stärkeres Sohlengefälle des Bauwerks verstärkt werden. Innerhalb von Kreuzungsbauwerken treten häufig homogene Strömungsverhältnisse auf (Franklin & Bartels, 2012), wodurch Ruhezone fehlen. Zu lange Bauwerkslängen können so zu einer vorzeitigen Erschöpfung des Organismus führen, sodass dieser mit der Strömung abgetrieben wird (Coffman, 2005).



Abbildung 1: Massiv befestigte Sohle unter Rahmen-durchlass (Quelle: wrml.hessen.de, WH-ID 23833)

Sohlabsturz

Die erhöhte Fließgeschwindigkeit führt zusätzlich zu verstärkter Erosion, welche bei fehlender Nachbettsicherung am Auslauf des Bauwerks die Bildung von Sohlabstürzen begünstigt (siehe Abb. 3) (LUBW, 2008).

Auch errichtete Sohlstufen können zur Reduzierung des Sohlengefälles (z.B. Absturztrep-pen) ein Wanderhindernis darstellen (siehe Abb. 4) (Patt & Gonsowski, 2011).

Abhängig von der Höhe der Wasserspiegeldifferenz zwischen Unter- und Oberwasser können solche Barrieren nur für sprungstarke Arten oder gar nicht passierbar sein (Coffman, 2005).



Abbildung 3: Rohrdurchlass mit Absturz (Quelle: wrml.hessen.de, WH-ID 22027)



Abbildung 2: Rohrdurchlass ohne Substratauflage (Quelle: wrml.hessen.de, WH-ID 20812)

Wassertiefe

Tritt innerhalb des Bauwerks eine zu geringe Wassertiefe auf (siehe Abb. 5), verringert sich das Schwimmvermögen der Fische. Zusätzlich steigt das Risiko von Körperverletzungen bzw. die Gefahr erbeutet zu werden (Hotchkiss & Frei, 2007). Zusätzlich steigt das Risiko von Körperverletzungen bzw. die Gefahr erbeutet zu werden (Hotchkiss & Frei, 2007). Dies kann während Perioden mit geringem Niederschlag auftreten, vor allem wenn das Bauwerk über keine Niedrigwasserrinne verfügt.

Temporäre Beeinträchtigungen

Auch hohe Fließgeschwindigkeiten oder geringe Wasserstände während Hoch- oder



Abbildung 4: Maulprofil-Durchlass mit Absturztreppe (Quelle: wrml.hessen.de, WH-ID 99086)

Niedrigwasserperioden können vorübergehend eine Barriere darstellen (Kemp & O'Hanley, 2010). Eine temporäre Behinderung der Aufwanderung kann zudem infolge mangelnder Wartung, etwa durch Verklausungen, auftreten (siehe Abb. 6) (DWA, 2014)

Dunkelheit

Darüber hinaus können reduzierte Lichtverhältnisse und Abdunkelungen innerhalb des Kreuzungsbauwerkes für tagaktive Fischarten als Verhaltensbarriere wirken (Franklin et al., 2018; Keep et al., 2020). Diese Auswirkung konnte für Makrozoobenthos bislang nicht festgestellt werden.

Fehlende terrestrische Durchgängigkeit

Fehlende Randstreifen behindern die Wanderung terrestrischer und amphibischer Lebewesen (Sellheim, 2001). Dies ist vor allem an stark frequentierten Verkehrswegen von Bedeutung, um eine ungefährdete Bewegung entlang des Fließgewässers gewährleisten zu können.

2.3 Anforderungen der Gewässerökologie an die Beschaffenheit von Kreuzungsbauwerken



Abbildung 5: Verrohrung mit geringer Wassertiefe (Quelle: wrrl.hessen.de, WH-ID 94277)

Im Gewässerverlauf verändern sich die physikalischen Gegebenheiten: Flussbreite- und Tiefe, die Fließgeschwindigkeit, Abfluss und Temperatur ändern sich graduell (Vannote et al., 1980). Dementsprechend bildet sich auch ein biologischer Gradient aus, in dem sich die Standorteigenschaften in der Artenzusammensetzung widerspiegeln. Vannote et al. beschreiben erstmals 1980 modellhaft diesen Zusammenhang im Fließgewässerkontinuum-Konzept. Auch Fischarten weisen eine typische Abfolge im Längsverlauf des Gewässers auf, wodurch sich ein Fließgewässer von der Quelle bis zur Mündung in fünf Zonen einteilen lässt. Die Benennung der Zonen erfolgt entsprechend Huet (1949) nach der

vorkommenden Leitfischart bzw. nach der durch Illies (1961) eingeführten allgemeinen Nomenklatur. Diese differenziert allgemein in Bach (Rhithral) und Fluss (Potamal). Die Fischzonen unterscheiden sich u.a. hinsichtlich der hydraulischen Bedingungen, dem Artenspektrum und dem Sohlsubstrat (siehe Abbildung 7).

Fische wandern innerhalb, aber auch zwischen den Fließgewässerzonen entsprechend ihrer biologischen Bedürfnisse. Zur Gewährleistung der linearen Durchgängigkeit müssen Kreuzungsbauwerke den Ansprüchen der Arten der jeweiligen Fischregion entsprechen.



Abbildung 6: Treibgut am Einlass von einem Durchlass (Quelle: wrrl.hessen.de, WH-ID 10884)

Beeinträchtigung der Durchgängigkeit durch Kreuzungsbauwerke

- massiv befestigte Sohle ohne durchgängige Substratauflage
- reduzierter Fließquerschnitt und höheres Sohlgefälle im Vergleich zu angrenzenden Gewässerabschnitten
- homogene Strömungsverhältnisse mit erhöhter Fließgeschwindigkeit, Wasserturbulenzen und fehlenden Ruhezonen
- Sohlabsturz im Unterwasser des Bauwerkes
- geringe Wassertiefe innerhalb des Bauwerkes
- temporäre Beeinträchtigung durch Hoch-/ Niedrigwasser oder mangelnder Wartung
- lange Bauwerkslänge und reduzierte Lichtverhältnisse
- fehlende Uferbermen für terrestrische Wanderung

In diesem Zusammenhang müssen geometrische und hydraulische Anforderungen eingehalten werden. Die Bemessungswerte für einen Standort haben sich zum einen nach der schwimmschwächsten Art und zum anderen nach der größten zu erwartenden Fischart zu richten (DWA, 2014).

So wird sichergestellt, dass keine Größen- oder Altersselektion stattfindet. Fischwanderungen einzelner Arten finden das ganze Jahr über statt (DWA, 2014).

Daher sollte die Funktionsfähigkeit sowohl für Perioden mit geringem Abfluss (Q30) als auch hohem Abfluss (Q330) gewährleistet werden (BMLFUW, 2012). Die gewässerökologischen Anforderungskriterien werden im Folgenden näher erläutert.

Fließgeschwindigkeit

Maßgebend für die Passierbarkeit sind die hydraulischen Bedingungen während der Wanderung. Damit ein Fisch aufwärts wandern

kann, muss die Schwimmggeschwindigkeit des Fisches größer als die Fließgeschwindigkeit des Wassers sein (DWA, 2014).

Große leistungsstärkere Fische sind in der Lage kürzere Abschnitte mit einer Fließgeschwindigkeit größer als $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zu überwinden. Hindernisse mit größerer Längenausdehnung, wie etwa Verrohrungen oder den. Hindernisse mit größerer Längenausdehnung, wie etwa Verrohrungen oder Massivsohlenabschnitte, können dagegen nur bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten maximal $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ passiert werden.

Kleine, leistungsschwächere Fische hingegen können Fließgeschwindigkeiten von höchstens $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ überwinden bzw. maximal $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei längeren Hindernissen. (Kappler & Trier, 2018)

Kreuzungsbauwerke bieten aufgrund ihrer Bauweise nur wenige bzw. keine Ruhezonen, weshalb das Bauwerk meist in einem Bewegungsablauf überwunden werden muss. Da-

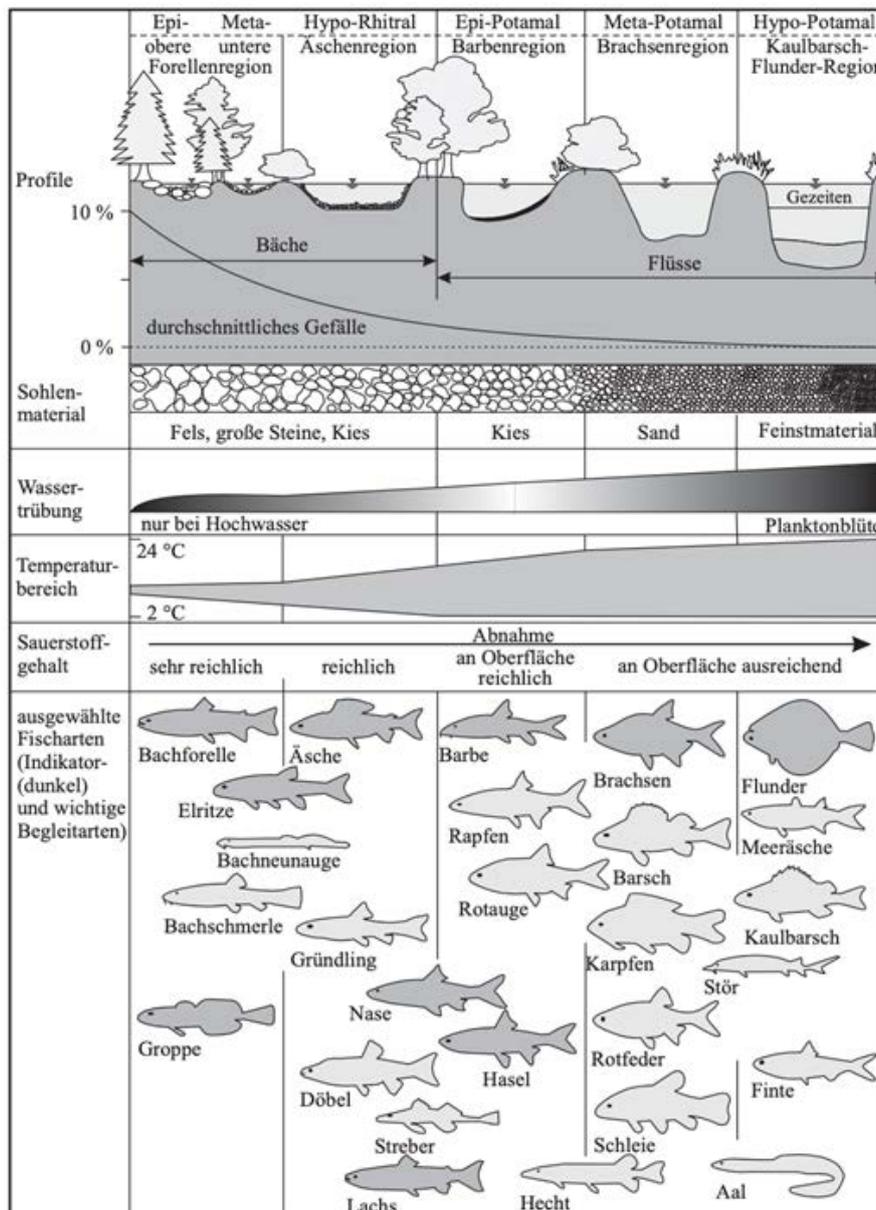


Abbildung 7: Fischregionen der Fließgewässer (Giesecke et al., 2014)

her gelten folgende hydraulische und geometrische Bemessungswerte:

Für Brücken gelten die hydraulischen Bemessungswerte für „fischpassierbare Raugerinne ohne Einbauten“ des DWA Merkblattes 509 (siehe Tab. 2) (Schmidt et al., 2019). Verschiedene Konstruktionsarten beeinflussen die Fließgeschwindigkeit unterschiedlich, sodass die Bemessungswerte ggf. entsprechend anzupassen sind. LfU (2005) und Schwevers et al., (2004) empfehlen bei Verrohrungen und

Durchlässen hingegen weitaus geringere max. Strömungsgeschwindigkeiten von weniger als 0,5 m s⁻¹. Eberstaller-Fleischanderl & Eberstaller (2014) schlagen für die Obere und Untere Forellenregion Geschwindigkeiten bis 1,5 m s⁻¹ bzw. in der Äschen- und Barbenregion 1,0 m s⁻¹ vor.

Wasserturbulenz

Auftretende Wasserturbulenzen im Wanderkorridor beeinflussen das Schwimmver-

halten von Fischen. Fischarten können zwar Turbulenzonen passieren (Adam & Lehmann, 2011), jedoch kann ihr Orientierungsvermögen beeinträchtigt werden sowie ihre Schwimmleistung durch den erhöhten Energieaufwand sinken (Pavlov et al., 2000, 2008). Der Turbulenzgrad wird ausgedrückt durch die spezifische Leistungsdichte, angegeben in $W \cdot m^{-3}$ (BMLFUW, 2012).

Die in Tabelle 3 abgebildeten natürlich auftretenden Leistungsdichten in typischen Bereichen von Fließgewässerzonen liefern diesbezüglich einen Anhaltspunkt für die hydraulische Auslegung von Kreuzungsbauwerken (Keuneke & Dumont, 2011).

Wassertiefe

Während bei juvenilen bzw. leistungsschwächeren Arten insbesondere die hydraulischen Bedingungen von Bedeutung sind, ist für große Arten vor allem eine ausreichende Dimensionierung ausschlaggebend für die Passierbarkeit. Fische vermeiden es mit dem Rücken über die Wasseroberfläche hinauszuragen,

sie bevorzugen, es sich innerhalb des freien Wasserkörpers fortzubewegen (DWA, 2014).

Für eine sichere Aufwanderung ist daher ein ausreichender Abstand zwischen Gewässer- sohle und Wasseroberfläche nötig. Die 2,5-fache Höhe des Fisches gilt hierbei als Mindestanforderung, wobei die Wassertiefe nicht kleiner als 10 cm sein sollte (LUBW, 2008). Darüber hinaus sollte der Wanderkorridor ebenso über eine Mindestbreite von der 3-fachen Dicke des Fisches verfügen (DWA, 2014).

Gewässersohle

Klein- bzw. Jungfische und benthische Wirbellose bewegen sich sohlennah bzw. im Lückensystem der Gewässersohle (Patt et al., 2009). Der so genannte Bereich des hyporheischen Interstitials bietet einen strömungsberuhigten Lebensraum und ermöglicht so schwimmschwachen Lebewesen die Wanderung (MUNLV, 2005).

Um eine ungehinderte Passierbarkeit durch das Kreuzungsbauwerk zu sichern, sollte die

Fließgewässerzone	Zulässige mittlere Fließgeschwindigkeit [$m \cdot s^{-1}$] im Wanderkorridor differenziert nach Länge des Raugerinnes		
	<5 m	5-10 m	10-25 m
Obere Forellenregion	1,6	1,4	1,2
Untere Forellenregion	1,5	1,3	1,1
Äschenregion	1,4	1,2	1,05
Barbenregion	1,3	1,1	0,95
Brachsenregion	1,2	1,0	0,9
Kaulbarsch-Flunder-Region	1,1	0,95	0,8

Tabelle 2: Bemessungswerte für die mittlere Fließgeschwindigkeit [$m \cdot s^{-1}$] im Wanderkorridor in Raugerinnen ohne Einbauten differenziert nach Länge des Raugerinnes (Tab. 28 aus DWA, 2014)

Fließgewässerzone	max. mittlere Gefälle [%]	Spezifische Leistungsdichte [W*m-3]
Obere Forellenregion	5,0	150-400
Untere Forellenregion	1,5	100-150
Äschenregion	0,75	50-100

Tabelle 3: Geschätzte spezifische Leistungsdichten [W m-3] in Fließgewässerzonen ($Q \leq MQ$) (nach Keuneke & Dumont, 2011)

natürlichen Gewässersohle beibehalten oder gewässertypisches Sohlsubstrat gezielt eingebracht werden (Schmidt et al., 2019).

Gewässer werden auf der Grundlage von übereinstimmenden morphologischen, physikalisch-chemischen, hydrologischen und biozönotischen Merkmalen in 25 Typen gegliedert und in Steckbriefen beschrieben (Döbbelt-Grüne et al., 2014; Pottgiesser, 2018).

Diese umfassen u.a. die Charakterisierung der natürlichen Substratzusammensetzung der unterschiedlichen Fließgewässertypen.

Die Substratauflage sollte im gesamten Bereich des Bauwerks über eine Mächtigkeit von mindestens 20 cm verfügen (Keuneke & Dumont, 2011; LUBW, 2008).

Anbindung an das Ober-/Unterwasser

Die am Gewässergrund wandernden Lebewesen können senkrechte Sohlstufen stromaufwärts nicht überwinden und sind somit auf die Anbindung an das Ober- und Unterwasser angewiesen. Auch die Fischwanderung wird bereits durch geringe Absturzhöhen deutlich beeinträchtigt (Zitek et al., 2007). Können Salmoniden bis zu 45 cm Höhenunterschied bewältigen, sind 5 cm für Kleinfischarten schon nicht überwindbar (Ovidio & Philippart, 2002; Vordermeier & Bohl, 1999). Um eine uneinge-

schränkte Durchwanderbarkeit für alle Arten sicherzustellen, sollte deshalb das Bauwerk niveaugleich in die Gewässersohle eingebunden und Sohlabstürze vermieden werden (Eberstaller-Fleischanderl & Eberstaller, 2014)

Ufer

Neben den im Wasser lebenden Organismen wandern auch Landtiere entlang des Fließgewässers, wie z.B. Reptilien, Amphibien, Marder- und Mäusearten, Biber, Fuchs, Dachs und Fischotter (Righetti et al., 2008). Um die Passierbarkeit zu ermöglichen, sollte daher ein ausreichender Wanderkorridor durch beidseitige Ufer- oder Trockenbermen zur Verfügung gestellt werden (LUBW, 2008). Die Mindesthöhe bzw. -breite der Lauffläche beläuft sich dabei auf 20-60 cm (Righetti et al., 2008)

2.4 Auswirkungen von Wanderhindernissen auf die Gewässerökologie

Fische und andere aquatische Lebewesen bewegen sich innerhalb einer Fischregion, aber auch zwischen den unterschiedlichen Regionen. Die Migration kann linear Strom auf- oder abwärts, aber auch lateral, also zwischen Haupt- und Neben- bzw. Stillgewässern, erfolgen. Die Art der Wanderungsbewegung ist allgemein abhängig von der Spezies, ihrem Entwicklungsstadium, sowie der Jahres-

Anforderungen an Kreuzungsbauwerke

- max. Fließgeschwindigkeiten in Durchlässen und Verrohrungen $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, Brücken entsprechend DWA M-509 Tab. 28 (2014)
- gewässertypische Wasserturbulenzen angrenzender Gewässerabschnitten beibehalten
- min. 10 cm Wassertiefe oder $2,5 \cdot \text{HöheFisch}$
- Gewässersohle mit durchgehender und gewässertypischer Substratauflage von min. 20 cm Mächtigkeit
- niveaugleiche Anbindung an das Ober- und Unterwasser
- terrestrische Durchgängigkeit durch seitliche Berme gewährleisten

zeit und erfüllt dabei unterschiedliche Funktionen. (MUNLV, 2005)

Kleinräumige Bewegungen innerhalb von Biomen können dabei für die Flucht vor Fressfeinden, die Revierverteidigung oder die Nahrungssuche notwendig sein. Für das Aufsuchen von Laichplätzen oder Teillebensräumen und den Erhalt der genetischen Variabilität sind großräumige Bewegungen zwischen den Biomen nötig. (Rodgers et al., 2017)

Die Konnektivität im Flussökosystem stellt eine wesentliche Variable dar, welche sowohl die Verteilung als auch den Bestand von Wasserorganismen reguliert (Fullerton et al., 2010). Strukturen, die die Wanderung der Lebewesen unterbinden, haben daher weitreichende Folgen für ökologische Prozesse. Im Gegensatz zur Aufwärtswanderung wird die abwärts gerichtete Wanderung von Organismen meist nur geringfügig durch Barrieren unterbunden (MUNLV, 2005). Die Auswirkungen von Barrieren sind einerseits bedingt durch die Hydrologie des Flusses, andererseits spielen auch die Dauer der Blockade, der Wanderhindernistyp und die physiologischen Arteigenschaften eine wesentliche Rolle (Northcote, 1998).

Für Arten, deren Lebensraumsprüche sich innerhalb ihres Lebenszyklus ändern, ist die Habitatverknüpfung besonders wichtig (Northcote, 1998). Sowohl diadrome als auch potamodrome Arten wandern zwischen Lebensräumen zum Aufzucht und Laichen. Wird diese Bewegung unterbunden, kann die Reproduktion und Lebensfähigkeit der Population gemindert bzw. verhindert werden (Lucas et al., 2001). Stromaufwärts von Wanderhindernissen können etwa bei diadromen Fischarten eine eingeschränkte Verbreitung bzw. reduzierte Abundanzen beobachtet werden (Kiffney et al., 2009).

Des Weiteren führt die Fragmentierung des Lebensraums zu einem Arealverlust der aquatischen Fauna, sodass flussaufwärts eine zunehmende Artenverarmung zu beobachten ist (MUNLV, 2005).

Die langfristige Überlebensfähigkeit einer Art ist abhängig von einer ausreichenden genetischen Diversität, damit sie sich an variable oder sich verändernde Umweltbedingungen anpassen kann. Durch Wanderbarrieren werden zusammenhängende Populationen in mehrere Subpopulationen unterteilt. Diese sind jedoch stärker vom Aussterben bedroht

und die genetische Vielfalt nimmt infolge von Gendrift und reduziertem Genfluss ab. (Gousskov, 2016).

Barrieren, die dauerhaft ein unüberwindbares Hindernis darstellen, können zur geographischen und genetischen Isolation führen (Wofford et al., 2005). So sind große Staudämme für die meisten Fischarten unpassierbar.

Durch den fehlenden Austausch mit den flussauf- und abwärts gelegenen Lebensräumen über mehrere Generationen hinweg nimmt die genetische Abgrenzung zwischen Teilpopulationen zu (Werth et al., 2011).

Da die Fische wichtige Merkmale zum Überleben innerhalb ihres Flussgebiets verlieren können steigt das Risiko für das Aussterben der Population aufgrund des mangelnden Genaustausches und der reduzierten Individuenanzahl (Gousskov, 2016).

Im Gegensatz dazu sind die Auswirkungen kleinerer Hindernisse unter Umständen weniger gravierend. Schwankende Abflussmengen und Wassertiefen können potenziell den Verlust der Konnektivität ausgleichen, indem bei Hochwasser die Wanderung zwischen

Gewässerabschnitten für einen begrenzten Zeitraum ermöglicht wird (Lucas et al., 2009).

Wanderhindernisse können auch dann eine selektive Wirkung haben, wenn die Barriere nur zeitlich begrenzt auftritt oder nur schwimmschwache Arten bzw. Individuen eines frühen Entwicklungsstadiums von den veränderten Bedingungen im Gewässer betroffen sind (Werth et al., 2011).

Ökologische Auswirkungen sind zudem abhängig von der Lage des Wanderhindernisses im Flussnetz.

Barrieren im Bereich von Flussmündungen haben auf diadrome Arten die größten Auswirkungen (Cote et al., 2009). Demgegenüber werden potamodrome Arten am stärksten durch Hindernisse im Mittellauf beeinträchtigt (Cote et al., 2009).

3. Maßnahmenkatalog

Im Folgenden werden technische Möglichkeiten zur Wiederherstellung und Wahrung der Durchgängigkeit an Kreuzungsbauwerken dargestellt. Dazu werden die Wanderhindernisse in drei getrennte Kategorien unterteilt:

Auswirkungen von Wanderhindernissen auf die Gewässerökologie	
Überblick	• Unterbindung der Wanderung in Teillebensräumen
	• geminderte Reproduktion und Lebensfähigkeit einer Population
	• Arealverlust einzelner Spezies und Artenverarmung
	• Trennung von Populationen und Verringerung der genetischen Diversität und Anpassungsfähigkeit
	• geographische und genetische Isolation
	• höhere Aussterbewahrscheinlichkeit
	• selektive Wirkung von teilweise passierbaren Hindernissen

- Durchlässe und Verrohrungen (DuV)
- Sohlenstufen (S)
- Massivsohlenabschnitte (M)

Ein Überblick über die je nach Problemlage unterschiedliche Vorgehensweise findet sich in Tabelle 4. Für jede Maßnahme wird sodann ein Maßnahmensteckbrief erstellt, in dem Ziele, Rahmenbedingungen und Empfehlungen zur Durchführung in komprimierter Form dargestellt werden.

Anhand einiger bereits umgesetzter Maßnahmen wird gezeigt, wie in diesen Fällen die Passierbarkeit wiederhergestellt werden konnte.

Die Gültigkeit der Handlungsempfehlungen kann in der Praxis durch variierende hydraulische, faunistische oder bautechnische Rah-

menbedingungen eingeschränkt werden. Eine abweichende Bauausführung kann insofern unter bestimmten Umständen notwendig werden.

Dennoch können die auf Grundlage des aktuellen Forschungsstandes erstellten Maßnahmensteckbriefe als grundsätzliche Orientierungshilfe angesehen werden.

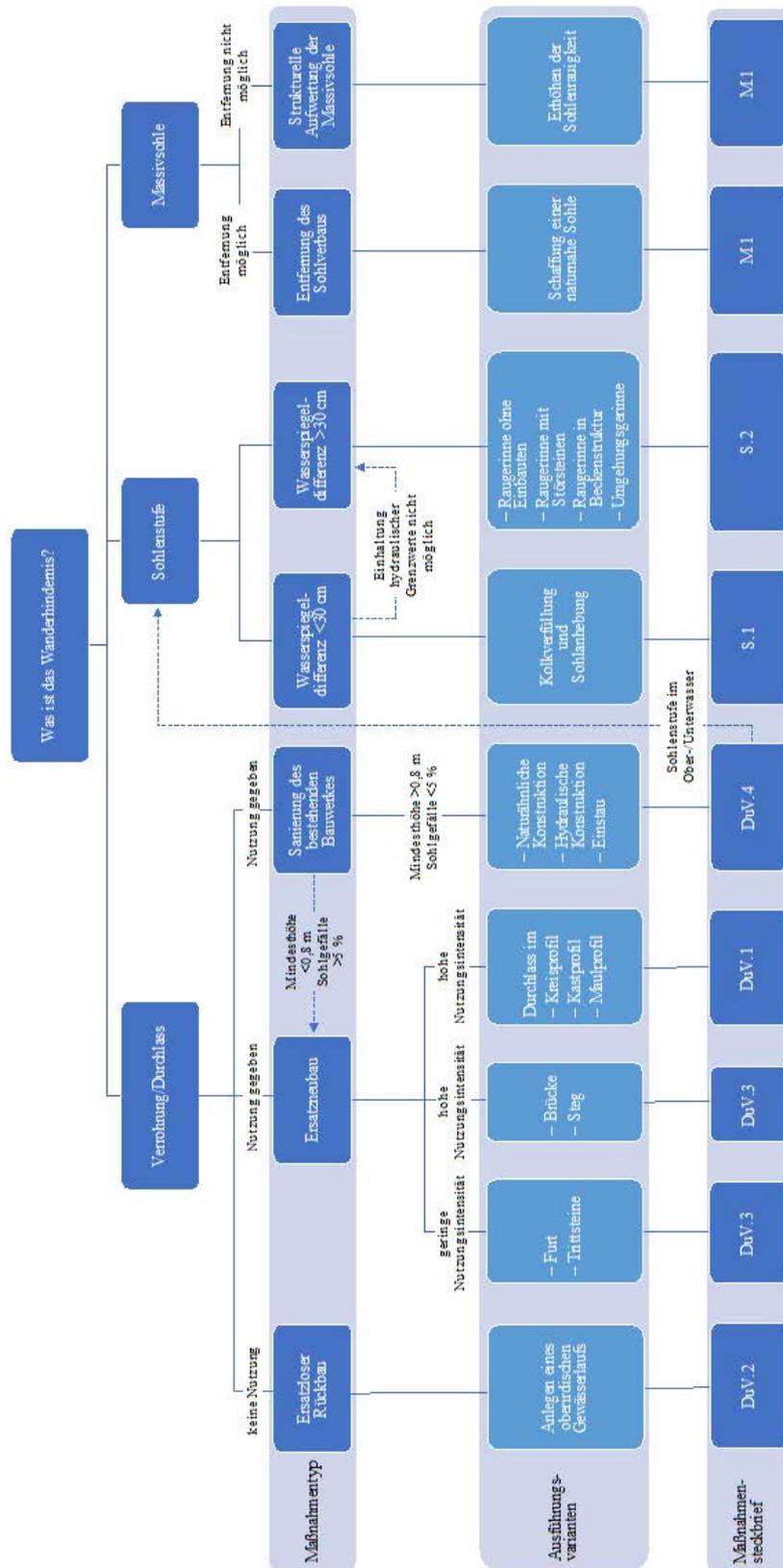
Welche Maßnahme im Einzelfall zu empfehlen ist, hängt von den Standortfaktoren und den bautechnischen Gegebenheiten des jeweiligen Bauwerkes ab. Liegen mehrere Defizite an einem Bauwerk vor, sind verschiedene Maßnahmen kombiniert umzusetzen.

Der folgende Entscheidungsbaum kann dabei als Orientierungshilfe dienen.

Einzelmaßnahmen	Maßnahmen Kürzel
Neubau eines Durchlasses oder einer Verrohrung	DuV.1
Entfernen eines Durchlasses oder einer Verrohrung	DuV.2
Ersetzen eines Durchlasses oder einer Verrohrung	DuV.3
Sanieren eines Durchlasses oder einer Verrohrung	DuV.4
Beseitigung von Sohlenstufen <30 cm	S.1
Beseitigung von Sohlenstufen >30 cm	S.2
Umgestaltung eines Massivsohlenabschnitts	M.1

Tabelle 4: Übersicht der vorgestellten Maßnahmen zur Schaffung der Durchgängigkeit an Kreuzungsbauwerken

Entscheidungsbaum für die Auswahl einer geeigneten Maßnahme



DuV.1 Neubau eines Durchlasses oder einer Verrohrung

Kurzbeschreibung und Ziel

- Bei einem Neubau können die Anforderungen der aquatischen und terrestrischen Fauna bereits während der Planung berücksichtigt werden.
- Ziel ist, den Eingriff in die Gewässerökologie zu minimieren und die uneingeschränkte Anbindung der Gewässerabschnitte durch die Einhaltung hydraulischer Grenzwerte zu gewährleisten.

Rahmenbedingungen

Ein bestehendes Bauwerk durch einen Neubau zu ersetzen ist insbesondere dann sinnvoll,

- wenn trotz einer Sanierung die Durchgängigkeit nicht vollständig hergestellt werden kann.
- wenn die Voraussetzungen für eine nachträgliche Sanierung nicht gegeben sind.

Bauformen

Kreisprofil:

- Bietet unter hydraulischen und statischen Gesichtspunkten Vorteile (Eberstaller-Fleischanderl & Eberstaller, 2014).
- Ist in Bezug auf die ökologische Durchgängigkeit und im Vergleich zu anderen Bauweisen jedoch als nachteilig zu bewerten (Eberstaller-Fleischanderl & Eberstaller, 2014).
- Bedingt durch Durchmesser, Bauhöhe und die nötige Überdeckung ist es vorzugsweise bei kleineren Fließgewässern mit steilen Ufern einsetzbar (Abb. 8a) (Eberstaller-Fleischanderl & Eberstaller, 2014).
- Häufig werden Fertigteile aus Beton, Stahl oder Kunststoff verwendet (Keuneke, 2011).

Maulprofil:

- Bietet einen breiten Abflussquerschnitt und eine geringe Bauhöhe (Abb.8b) (Speirs & Ryan, 2006).
- Die einzuhaltende Überdeckungshöhe richtet sich nach der verwendeten Spannweite (Keuneke, 2011).
- Die Verwendung von Material mit rauer oder strukturierter Oberfläche (z.B. Wellblech) kann die Ablagerung von Substrat begünstigen (Arnulf, 2007).

Kastenprofil:

- Wird sowohl bei kleineren als auch größeren Fließgewässern eingesetzt (Kapitzke, 2010b).
- Kann auch bei flachen Ufern angewendet werden, da keine Mindestüberdeckung notwendig ist (Abb. 8c) (Eberstaller-Fleischanderl & Eberstaller, 2014).
- Durch die Geometrie erfolgt ein günstiger Lastabtrag.

Zur Sohle geöffnete Profile:

- Geöffnete Profile sollten bevorzugt verwendet werden, um die natürliche Gewässersohle zu erhalten.
- Sowohl die halboffenen Maulprofile, auch genannt Bogenprofile, als auch die halboffenen Kastenprofile, auch genannt Haubenprofile, erfordern ein Streifenfundament. Ein Streifenfundament ist unerlässlich für den Lastabtrag und die Gewährleistung der Standicherheit (Abb. 8d).

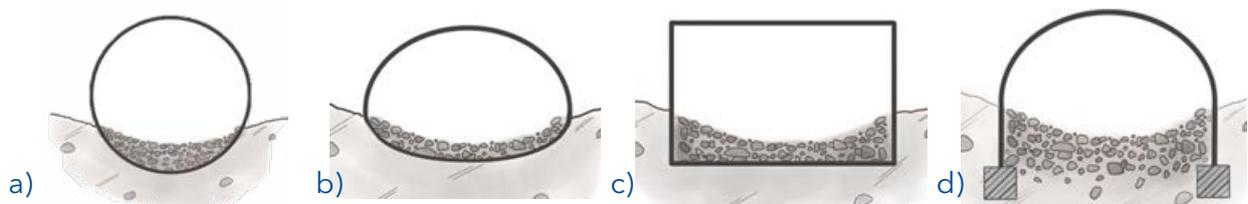


Abbildung 8: Querschnittsdarstellung a) Kreisprofil b) Maulprofil c) Kastenprofil d) Bogenprofil

Umsetzung

Die Passierbarkeit eines Bauwerks kann durch die Berücksichtigung der folgenden Einbaukriterien langfristig gewährleistet werden (Abb. 9):

- Die Bauwerkslänge ist auf das erforderliche Minimum zu beschränken (TLUG, 2011) und eine Laufkrümmung zu vermeiden (Gleim et al., 2010).
- Das Bauwerk ist entsprechend dem natürlichen Sohlgefälle am Standort zu verlegen (DIN 19661-1, 1998).
- Eine Mindesthöhe von 0,8 m über der Sohle ist einzuhalten (Epper, 2016). Die Breite des Mittelwasserbettes soll beibehalten werden bzw. der Durchmesser größer als hydraulisch notwendig gewählt werden (DIN 19661-1, 1998; TLUG, 2011). Ein einteiliger Querschnitt ist zu bevorzugen (Arnulf, 2007). Das Verhältnis von Durchmesser zu Länge sollte größer als 0,1 betragen (Lange & Lecher, 2000).
- Eine max. Fließgeschwindigkeit von $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei mittlerem Abfluss innerhalb des Bauwerkes ist zu gewährleisten (LUBW, 2008).

- Ausreichend dimensionierte Uferbermen an stark frequentierten Verkehrswegen und zur Vorbeugung von Wildunfällen sollten angelegt werden (Righetti et al., 2008). Mindesthöhe und -breite der seitlichen Laufstege müssen der Körpergröße der zu erwartenden Arten angepasst werden (Righetti et al., 2008). Laufflächen sollten möglichst flach ($\leq 1\%$) gestaltet werden und bei niedrigen bis mittleren Abflüssen passierbar sein. (ALN, 2017; LUBW, 2008).
- Ein naturnahes Gewässerbett soll hergestellt werden. Das Substratband muss durchgängig und min. 20 cm mächtig sein, sowie aus gewässertypischem Substrat bestehen (Keuneke & Dumont, 2011). Die Profilierung einer Niedrigwasserrinne ist sinnvoll, sodass auch bei geringen Abflüssen eine min. Wassertiefe von 10 cm gewährleistet werden kann (Hotchkiss & Frei, 2007).
- Das Bauwerk ist sohlengleich an das Ober- und Unterwasser anzubinden. Durchlässe mit geschlossenem Profil sind min. 10 cm bzw. $1/10 \cdot \text{Durchmesser}$, vorzugsweise 30–40 cm oder tiefer, unter die Gewässersohle einzubringen (DIN 19661-1, 1998; DWA, 2018).
- Einer Erosion der angrenzenden Gewässerabschnitte ist vorzubeugen, indem eine an den Standort angepasste Nachbetsicherung, abhängig von hydraulischer Belastung und dem anstehenden Material, auf 1–5 m Länge eingebracht wird (DIN 19661-1, 1998; TLUG, 2011). Zu bevorzugen sind naturnahe Bauweisen, wie etwa die Einbringung einer Steinschüttung (Träbing et al., 2013) oder die Einbringung einer durchgängigen Grund-/Sohlschwelle aus Wasserbausteinen (LANUV, 2017).

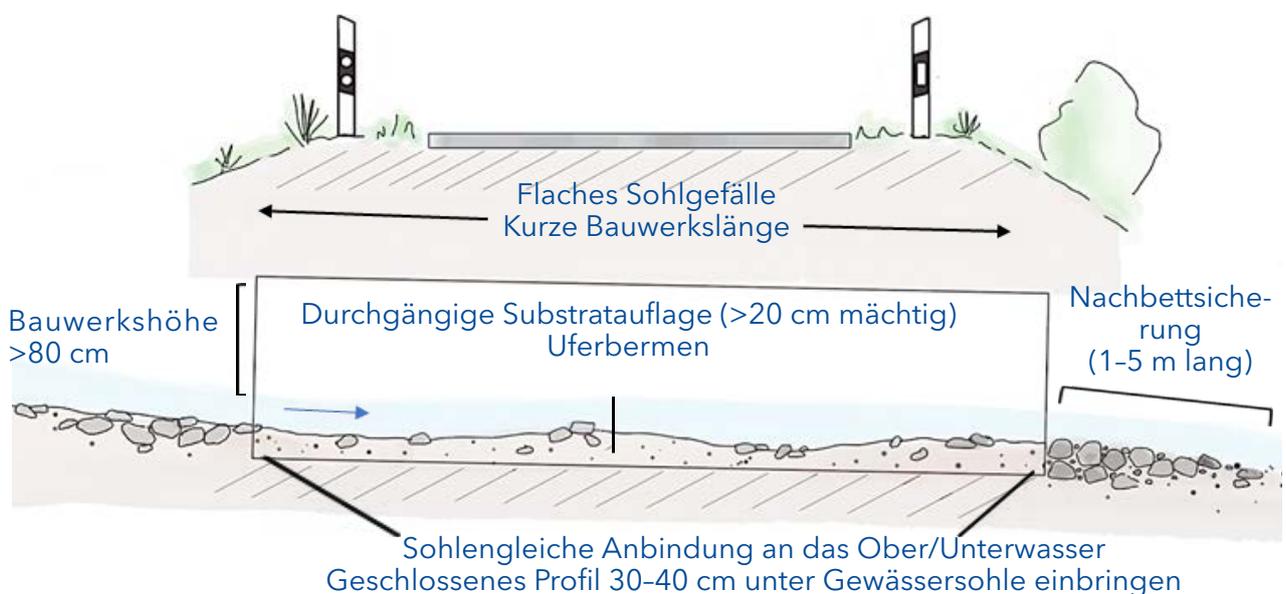


Abbildung 9: Prinzipskizze und Einbaukriterien eines Durchlasses/Verrohrung (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers)

Beispielabbildungen



Abbildung 10: Vorher (links): Durchlass mit geringer lichter Weite und Absturz (2007), Nachher (rechts): Kastendurchlass mit offenem Profil, Trockenbermen, Steinschüttung und vergrößerter lichter Weite (2015). Lage: Siegenbach (Weilburg-Drommershausen), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 61199



Abbildung 11: Vorher (links): Rohrdurchlass mit geringer lichter Weite und befestigter Sohle (2007), Nachher (rechts): Kastendurchlass mit offenem Profil, größeren lichten Weite und Steinschüttung im Unterwasser (2015). Lage: Grundbach (Weilburg-Drommershausen), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 61200



Abbildung 12: Vorher (links): Rohrdurchlass mit hoher Fließgeschwindigkeit und Absturz (2007), Nachher (rechts): Durchlass mit durchgängiger Substratauflage (2016). Lage: Mossaubach (Ober-Mossau), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 18941

DuV.2 Entfernen eines Durchlasses oder einer Verrohrung

Kurzbeschreibung und Ziel

- Eine Verrohrung bzw. ein Durchlass stellt einen weitreichenden Eingriff in den natürlichen Gewässerzustand dar und erfüllt häufig nicht ökologische Mindestanforderungen.
- Durch die Öffnung eines überbauten Gewässerabschnitts kann die Gewässerstruktur aufgewertet, die Barrierewirkung aufgehoben und ein naturnaher Zustand wiederhergestellt werden.

Rahmenbedingungen

Ein bestehendes Bauwerk kann

- bei fehlender Nutzung ersatzlos entfernt werden.
- bei baulichen Zwangspunkten teilweise geöffnet werden

Umsetzung

- Das bestehende Bauwerk ist teilweise bzw. vollständig zu entfernen und die entnommenen Bauteile sind fachgerecht zu entsorgen.
- Akkumuliertes, gewässeruntypisches Substrat mit hohem Feinsedimentanteil im Oberwasser sollte vorab entnommen werden, um einer Abdichtung des Interstitials vorzubeugen (TLUG, 2011).
- Ein oberirdischer, naturnaher Gewässerlauf ist mit gewässertypischen Eigenschaften und unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf umgebende Flächen wiederherzustellen (Abb. 13) (TLUG, 2011). Insbesondere folgende Gewässerstrukturparameter sind gewässertypisch auszubilden (nach Döbbelt-Grüne et al., 2014):
 - ▶ Laufentwicklung (Krümmung, Krümmungserosion, besondere Strukturen)
 - ▶ Längsprofil (Strömungsdiversität, Tiefenvarianz, Sohlsubstrat mit Fein-/Grobsediment und Totholz)
 - ▶ Querprofil (Profiltiefe, Breitenvarianz)
 - ▶ Uferstruktur (Bewuchs, besondere Struktur, Beschattung)
 - ▶ Gewässerumfeld (Gewässerrandstreifen, besondere Umfeldstrukturen)
- Die Gestaltung des Gewässerlaufes kann sich ggf. an der ursprünglichen Trassenführung des Gewässers orientieren (LANUV, 2017).

- Das mittlere Sohlgefälle sollte nach dem Rückbau im gewässertypischen Bereich liegen, um Sohlen- und Ufererosion zu vermeiden (TLUG, 2011). Diesbezüglich können lokale Maßnahmen zur Gefällereduzierung, wie eine Laufverlängerung bzw. ein entsprechendes Sohlenbauwerk errichtet werden (vergleiche auch S.1/2) (Patt, 2016; TLUG, 2011).
- Um eine eigendynamische Gewässerentwicklung zu fördern und die Sohle zu stabilisieren, können zusätzliche Begleitmaßnahmen, wie die Einbringung von gewässertypischem Geschiebe und Totholzelementen, durchgeführt werden (Castro, 2003).
- Bei der Neugestaltung der Ufer sind ggf. bestehende Nutzungsansprüche der Anlieger zu berücksichtigen (Syrbe & Grunewald, 2013).
- Ist die Gestaltung eines naturnahen Gewässerlaufes aufgrund räumlicher oder baulicher Restriktionen nicht möglich, kann ein Gerinne mit leitbildkonformen Ersatzstrukturen angelegt werden. Da eine eigendynamische Entwicklung eingeschränkt ist, sind Sohle und Ufer in naturnaher Bauweise zu gestalten, sodass zumindest eine durchgängige und gewässertypische Substratauflage sowie diverse Strömungsmuster gewährleistet werden. (DWA, 2018)

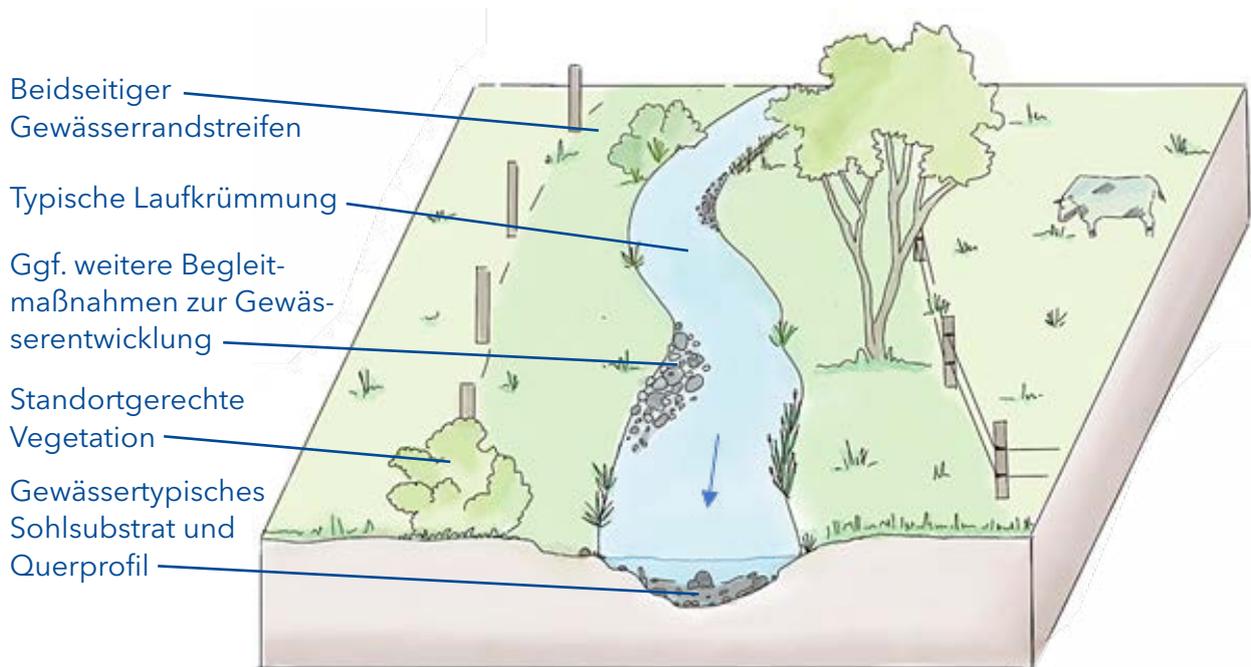


Abbildung 13: Prinzipskizze für die Gestaltung eines naturnahen Gewässerlaufes mit gewässertypischen Strukturmerkmalen (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers)

Beispielabbildungen



Abbildung 14: Vorher (links): Verlegter Wiesendurchlass (2007), Nachher (rechts): Vollständiger Rückbau und geöffneter Gewässerabschnitt (2014). Lage: Laubusbach (Selters), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 51595



Abbildung 15: Vorher (links): Rohrdurchlass mit hohen Fließgeschwindigkeiten und fehlender Substratauflage (2007), Nachher (rechts): Ersatzlose Entfernung des Rohrs (2015). Lage: Grundbach (Weilburg-Drommershausen), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 61201

DuV.3 Ersetzen eines Durchlasses oder einer Verrohrung

Kurzbeschreibung und Ziel

- Durch die Öffnung eines überbauten Gewässerabschnitts und das Ersetzen eines bestehenden Bauwerkes können vorhandene Defizite beseitigt werden.
- Ein Neubau in alternativer Bauweise kann unter Berücksichtigung gewässerökologischer Anforderungen einen effektiven Wanderkorridor schaffen.

Rahmenbedingungen

Ein bestehendes Bauwerk kann

- bei hoher Nutzungsintensität durch eine Brücke, Plattenüberfahrt oder einen Steg ersetzt werden.
- bei geringer Nutzungsintensität und verkehrstechnischen Ansprüchen durch eine Furt bzw. durch Trittsteine ersetzt werden.

Umsetzung

Hohe Nutzungsintensität

- Das bestehende Bauwerk ist vollständig rückzubauen und durch einen Brückenneubau zu ersetzen. Brücken stellen unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien vergleichsweise den geringsten Eingriff in die Gewässerökologie dar (Abb. 16) (Arnulf, 2007).
- Die Dimensionierung der Brücke richtet sich nach dem zu erwartenden Hochwasserabfluss, sodass der natürliche Abflussquerschnitt nur geringfügig eingengt wird. Bei kleineren Gewässern ist die Breite des Niedrigwasserbettes, bei größeren die des Mittelwasserbettes beizubehalten. (DIN 19661-1, 1998)
- Eine Mindesthöhe des Bauwerkes von 0,8 m oberhalb der Sohle ist zu gewährleisten (LANUV, 2017).
- Die Brückenwiderlager sind im Böschungsbereich außerhalb des Abflussquerschnittes, vorzugsweise hochliegend, anzuordnen (DIN 19661-1, 1998; Träbing et al., 2013).
- Bei größerer Spannweite sind weiträumige Turbulenzen durch eine abgestimmte Gestaltung und Positionierung der Brückenpfeiler außerhalb des Stromstrichs zu vermeiden (Fairfull & Witheridge, 2003).
- Das natürliche Sohlgefälle ist im Bauwerksbereich weiterzuführen und eine sohlengleiche Anbindung an das Ober- und Unterwasser zu schaffen (Schmidt et al., 2019).

- Die natürliche Gewässersohle ist beizubehalten bzw. eine gegliederte Sohlenstruktur auf der technischen Betonsohle aufzulagern (DWA, 2018). Dabei sollten eine ausreichend mächtige und gewässertypische Substratauflage sowie unterschiedliche Strömungsbe-
reiche zur Verfügung gestellt werden.
- Die hydraulischen Grenzwerte gemäß Tab. 28 des DWA-Merkblattes 509 (2014) sind zu beachten. Zur Einhaltung der Grenzwerte und Mindestwassertiefen ist die Rauheit der Sohle ggf. durch den Einbau von Rauheitselementen und Störkörpern (vgl. auch DuV.4) zu erhöhen. (DWA, 2014; Schmidt et al., 2019)
- Innerhalb des Bauwerkquerschnitts sind passierbare Uferbermen für niedrige bis mittlere Abflüsse anzulegen (LUBW, 2008). Diese sind mit möglichst natürlicher Oberfläche zu gestalten.
- Zur Ufer- und Sohlsicherung ist auf einen massiven Verbau zu verzichten, um das Eingriffsmaß auf die Natur zu begrenzen. Die Einbringung loser, unverfugter Wasserbau-
steine oder die Verwendung ingenieurbioologischer Bauweisen, wie etwa Faschinen, sind zu bevorzugen (Sellheim, 2001).
- Im land- und forstwirtschaftlichen Wegebau sind mit geringerem Bauaufwand Platten-
überfahrten, eine Zwischenform der Brücke und des Durchlasses, einsetzbar. Die Kon-
struktion verfügt über eine geringere lichte Höhe als Brücken, engt dennoch den Ab-
flussquerschnitt weniger ein als ein Durchlass (Abb. 17a). (Träbing et al., 2013)

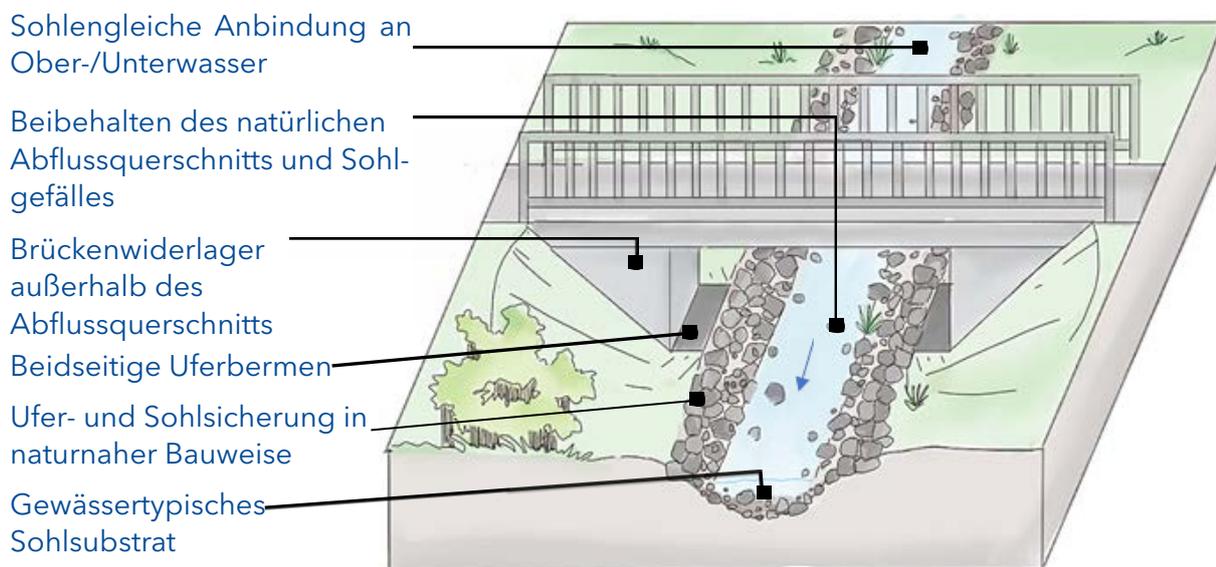


Abbildung 16: Prinzipskizze und Kriterien für die Errichtung einer passierbaren Brücke (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers)

- Wird das Kreuzungsbauwerk ausschließlich von Fußgängern und Radfahrern genutzt, ist alternativ ein Steg zur Überquerung des Fließgewässers geeignet. Die Tragfähigkeit, sowie die hydraulische Leistungsfähigkeit sind im Vergleich zu Brücken geringer (Epper, 2016). Stege sind auf Höhe des Ufers über das Gewässer zu spannen und die Widerlager vorzugsweise außerhalb des Abflussquerschnittes zu errichten (Abb. 17b) (Träbing et al., 2013).

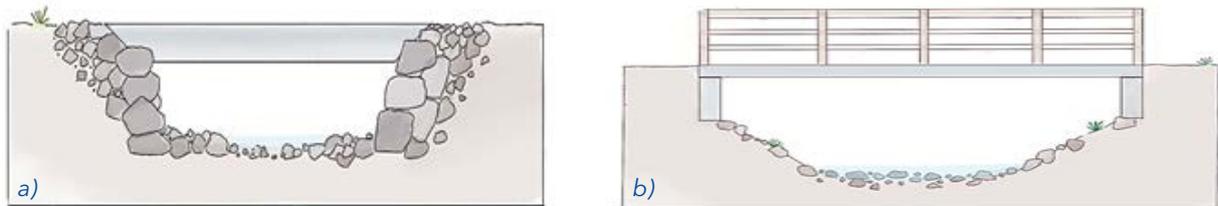


Abbildung 17: Schematische Darstellung a) einer Plattenüberfahrt b) eines Steges

Geringe Nutzungsintensität und verkehrstechnische Ansprüche

- Eine Furt ist vor allem im land- oder forstwirtschaftlichen Wegebau anstatt einer Verrohrung einsetzbar (Abb. 18) (Träbing et al., 2013).
- Für die Errichtung einer Furt sind ein geringer Mittelwasserstand bzw. nur eine temporäre Wasserführung sowie flache Uferböschungen Voraussetzung (Epper, 2016).
- Die Fahrspurbreite der Furt ist auf ein erforderliches Minimum zu beschränken (LUBW, 2008).
- Die Uferrampen sind nicht steiler als 1:10 auszuführen (DIN 19661-1, 1998) und können entsprechend den Nutzungsanforderungen gesichert werden (LUBW, 2008).
- Bei der Ausbildung des Fahrstreifens im Gewässer ist auf einen glatten Sohlverbau zu verzichten, um eine ausreichende Sedimentablagerung zu gewährleisten. Die Furt ist bei geringer Belastung aus gebietstypischem Steinmaterial zu gestalten (LUBW, 2008). Bei höherer Belastung sind die Fahrstreifen aus großformatigen Natursteinen mit min. 10 cm weiten Fugen auszubilden (Epper, 2016; Rödel, 2013).
- Die Querneigung des Fahrstreifens ist gering zu halten und der Niedrigwasserabfluss durch eine entsprechende Querschnittsgestaltung, zu bündeln (WBW Fortbildungsgesellschaft, 2010).
- Am Übergang zwischen Furt und natürlicher Gewässersohle ist eine Nachbettsicherung anzulegen, um fortschreitender Erosion vorzubeugen (Schaber-Schoor et al., 2008). Dazu kann eine erosionsstabile Steinschüttung als durchgängige Raue Rampe oder Sohlengleite ausgebildet werden (LUBW, 2008). Bei erhöhter Sohlenlage der Furt und zur Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit sowie Erhöhung der Wassertiefe kann ein Rückstau aus dem Unterwasser erzeugt werden (Epper, 2016). Dazu ist die Krone der Steinschüttung 10–20 cm höher als die Oberkante des Fahrstreifens anzulegen (Gleim et al., 2010; Rödel, 2013).

- Zur Sicherung des Fahrstreifens kann auch eine Sohlenschwelle errichtet werden, wobei ingenieurbio-logische Bauweisen, z.B. Pfahlbuhnen oder Steinriegel, zu bevorzugen
- Am Übergang zwischen Furt und natürlicher Gewässersohle ist eine Nachbetsicherung anzulegen, um fortschreitender Erosion vorzubeugen (Schaber-Schoor et al., 2008). Dazu kann eine erosionsstabile Steinschüttung als durchgängige Raue Rampe oder Sohlengleite ausgebildet werden (LUBW, 2008). Bei erhöhter Sohlenlage der Furt und zur Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit sowie Erhöhung der Wassertiefe kann ein Rückstau aus dem Unterwasser erzeugt werden (Epper, 2016). Dazu ist die Krone der Steinschüttung 10-20 cm höher als die Oberkante des Fahrstreifens anzulegen (Gleim et al., 2010; Rödel, 2013).
- Zur Sicherung des Fahrstreifens kann auch eine Sohlenschwelle errichtet werden, wobei ingenieurbio-logische Bauweisen, z.B. Pfahlbuhnen oder Steinriegel, zu bevorzugen sind (Epper, 2016; LUBW, 2008).
- Ggf. relevante Interessen von Unterliegern sind zu berücksichtigen, da die Querung der Furt mit einem Fahrzeug eine temporäre Gewässerverschmutzung verursachen kann (LANUV, 2017).
- Für Fußgänger kann parallel zur Furt ein Steg errichtet werden oder es können Trittsteine über die gesamte Gewässersbreite eingebracht werden (LUBW, 2008). Aus Sicherheitsgründen sind die Trittsteine mit einer flachen Oberfläche und aus Baumaterialien mit rutschhemmenden Eigenschaften, wie etwa naturrauer Granit, zu wählen. Um den Bewuchs auf der Oberfläche zu minimieren, sollten die Trittsteine bei mittlerem Abfluss nicht überschwemmt werden. (DWA, 2018)

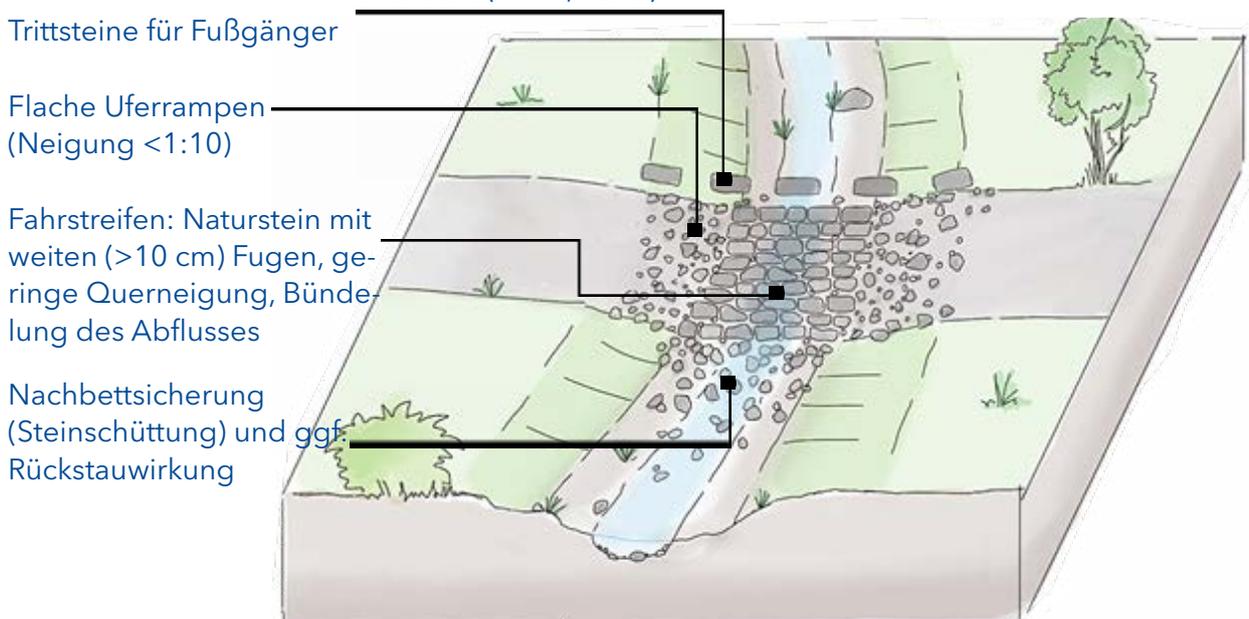


Abbildung 18: Prinzipskizze und Kriterien für die Errichtung einer passierbaren Furt mit befestigtem Fahrstreifen (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers)

Beispielabbildungen



Abbildung 19: Vorher (links): Glatter Rohrdurchlass ohne Substratauflage (2007), Nachher (rechts): Ersatz durch Brückenneubau (2016). Lage: Mossaubach (Ober-Mossau), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 18943



Abbildung 20: Vorher (links): Drei Durchlässe im Kreisprofil unter Landwirtschaftsweg (2007), Nachher (rechts): Ersatz durch Furt (2019). Lage: Vöhlerbach (Merenberg), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 6112

DuV.4 Sanierung eines Durchlasses oder einer Verroh DuV.4 Sanierung eines Durchlasses oder einer Verrohrung

Kurzbeschreibung und Ziel

- Bestehende ökologische Defizite innerhalb eines Durchlasses bzw. einer Verrohrung können durch eine Sanierung gezielt ausgeglichen werden.
- Ziel ist, durch den Einbau von gewässertypischem Material bzw. Störelementen im Bauwerk die Sohlenrauigkeit zu erhöhen oder einen Rückstau aus dem Unterwasser zu erzeugen, sodass sich eine durchgängige Substratauflage, überwindbare hydraulische Bedingungen und die nötige Mindestwassertiefe ausbilden können.

Rahmenbedingungen

- Hydraulische Bedingungen können bereits durch die Einbringung und Fixierung von natürlichem Material oder durch einen Einstau des Bauwerks verbessert werden. Bei ausgeprägten Geschwindigkeitsbarrieren sind hydraulische Konstruktionen zu bevorzugen (Clay, 1995).
- Voraussetzend für die Sanierung ist eine vorhandene Mindesthöhe des Bauwerks in Abhängigkeit von der Bauwerkslänge: 0,8 m (<50 m lang), 1 m (50-100 m lang) bzw. 1,2 m (>100 m lang) (DIN 19661-1, 1998).
- Ein Einbau von Störelementen ist bis zu einem Sohlgefälle von 5 % möglich (DWA, 2014; Larinier, 2002).
- Die Ableitung der veranschlagten Bemessungswassermenge des Bauwerks muss nach der Sanierungsmaßnahme gegeben sein (LUBW, 2008).

Umsetzung

Die Erhöhung der Sohlenrauigkeit kann durch unterschiedliche Konstruktionen und unter Verwendung verschiedener Materialien erfolgen. Die Auswahl einer geeigneten Vorgehensweise ist auf die vorhandene Bauwerksstruktur, die hydraulischen Eigenschaften des Gewässers und auf die fischökologischen Anforderungen abzustimmen (DWA, 2014; LUBW, 2008).

Naturähnliche Konstruktionen

- Auf die Bauwerkssohle ist eine mind. 20 cm mächtige Substratauflage mit gewässertypischer Korngrößenverteilung und Gestein einzubringen und ggf. mit unterschiedlichen Mitteln gegen Erosion zu schützen (Abb. 21a) (Clay, 1995; Kapitzke, 2010b).
- Zur Schubstabilisierung können versetzt angeordnete Holz- oder Betonschwellen verwendet werden, um das Ausspülen der Sedimentauflage zu verhindern (DWA, 2018).

- Zur Fixierung des Substrats auf der Sohle können auch Baustahlmatten oder Gitterroste (sog. Benthos-Pass) mittels Abstandsschienen eingebaut und individuell an die bestehende Geometrie der Bauwerkssohle angepasst werden (Abb. 21b). Dabei ist auf eine feste Verankerung zu achten, um auch höherer hydraulischer oder mechanischer Belastung standzuhalten. Die Ausbildung einer Niedrigwasserrinne kann unter bestimmten Gegebenheiten je nach Standortbedingungen notwendig werden. Die Einbringung von Sohlsubstrat mit geeigneten Korngrößen muss vorgesehen werden. Es ist auf die Korrosionsbeständigkeit der Baustahlmatten zu achten. Die Maschenteilung des Gitterrosts ist abhängig von den hydraulischen und hydromorphologischen Standortbedingungen zu wählen. Die Verankerung weiterer Strukturelemente, wie z.B. Flussbausteine, auf der Konstruktion ist möglich. Eine Initialfüllung aus gewässertypischem Substrat ist abschließend einzubringen. (LUBW, 2008; Ruiz Rodriguez & Salfner, 2018).

Hydraulische Konstruktionen

- Unterschiedliche Arten von künstlichen Störelementen können in regelmäßigen Abständen auf der Bauwerkssohle, senkrecht zur Strömungsrichtung, oder vertikal an der Innenwand angebracht werden:
 - ▶ Borstenelemente: Die Dimensionierung der Elemente, bestehend aus einer Trägerplatte mit gebündelten Borsten, richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten hinsichtlich der Wassertiefe, dem Bauwerksprofil und dem Baugrund. Die Borstenelemente können je nach hydraulischen Bedingungen wechselseitig oder mittig in regelmäßigen Abständen angebracht werden (Abb. 21c). Bei kleinem Durchmesser können weichere Borsten verwendet werden, die sich während eines Hochwassers umlegen. (Hassinger, 2006)
 - ▶ Störsteine: Anordnung in alternierenden Reihen mit wechselnder Anzahl an Störsteinen (Abb. 21d) (Feurich et al., 2011). Eine flexible Anpassung an die fischökologischen Anforderungen und Bauwerksgeometrie ist möglich (Duguay, 2014; Feurich et al., 2011; Franklin & Bartels, 2012). Sie zeigen im Vergleich zu anderen Systemen die beste ökologische Wirksamkeit (Feurich et al., 2011, 2012).
 - ▶ Eingekerbte und halblange, alternierende Riegel: Die Wanderung wird auch bei geringen Abflussmengen ermöglicht (Abb. 21e,f) (LUBW, 2008; Rajaratnam et al., 1989).
 - ▶ Versetzt angeordnete Riegel: Durch komplexere Anordnungsweise hydraulisch sehr effizient, ähneln einem vertikalen Schlitzpass und ermöglichen Wanderung auch bei geringem Abfluss (Abb. 21g) (Kapitzke, 2010b; McKinley & Webb, 1956).
 - ▶ Vertikale Strömunglenker: Die einseitige Anbringung von L-förmigen Elementen an der Innenwand verringert die Verlegungsgefahr und ist bei flachem Gefälle einsetzbar (Abb. 21h) (Kapitzke, 2010b, 2010c).

- In den jeweiligen Zwischenräumen der Elemente ist das Einbringen von lagestabilem Substrat notwendig. Bei den Korngrößen ist darauf zu achten, dass die Schleppspannung im jeweiligen Gewässers nicht überschritten wird, um dadurch dem Verdriften von Sohlsubstrat entgegenzuwirken.
- Störelemente können allgemein aus Beton, Holz, Metall oder Kunststoff gefertigt werden (LUBW, 2008).
- Die Entstehung starker Geschwindigkeitsgradienten an einzelnen Störelementen ist zu vermeiden, um die Wirksamkeit der Sanierung zu gewährleisten (Favaro et al., 2014; Stevenson et al., 2008).

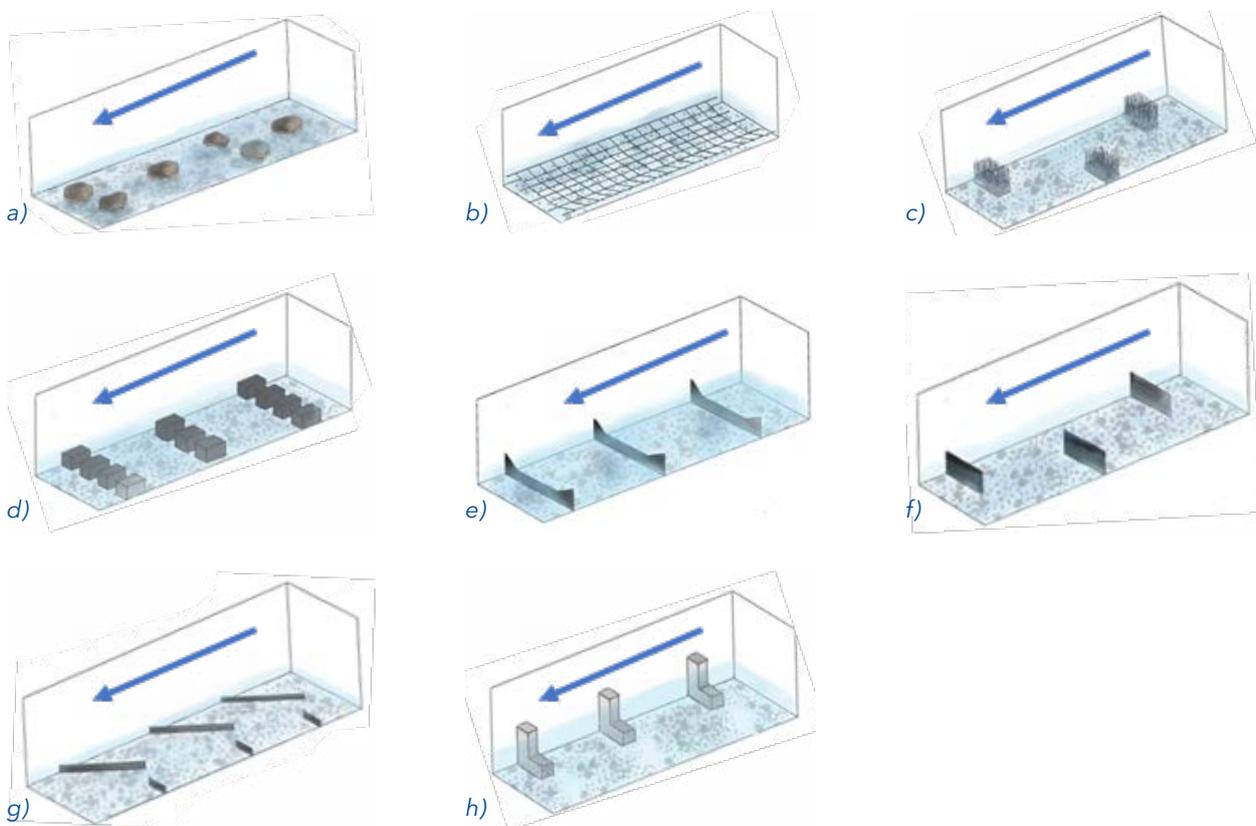


Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Kastendurchlasses mit Störkörpern (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers) a) verankerte Natursteine b) verankerten Baustahlmatten/ Gitterrost c) Borstenelemente d) Störsteine e) geschlitzte Querriegel f) halblange Querriegel g) versetzte Querriegel h) vertikale Riegel

Erzeugter Einstau des Bauwerkes

- Bei einem geringen Sohlgefälle kann ein erzeugter Rückstau aus dem Unterwasser (Kapitzke, 2010a) die Wassertiefe innerhalb des Bauwerkes anheben (LUBW, 2008) und zugleich die Fließgeschwindigkeit verringern sowie die Ablagerung von Sediment begünstigen (LUBW, 2007).

- Dazu ist im Unterwasser eine durchgängige Steinschüttung am Bauwerksauslass und überhöht zur Rohrsohle einzubringen (siehe Abb. 22) (LUBW, 2008; Ode et al., 2013; Righetti et al., 2008) (vergl. auch DuV.5).
- Die Steingröße ist entsprechend der auftretenden Schubspannung zu wählen, um die Standfestigkeit der Steinschüttung auch bei höherer Strömungsbelastung zu gewährleisten (LUBW, 2008).
- Das Rückstaubauwerk soll die bestehende Barriere beseitigen, ohne jedoch selbst die aquatische Wanderung zu behindern (LUBW, 2008).

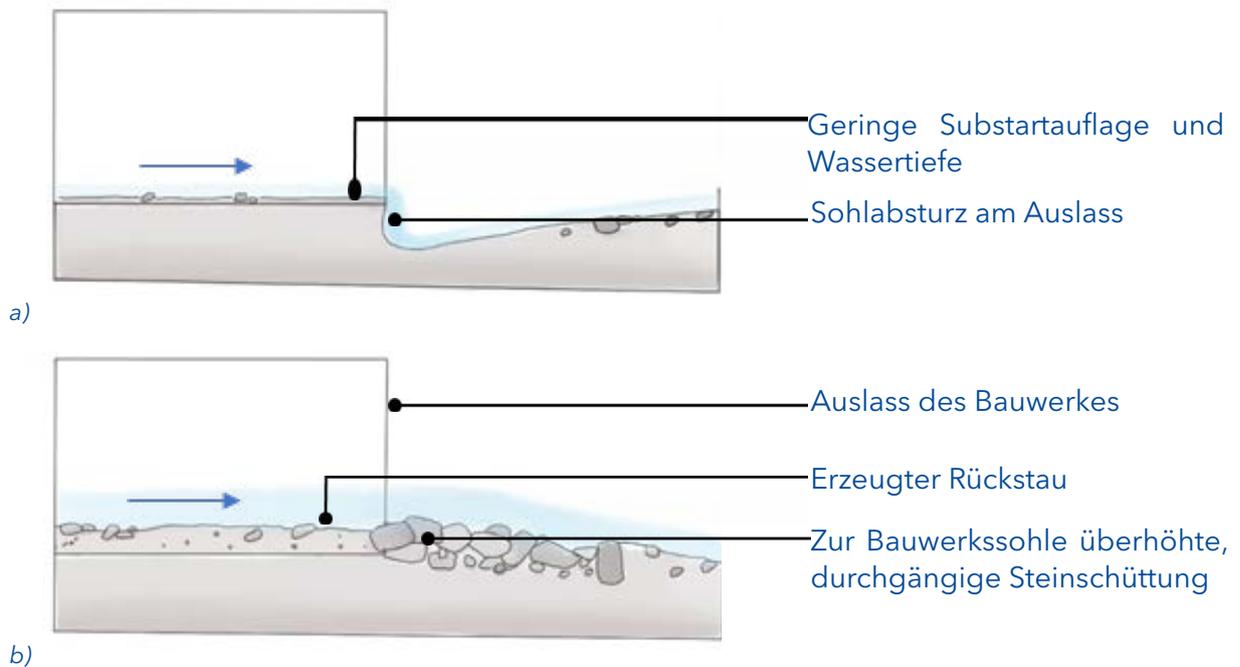


Abbildung 22: Schematische Darstellung a) eines Durchlasses mit Absturz (vorher) b) eines eingestauten Durchlasses/Verrohrung (nachher) (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers) (nach LUBW, 2008)

Beispielabbildungen



Abbildung 23: Vorher (links): Rohrdurchlass ohne Substratauflage und geringer Wassertiefe (2007), Nachher (rechts): Einbringung von Sohlsubstrat unterhalb sowie im Rohrdurchlass (2014). Lage: Eisenbach (Selters), Quelle: WRRL-Viewer WH-ID: 51829



Abbildung 24: Vorher (links): Fehlende Substratauflage im Rohrdurchlass (2010), Nachher (rechts): Versetztes Aufdübeln von halblangen Querriegeln (Holz) und Einbringung von Kies/Schotter (2016). Lage: Wurzelbach (Hoxhohl), Quelle: WRRL-Viewer WH-ID: 100629



Abbildung 25: Vorher (links): Fehlende Substratauflage im Durchlass (2007), Nachher (rechts): Fixierung von Gitterrosten auf der Sohle, Sicherung durch Baumstämme (2018). Lage: Eisenbach (Niederselters), Quelle: WRRL-Viewer WH-ID: 51311

S.1 Beseitigen von Sohlenstufen kleiner als 30 cm

Kurzbeschreibung und Ziel

- Die Anbindung an angrenzende Gewässerabschnitte kann bereits durch kleinere Sohlenstufen (<30 cm) im unmittelbaren Ober-/Unterwasser eines Bauwerks beeinträchtigt werden.
- Ziel ist, das Unterwasser niveaugleich an das Bauwerk anzuschließen und gegen Sohlenerosion zu sichern, um die Passierbarkeit langfristig zu gewährleisten.

Rahmenbedingungen

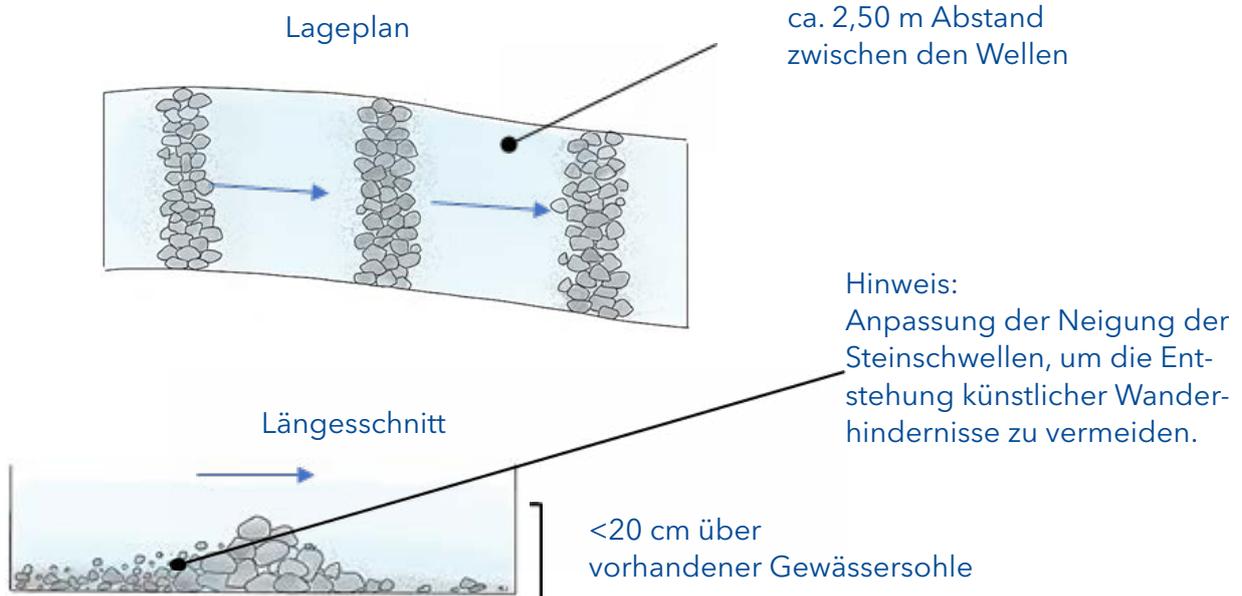
- Eine Sohlenstufe mit einer Wasserspiegeldifferenz kleiner als 30 cm kann mittels einer Steinschüttung und mit vergleichsweise geringem Aufwand durchgängig gestaltet werden.
- Eine eingetiefte Gewässersohle im Unterwasser kann zusätzlich mittels Grundswellen angehoben werden.
- Da erosionsbedingte Abstürze häufig als Folge zu hoher Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen auftreten (Clay, 1995), ist die Notwendigkeit zusätzlicher Maßnahmen (vergl. DuV.3) zu prüfen.

Umsetzung

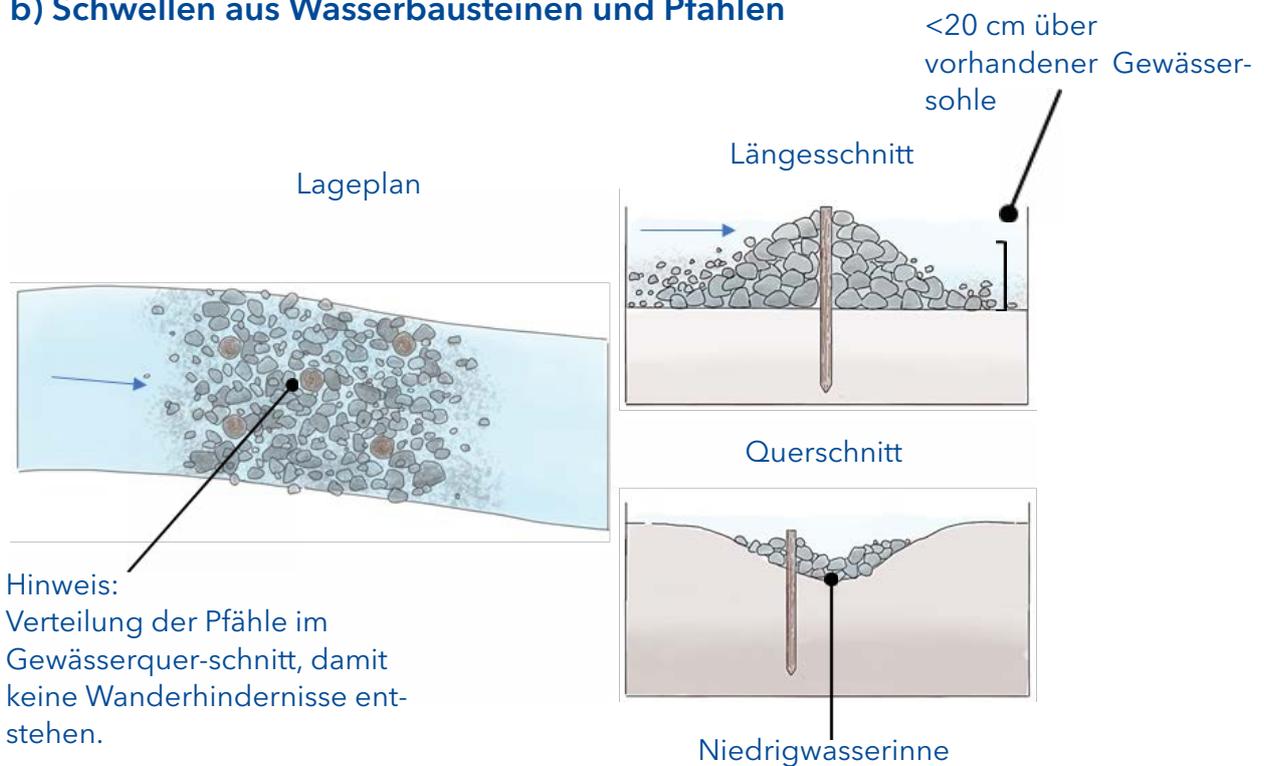
- Zur niveaugleichen Anbindung des Bauwerkes an das Ober-/Unterwasser ist eine Steinschüttung am Ein-/Auslass anzugliedern bzw. der ausgespülte Kolk im Unterwasser vollständig zu verfüllen (Abb. 26) (DWA, 2014).
- Die Steinschüttung ist vorzugsweise im typspezifischen Gefälle oder als raue Sohlengleite mit einer Neigung zwischen 1:15 und 1:20 oder flacher auszubilden, um die Entstehung von hohen und unpassierbaren Strömungsgeschwindigkeiten zu verhindern (Patt & Gonsowski, 2011). Um ideale Fließgeschwindigkeiten und Fließtiefen zu erreichen kann ein Gefälle von 1:30 bis 1:50 erforderlich sein (DWA, 2014).
- Können die max. Fließgeschwindigkeiten der Fließgewässerzone nicht eingehalten werden, ist anstatt ein fischpassierbares Raugerinne gemäß Steckbrief S.2 zu errichten.
- Um einer wiederholten Erosion vorzubeugen, ist das einzubringende Material entsprechend der auftretenden Schubspannung zu wählen. Beispielsweise können Wasserbausteine (DWA, 2014) oder gebietstypisches Material, welches zu 2/3 über einen erosionsstabilen Korngrößendurchmesser verfügen sollte (TLUG, 2011), verwendet werden.
- Die Steinschüttung kann ggf. überhöht zur Bauwerkssohle eingebracht werden, um einen Rückstau zu erzeugen (vergl. DuV.4) (DWA, 2014).
- Um den Untergrund nachhaltig vor Ausspülung zu schützen, ist zusätzlich eine auf den Standort abgestimmte Filterschicht aus Schotter, Kies, Sand oder Geotextil zu empfehlen (Männel, 2009).

- Bei geringer Geschiebeführung des Gewässers können Geschiebedepots mit einer breiten Kornmischung (30% Grobkornanteil) am Gewässerrand bzw. auf die Sohle eingebaut werden (Berg et al., 2003). Das Geschiebe wird im Gewässerabschnitt mit der Strömung verfrachtet und umgelagert, wodurch die Gewässersohle mittel- bis langfristig angehoben wird (Patt et al., 2018).
- Zur Erhöhung der Wassertiefe und Reduzierung der Fließgeschwindigkeit im Oberwasser sowie zur langfristigen Stabilisierung der Sohle durch Verringerung des Sohlgefälles können zusätzlich Grundswellen quer zur Fließrichtung errichtet werden (siehe Abb. 27) (Lange & Lecher, 2000).
- Entsprechend der Länge des eingetieften Gewässerabschnitts können einzelne oder mehrere Grundswellen hintereinander eingebracht werden, deren Abstand abhängig von Sohlgefälle und -material sowie der Gewässerbreite zu wählen ist (Berg et al., 2003).
- Grundswellen werden beidseitig bis in die Uferböschungen eingebunden (Patt & Gonsowski, 2011), um einer Umläufigkeit vorzubeugen (Berg et al., 2003).
- Um die ökologische Durchgängigkeit zu gewährleisten, ist eine Schwellenhöhe größer als 10 oder 20 cm zu vermeiden (Patt et al., 2018) und die Bauweise und -form entsprechend den standorttypischen Bedingungen zu wählen (Zerbe et al., 2009).
- Grundswellen können aus unterschiedlichen Elementen und in verschiedenen Konstruktionsweisen errichtet werden, beispielsweise als:
 - ▶ Höckerförmige Steinswellen: Höckerförmige Anordnung von mehreren großen und kleinen Wasserbausteinen in einer maximalen Höhe von < 20 cm (siehe Abb. 26a).
 - ▶ Wellen aus Wasserbausteinen und Pfählen: Bestehend aus einer Steinschüttung aus gebietstypischem Material, welche mittels der Anordnung von versetzten Holzpfählen gesichert wird. Um den Niedrigwasserabfluss zu bündeln, ist die Wellenkronen V-förmig zu gestalten (siehe Abb. 26b).
 - ▶ Totholzwellen: Beschwerung von Wurzelstöcken mittels längs liegender Baumstämme und zusätzlicher Fixierung durch Stahlseile an Eichenpfählen auf der Sohle (siehe Abb. 26c) (Berg et al., 2003).
 - ▶ V-förmige Holzwellen: Fixierung von Rundhölzern aus standorttypischem Gehölz mittels Pfählen auf der Gewässersohle. Durch die Neigung der Rundhölzer zur Gewässerachse hin wird der Niedrigwasserabfluss mittig gebündelt. Zusätzlich sind beidseitig regionales Steinmaterial, sowie größere Störsteine einzubringen. (Berg et al., 2003)

a) Hockerförmige Steinschwellen

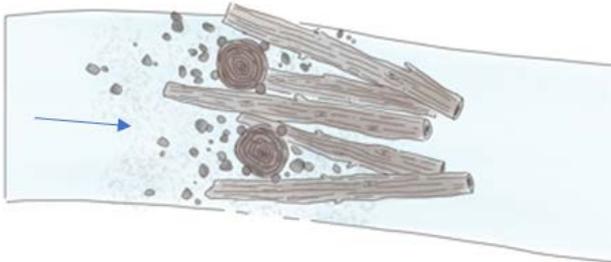


b) Schwellen aus Wasserbausteinen und Pfählen



c) Totholzschwelle

Lageplan



Querschnitt



Fixierung mit eingerammten Holzpählen und mit Drahtseil an Erdankern.

Abbildung 26: Lageplan, Längs- und Querschnitt von Grundschnellen a) Hockerförmige Steinschnellen b) Schnellen aus Wasserbausteinen und Pfählen c) Totholzschwelle (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers)

Ggf. Einstau des Bauwerkes erzeugen durch eine durchgängige Sohlenschwelle

Verfüllen des erosionsbedingten Kolkes im Unterwasser mit Wasserbausteinen oder gebietstypischem Material auf einem filterstabilen Unterbau

Anhebung des Unterwassers auf Länge des eingetieften Gewässerabschnittes mittels Grundschwellen

- Hockerförmige Steinschwellen
- Schwellen aus Wasserbausteinen und Pfählen
- Totholzschwellen
- V-förmige Holzschwellen

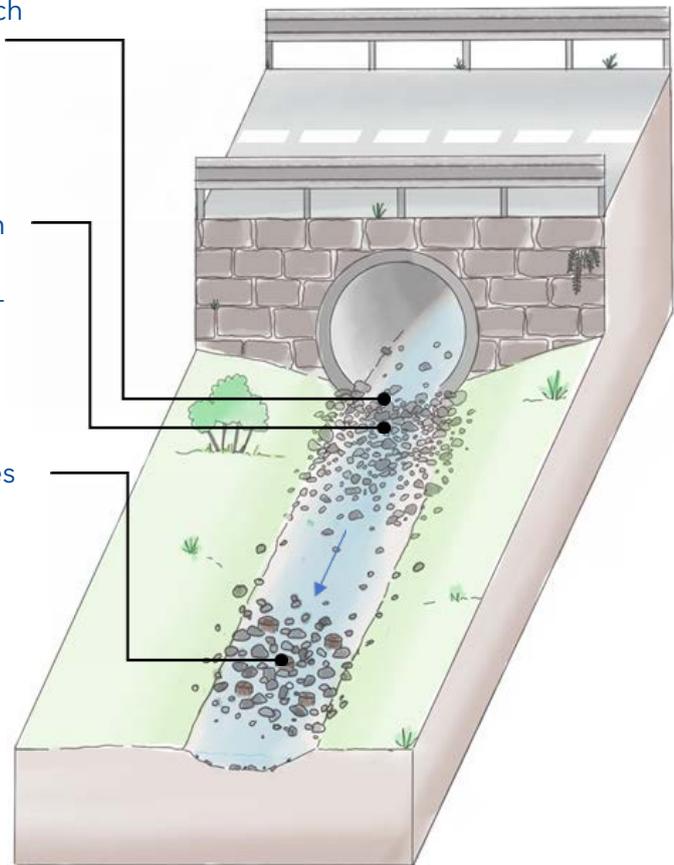


Abbildung 27: Prinzipskizze und Kriterien für den Ausgleich eines kleinen Sohlabsturzes (<30 cm) und Anhebung der Gewässersohle im Unterwasser eines Durchlasses/Verrohrung

Beispielabbildungen



Abbildung 28: Vorher (links): Kleiner Absturz (10 cm) unterhalb des Durchlasses (2007), Nachher (rechts): Anhebung des Unterwassers und Anlegen von Geschiebedepots (2014). Lage: Laubusbach (Münster), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 51600



Abbildung 29: Vorher (links): Kleiner Absturz (10 cm) unterhalb einer Wiesenverrohrung (2007), Nachher (rechts): Sohlhebung im Unterwasser mit Holzschwellen und Störsteinen (2019). Lage: Josbach (Halsdorf), Quelle: WRR-Viewer WH-ID: 21538

S.2 Beseitigung von Sohlenstufen größer als 30 cm

Kurzbeschreibung und Ziel

- Kreuzungsbauwerke weisen häufig unüberwindbare Sohlenstufen im unmittelbaren Unterwasser auf, welche entweder der effektiven Energieumwandlung dienen oder sich aufgrund fehlender Sohlensicherung und -erosion ausgebildet haben.
- Ziel ist es, den Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser gleichmäßig über die Fließstrecke und unter Berücksichtigung der hydraulischen und geometrischen Anforderungen der Fauna abzubauen, um eine Aufwanderung zu ermöglichen.

Rahmenbedingungen

Eine Sohlenstufe ist durchgängig zu gestalten, wenn

- die Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser unüberwindbar ist,
- zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten,
- eine glatte Bauwerkskontur die Wanderung beeinträchtigt (Patt et al., 2018).

Umsetzung

- Um die lineare Durchgängigkeit zu gewährleisten, ist die bestehende Sohlenstufe in ein passierbares Raugerinne umzugestalten.
- Bei der Umgestaltung einer Sohlenstufe sind unterschiedliche Vorgehensweisen möglich:
 - ▶ Vollständige Entfernung der bestehenden Sohlenstufe und stattdessen Errichtung eines Raugerinnes über die gesamte Gewässerbreite (Hanfland et al., 2009).
 - ▶ Teilabriss der Sohlenstufe durch Abtragung der Bauwerkskrone und Angliederung eines Raugerinnes auf der Abbruchkante (Hanfland et al., 2009).
 - ▶ Erhalt der Sohlenstufe und Angliederung eines Raugerinnes über die gesamte Gewässerbreite oder über eine Teilbreite. Die Krone der Steinschüttung ist ggf. überhöht zur Bauwerkssohle auszuführen, um einen oberwasserseitigen Rückstau zu erzeugen. Die Ausführung kann ggf. nicht dauerhaft die Durchgängigkeit gewährleisten. (DWA, 2014; Hanfland et al., 2009)
 - ▶ Erhalt der Sohlenstufe und Anlegung eines Umgehungsgerinnes (DWA, 2014).
- Im Vorfeld einer Entfernung sind ggf. auftretende Auswirkungen infolge einer Stau- und Grundwasserabsenkung auf bauliche Anlagen und Biotope im direkten Umfeld zu prüfen (Winkler, 2009).

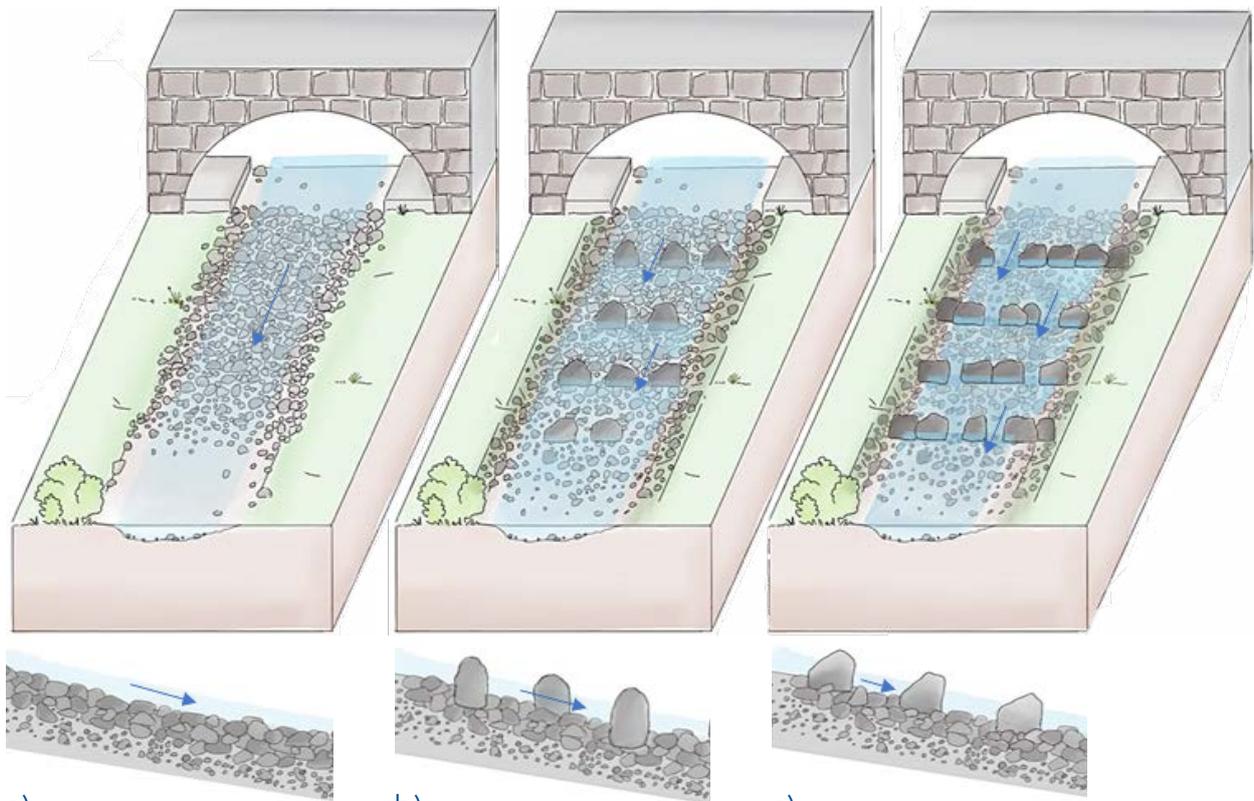
Fischpassierbares Raugerinne

- Die Wanderhilfe ist vorzugsweise in naturnaher Bauweise und in einer der folgenden Bauformen auszuführen:
 - ▶ Raugerinne ohne Einbauten (Abb. 30a): Gleichmäßig rau strukturierte Sohle, welche flächig mit einem regelmäßigen Strömungsbild überströmt wird. Ist hauptsächlich bei sehr geringem Sohlgefälle und geringer Länge einsetzbar, da Ruhezonen fehlen. Unter Umständen ist die Einbringung additiver Strukturen (geschwungene Linienführung, mehrere Raugerinneabschnitte hintereinander) nötig, um die Passierbarkeit zu gewährleisten. Die Ausführung ist in Schüttsteinbauweise (mehrlagige Steinschüttung) oder Setzpackbauweise (unregelmäßige Setzung aufrechtstehender, großer Wasserbausteine) möglich. (DWA, 2014; Männel & Maulhardt, 2009)
 - ▶ Raugerinne mit Störsteinen (Abb. 30b): Rasterförmige Einbringung von einzelnen, großen Wasserbausteinen auf der rau strukturierten Sohle und Ausbildung eines diversen Strömungsmusters. Steinabstand und -durchmesser sind entsprechend den erforderlichen geometrischen und hydraulischen Bemessungswerten zu wählen. Die Verwendung von dreiecksförmigen Steinen ist insbesondere zur erhöhten Standsicherheit, Ausbildung beruhigter Zonen und Verringerung der Verlegungsanfälligkeit zu empfehlen. (DWA, 2014; LUBW, 2015)
 - ▶ Raugerinne mit Beckenstruktur (Abb. 30c): Durch die Anordnung von Steinriegeln quer zur Fließrichtung kommt es zur Formung einzelner Becken, welche durch Durchlässe in den Riegeln miteinander verbunden sind. Die Ruhezonen in den Becken sind durch die Höhe der Steinriegel und den dadurch erzeugten oberwasserseitigen Einstau herzustellen. Abhängig von der Abflussmenge werden die Steinriegel überströmt oder ragen über die Wasseroberfläche hinaus. Max. Strömungsgeschwindigkeiten treten in den Durchlässen auf und dürfen die hydraulischen Bemessungswerte nicht überschreiten. (DWA, 2014)
- Um die allgemeinen Anforderungen der Lebewesen für den gesamten Abflussbereich zu erfüllen, ist eine Kombination der Bautypen zur Optimierung des Raugerinnes möglich (DWA, 2014; Keuneke & Dumont, 2011).
- Die konkrete Bemessung eines Raugerinnes orientiert sich an verschiedenen Kriterien. Folgende Vorgehensweise ist gemäß DWA-M 509 (2014) zu empfehlen:
 1. Bestimmung der Fischregion und des Grenzwertes für die spezifische Leistungsdichte bei der Energieumwandlung.
 2. Festlegung einer geeigneten Bauform unter Berücksichtigung der lokalen Topografie.
 3. Ermittlung des zu überwindenden Höhenunterschiedes zwischen Ober- und Unterwasser und Ableitung der erforderlichen Länge.

4. Ableitung der hydraulischen Bemessungswerte (max. Fließgeschwindigkeit, Leistungsdichte, Absturzhöhe) in Abhängigkeit von Fischregion, der Länge des Raugerinnes und dem hydraulischen Sicherheitsbeiwert für die jeweilige Bauform.
 5. Bestimmung des relevanten Fischartenspektrums.
 6. Ableitung der geometrischen Bemessungswerte (Wassertiefe, Beckenlänge/-breite, Steinabstand, Durchlassöffnung) bedingt durch das relevante Artenspektrum und den jeweiligen geometrischen Sicherheitsbeiwert der Bauform.
- Die Funktionsfähigkeit des Raugerinnes ist für geringe bis hohe Abflüsse (Q30 bis Q330, sog. Betriebsabfluss) zu gewährleisten (DWA, 2014).
 - Größe und Durchmesser der verwendeten Steine der Deckschicht sowie des filterstabilen Unterbaus sind entsprechend der hydraulischen Belastung zu wählen, um die Standsicherheit des Raugerinnes und ggf. vorhandener Stör-/Riegelsteine für den Bemessungsabfluss zu gewährleisten. (DWA, 2014).
 - Die Auffindbarkeit eines Raugerinnes auf einer Teilbreite des Gewässers ist sicherzustellen, um eine selektive Wirkung zu verhindern (DWA, 2014). Beeinträchtigungen durch schwankende Abflüsse sind zu berücksichtigen (LUBW, 2015).
 - Die Sohle von Raugerinnen ist durchgehend rau mit einer min. 30 cm mächtigen Substratauflage zur Bildung eines Lückensystems auszuführen und sohlengleich an Ober-/Unterwasser anzubinden. Die Gestaltung des Profils ist an die lokalen hydraulischen und hydrologischen Bedingungen anzupassen. Die Passierbarkeit ist für alle Betriebsabflüsse durch die Ausbildung einer Niedrigwasserrinne und einer zum Ufer ansteigenden Sohle (gerundetes, trapez- bzw. dreiecksförmiges Profil) zu gewährleisten. (DWA, 2014)
 - Um eine Erosion im Anschluss an das Raugerinne zu vermeiden, ist bei einer erosionsanfälligen Gewässersohle ein vorgeformter Kolk mit nachfolgender Nachbettsicherung aus abgestuftem Steinmaterial erforderlich. (DWA, 2014; Männel, 2009)
 - Angliederung eines Raugerinnes im Unterwasser eines Durchlasses/einer Verrohrung: Ist zur Sicherung gegen höhere Abflussmengen ein Tosbecken erforderlich, kann ein Raugerinne mit einem Abstand von $10 \cdot \text{Durchmesser}$ Bauwerk im Unterwasser angegliedert werden. Die Krone des Raugerinnes ist ggf. zur Bauwerkssohle erhöht auszuführen, um einen Rückstau ab Q30 zu erzeugen (Abb. 31). (DWA, 2014)

Umgehungsgerinne

- Kann die bestehende Sohlenstufe nicht mittels einer baulichen Veränderung durchgängig gestaltet werden und stehen genügend Flächen zur Verfügung, ist das Bauwerk seitlich durch ein parallel verlaufendes Gerinne im Nebenschluss zu umgehen (Abb. 32) (Patt et al., 2018).



a) b) c)
 Abbildung 30: Prinzipskizze und Längsschnitt vom Ersatz einer Sohlenstufe (>30 cm) durch a) Raugerinne ohne Einbauten (Schüttsteinbauweise) b) Raugerinne mit Störsteinen c) Raugerinne mit Beckenstruktur

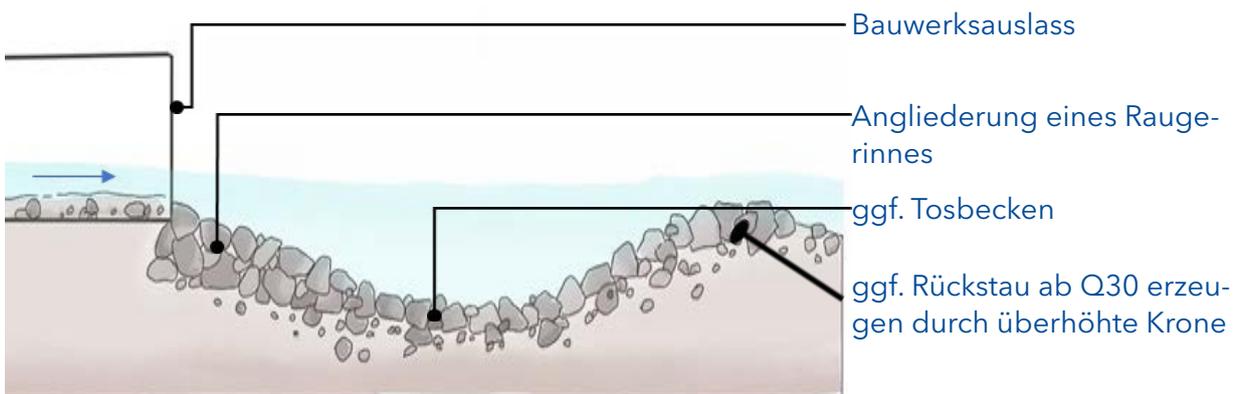


Abbildung 31: Prinzipskizze eines Durchlasses mit Raugerinne und Tosbecken (nach DWA,2014)

- Die Dimensionierung des Umgehungsgerinnes wird bestimmt durch die Größe des Gewässers, der ökologisch erforderlichen Mindestwasserführung sowie den zu überwindenden Höhenunterschied (Binder et al., 2008).
- Die geometrischen und hydraulischen Grenzwerte der Fischregion und des lokalen Artenspektrums sind zu berücksichtigen und ggf. entsprechende Strukturen einzubringen (Patt et al., 2018).
- Die Sohle ist mit gewässertypischem Substrat zu gestalten und eine sohlengleiche Anbindung an das Ober-/Unterwasser herzustellen (BMLFUW, 2012).
- Um die Auffindbarkeit des Umgehungsgerinnes zu gewährleisten, ist der unterwasserseitige Einstieg mit einem vergleichsweise höheren Gefälle auszubilden. Um die Passierbarkeit dennoch zu ermöglichen, ist die Errichtung eines Raugerinnes in Beckenstruktur oder mit Störsteinen in diesen Bereich geeignet. (MUNLV, 2005)
- Ist ein Kreuzungsbauwerk mit Umgehungsgerinne nötig, ist dieses passierbar zu gestalten (vergl. DuV.1/3).

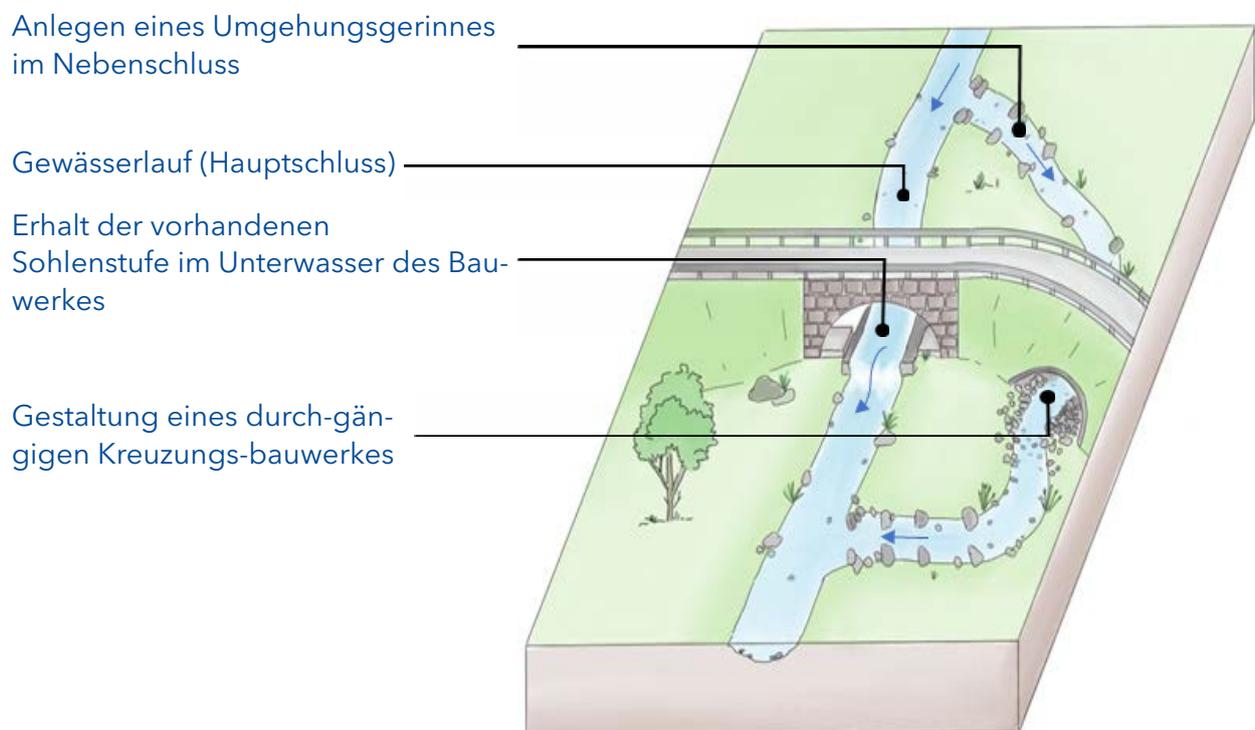


Abbildung 32: Umgehungsgerinne mit passierbarem Durchlass im Nebenschluss (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers)



Abbildung 33: Vorher (links): Massivsohle und Absturztreppe (Wasserspiegeldifferenz 40 cm) unterhalb einer Fußgängerbrücke, Nachher (rechts): Ersetzen der Absturztreppe durch ein Raugerinne mit Störsteinen, zusätzliche Schubstabilisierung mittels Rundholzstämmen (2019), Lage: Schwalm (Alsfeld), Quelle: WRRL-Viewer WH-ID: 95023



Abbildung 34: Vorher (links): Hoher Absturz (Wasserspiegeldifferenz 40 cm) im Unterwasser eines Durchlasses (2007), Nachher (rechts): Ersetzen des Absturzes durch Anlegen eines Raugerinnes mit geschwungener Linienführung (2011). Lage: Eisenbach (Eichelhain), Quelle: WRRL-Viewer WH-ID: 92882



Abbildung 35: Vorher (links): Raue Rampe (Wasserspiegeldifferenz 80 cm) im Unterwasser einer Brücke (2007), Nachher (rechts): Raugerinne mit Beckenstruktur (2013). Lage: Kinzig (Nieder- Kinzig), Quelle: WRRL-Viewer WH-ID: 19484

M.1 Umgestaltung eines Massivsohlenabschnitts

Kurzbeschreibung und Ziel

- An baulichen Anlagen in Gewässern, wie Brücken/Furten oder im Unterwasser von Durchlässen/Verrohrungen, werden Sohle und Ufer zum Schutz vor Erosion und Unterspülung häufig massiv und naturfern befestigt, wodurch die Durchgängigkeit für Lebewesen eingeschränkt werden kann.
- Ziel ist es, durch die Umgestaltung des Massivsohlenabschnitts und unter Berücksichtigung der Standsicherheit des Bauwerkes eine raue Gewässersohle mit passierbaren hydraulischen und geometrischen Bedingungen zu schaffen.

Rahmenbedingungen

- Abhängig von den lokalen Rahmenbedingungen sind verschiedene Vorgehensweisen möglich:
 - ▶ (Teil-)Entfernung der massiven Ufer-/Sohlsicherung und Schaffung einer natürlichen Gewässersohle.
 - ▶ Strukturelle Aufwertung der Sohle in Restriktionsbereichen, um die Migration in angrenzende Gewässerabschnitte zu ermöglichen.
- Voraussetzend für bauliche Veränderungen auf der Bauwerkssohle sind:
 - ▶ eine gegebene Mindesthöhe des Bauwerkes in Abhängigkeit von der Bauwerkslänge entsprechend DIN 19661-1 (1998).
 - ▶ die mögliche Ableitung des veranschlagten Bemessungsabflusses nach Durchführung der Maßnahme.
- Da es häufig zu Sohlenerosion bei mangelnder Nachbettsicherung im Unterwasser einer starren Sohlenbefestigung kommt, ist die Notwendigkeit zusätzlicher Maßnahmen (vergl. S1/2) zu prüfen.

Umsetzung

Entfernung des Massivsohlenabschnitts

- Das vorhandene Sohlsicherungsmaterial ist vollständig zu entnehmen. Abhängig von Menge und Beschaffenheit des Materials kann es (zerkleinert) im Gewässer belassen werden oder ist fachgerecht zu entsorgen. (TLUG, 2011)
- Nach dem Rückbau sollte das Sohlgefälle im typspezifischen Bereich liegen oder ist ggf. durch Laufverlängerung oder sonstige Maßnahmen (vergl. S1/2) diesem anzugleichen (TLUG, 2011).

- Eine naturnahe Gewässersohle mit einem durchflossenen Lückensystem ist aus natürlichem Sohlsubstrat herzustellen (Abb. 36). Der Korndurchmesser des Materials ist ausreichend groß, jedoch im gewässertypischen Bereich zu wählen, um einer Erosion bei hohen Abflussmengen vorzubeugen. (Eberstaller-Fleischanderl & Eberstaller, 2014)
- Weitere Störelemente zur Erhöhung der Sohlenrauigkeit können zusätzlich auf der Sohle angebracht werden (vergl. DuV.4).
 - ▶ Kann aufgrund erhöhter hydraulischer Belastung nicht auf eine Sohlbefestigung verzichtet werden, kann die Sohle mit einer Steinschüttung aus Wasserbausteinen stabilisiert und anschließend mit natürlichem Substrat überdeckt werden (DWA, 2018; FGSV, 2005).
 - ▶ mit einem rauen Steinsatz in Beton mit offenem Fugensystem stabilisiert und die Zwischenräume mit gewässertypischem Material verfüllt werden (DWA, 2018; LUBW, 2015).
- Die Fahrspuren einer Furt sind entsprechend der im Maßnahmensteckbrief DuV.3 beschriebenen Vorgehensweise auszubilden.
- Bei der Querschnittsgestaltung ist der Niedrigwasserabfluss zu bündeln, um ausreichende Wassertiefen zu gewährleisten (LUBW, 2008).
- Im Bauwerksbereich sind Uferbermen für die Wanderung terrestrischer und amphibi-scher Lebewesen anzulegen (LUBW, 2008).
- Das Querprofil eines zuvor verengten Gewässerabschnitts ist bei ausreichender Flächenverfügbarkeit aufzuweiten, etwa durch die wechselseitige Abgrabung der Gewässerufer oder durch Einbringung von Strömunglenkern (Berg et al., 2003).
- Uferbereiche und Nachbett sind naturnah mittels Steinschüttung oder ingenieurbio-logischer Bauweisen zu sichern (Sellheim, 2001).

Strukturelle Aufwertung des Massivsohlenabschnitts

- Ist eine Entfernung des massiven Sohlverbau nicht bzw. nur begrenzt möglich, ist die glatte Bauwerkssohle umzugestalten, um zumindest die Passierbarkeit für aquatische, amphibische und terrestrische Lebewesen zu gewährleisten (Abb. 37).
- Um die Rauheit der Sohle zu erhöhen und ein Lückensystem herzustellen (LUBW, 2008), ist die Bauwerkssohle mit groben Steinsätzen und gewässertypischem Substrat zu überdecken (DWA, 2018).
- Um den Verbleib der Substratauflage auf dem glatten Sohlverbau zu gewährleisten, die Wassertiefe zu erhöhen und/oder die Fließgeschwindigkeit zu reduzieren, sind Störelemente auf der Sohle anzubringen (vergl. auch DuV.4) (LUBW, 2008):

- ▶ Verankerung von versetzten Querbalken aus Holz oder Beton auf der Sohle.
- ▶ Fixierung größerer Störsteine aus gebietstypischem Gestein auf der Sohle.
- ▶ Anbringung von Borstenelementen auf der Sohle.
- Im Bauwerksbereich sind beidseitige Uferbermen anzulegen, um die terrestrische Wanderung zu ermöglichen. Dazu kann etwa gebietstypisches Gestein seitlich eingebracht oder Laufflächen aus Baumstämmen angelegt werden (Righetti et al., 2008).

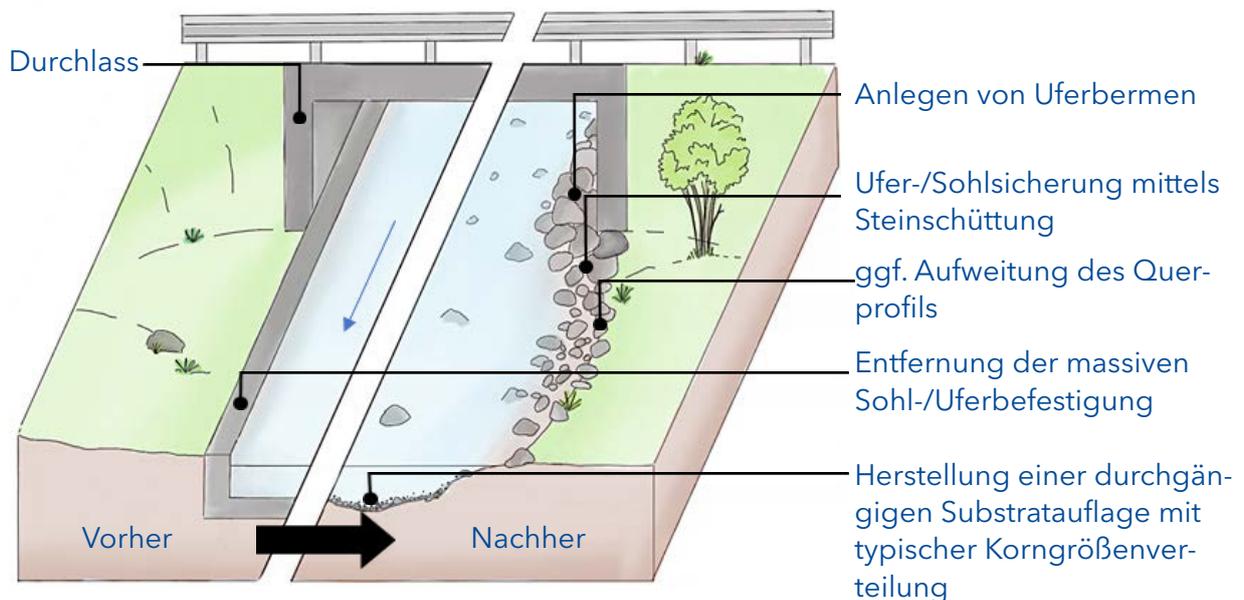


Abbildung 36: Prinzipskizze und Kriterien zur Umgestaltung eines Massivsohlenabschnittes durch Entfernung der Sohl-/Uferbefestigung und Schaffung einer durchgängigen Substratauflage (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers)

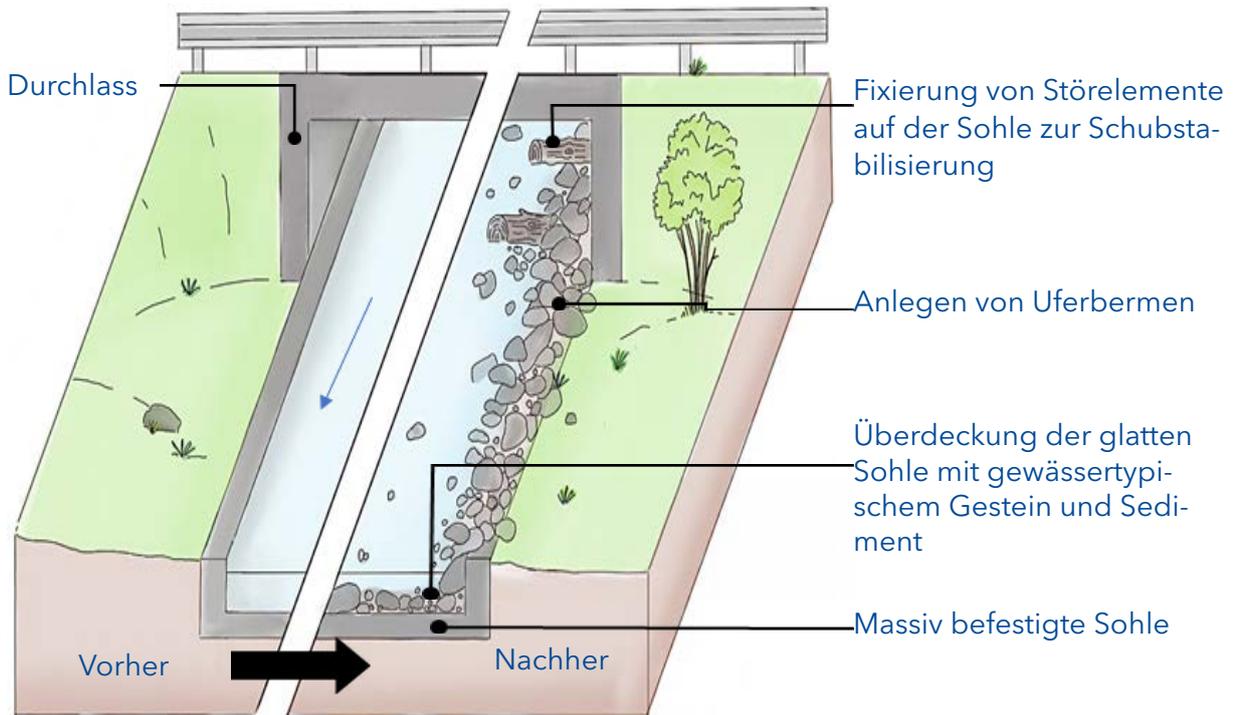


Abbildung 37: Prinzipskizze und Kriterien zur strukturellen Aufwertung eines Massivsohlenabschnittes (Pfeilrichtung entspricht Fließrichtung des Wassers)



Abbildung 38: Vorher (links): Massivsohlenabschnitt unter Durchlass (2007), Nachher (rechts): Aufwertung der Sohle durch Einbringen von Steinstrukturen und Sohlsubstrat, Einbau von aufgedübelten Querbalken, (2011). Lage: Lauter (Frischborn), Quelle: WRRL-Viewer



Abbildung 40: Vorher (links): Betonierte Furt mit Absturz (2007), Nachher (rechts): Entfernung der Betonsohle und Einbringung einer Steinschüttung im Unterwasser (2018). Lage: Bracht (Schlierbach), Quelle: WRRL-Viewer WH-ID: 36007

4. Fazit

Kreuzungsbauwerke an Gewässern sind durch unsere Nutzungsansprüche notwendig. Wegeverbindungen sind von je her erforderlich und die Querung von Gewässern unvermeidbar. In diesem Leitfaden zeigen wir Wege, wie die Kreuzung von Gewässern mit möglichst geringem Eingriff in den Lebensraum Wasser umgesetzt werden können. Die Passierbarkeit der Kreuzungsbauwerke für aquatische Lebewesen kann mit unserem heutigen Wissen deutlich verbessert werden und somit zu einer deutlich verstärkten Biodiversität im Gewässer beitragen. Bei einem Neubau eines solchen Bauwerks ist die Berücksichtigung der Durchgängigkeit eine unabdingbare Rahmenbedingung.

Der thematische Schwerpunkt der Maßnahmen liegt auf der aquatischen Durchgängigkeit, wobei Anforderungen von terrestrischen und amphibischen Organismen nur begrenzt berücksichtigt wurden. Die Gültigkeit der Handlungsempfehlungen kann in der Praxis durch variierende hydraulische, faunistische oder bautechnische Rahmenbedingungen eingeschränkt werden. Eine abweichende Bauausführung kann insofern unter bestimmten Umständen notwendig werden. Dennoch können die auf Grundlage des aktuellen Forschungsstandes erstellten Maßnahmensteckbriefe als grundsätzliche Orientierungshilfe angesehen werden.

Literaturverzeichnis

- Adam, B., & Lehmann, B. (2011). Ethohydraulik: Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17210-6>
- ALN. (2017). Merkblatt Faunagerechte Bachdurchlässe. Zürich: Kanton Zürich. Baudirektion. Amt für Landschaft und Natur.
- Arnulf, N. (2007). Auswirkungen der EU-WRRL auf den Forststraßenbau. Diplomarbeit. Wien.
- Berg, H., Dimmer, R., & Zester, C. (2003). Wirksame und kostengünstige Maßnahmen zur Gewässerentwicklung. Mainz: Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz.
- Binder, W., Gröbmaier, W., Rehklau, W., Kolbinger, A., Born, O., Hanfland, S., et al. (2008). Arbeitshilfe, Kleine Gewässer: Durchgängigkeit im Rahmen der Unterhaltung. (LfU Bayern, Ed.).
- BMLFUW. (2012). Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Castro, J. (2003). Geomorphologic Impacts of Culvert Replacement and Removal. Avoiding Channel Incision. U.S. Fish and Wildlife Service Portland.
- Clay, C. H. (1995). Design of Fishways and Other Fish Facilities (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315141046>
- Coffman, J. S. (2005). Evaluation of a Predictive Model for Upstream Fish Passage Through Culverts. Master's thesis. James Madison University, Harrisonburg, Virginia.
- Cote, D., Kehler, D. G., Bourne, C., & Wiersma, Y. F. (2009). A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. *Landscape Ecology*, 24(1), 101-113. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9283-y>
- DIN 19661-1. (1998). DIN 19661-1:1998-07. Richtlinien für Wasserbauwerke Teil 1: Kreuzungsbauwerke, Durchleitungs- und Mündungsbauwerke. Berlin: Beuth.
- Döbbelt-Grüne, S., Hartmann, C., Zellmer, U., Reuvers, C., Zins, C., Koenzen, U., & Koenzen, U. (2014). Hydromorphologische Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen. Anhang 1 von „Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihrer Erfolgskontrolle“ (43/2014 ed.). Dessau-Roßlau: UBA.
- Doehring, K., Young, R. G., & McIntosh, A. R. (2011). Factors affecting juvenile galaxiid fish passage at culverts. *Marine and Freshwater Research*, 62(1), 38. <https://doi.org/10.1071/MF10101>
- Duguay, J. (2014). The effect of fish baffles on the hydraulic capacity of HDPE slipline insert culverts. Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec).
- DWA (Ed.). (2014). Merkblatt DWA-M 509. Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung und Qualitätssicherung. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- DWA. (2018). Merkblatt DWA-M 609-2 Entwicklung urbaner Fließgewässer - Teil 2: Maßnahmen und Beispiele. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- Eberstaller-Fleischanderl, D., & Eberstaller, J. (2014). Flussbau und Ökologie. Flussbauliche Maßnahmen zur Erreichung des gewässerökologischen Zielzustandes. (BMLFUW & Amt der NÖ Landesregierung, Eds.). Wien.
- Epper, V. (2016). Darstellung und Bewertung von Gewässerquerungen von landwirtschaftlichen Wegen, Forst- und Fußwegen unter den Aspekten Ökologie, Kosten und Machbarkeit unterschiedlicher Belastungsstufen. In *Landentwicklung und ländliche Bodenordnung* (pp. 97-107). Mainz: MWVLW.

- EU. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie; WRRL), Pub. L. No. ABl. der EG, 2000, L 327 (2000).
- Fairfull, S., & Witheridge, G. (2003). Why do Fish Need to Cross the Road? Fish Passage Requirements for Waterway Crossings. Cronulla, NSW: NSW Fisheries.
- Favaro, C., Moore, J., Reynolds, J., & Beakes, M. (2014). Potential loss and rehabilitation of stream longitudinal connectivity: Fish populations in urban streams with culverts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71, 1805-1816. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0199>
- Feurich, R., Boubée, J., & Olsen, N. R. B. (2011). Spoiler Baffles in Circular Culverts. *Journal of Environmental Engineering*, 137(9), 854-857. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000384](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000384)
- Feurich, R., Boubée, J., & Olsen, N. R. B. (2012). Improvement of fish passage in culverts using CFD. *Ecological Engineering*, 47, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.013>
- FGSV (Ed.). (2005). Richtlinien für die Anlage von Straßen Teil: Entwässerung mit RAS-Ew-Bemessungshilfen auf CD-ROM. Köln: FGSV Verlag.
- Franklin, P. A., & Bartels, B. (2012). Restoring connectivity for migratory native fish in a New Zealand stream: effectiveness of retrofitting a pipe culvert. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 22(4), 489-497. <https://doi.org/10.1002/aqc.2232>
- Franklin, P. A., Gee, E., Baker, C., & Bowie, S. (2018). New Zealand Fish Passage Guide-lines for Structures up to 4 m. Hamilton, NZ: National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd.
- Fullerton, A. H., Burnett, K. M., Steel, E. A., Flitcroft, R. L., Pess, G. R., Feist, B. E., et al. (2010). Hydrological connectivity for riverine fish: measurement challenges and research opportunities. *Freshwater Biology*, 55(11), 2215-2237. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02448.x>
- Gebler, R.-J. (2009). Fischwege und Sohlengleiten. Band 1: Sohlengleiten. Grundlagen und Beispiele aus der Praxis. Walzbachtal: Wasser + Umwelt.
- Gleim, W., Krombach, M., Leicht, H. J., Paulus, T., & Schmidt, G. (2010). Empfehlungen für die Wiederherstellung der linearen Durchgängigkeit bei Fließgewässern im Rahmen der Gewässerunterhaltung. Mainz: GFG.
- Gousskov, A. (2016). Impacts of river fragmentation on the genetic population structure of the chub (*Squalius cephalus*) (Doctoral Thesis). ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010634105>
- Hanfland, S., Schnell, J., Ekart, C., & Pulg, U. (2009). Lebensraum Fließgewässer Restaurieren und Entwickeln. Effektive Sofortmaßnahmen an regulierten Gewässerabschnitten. LFV Bayern e.V.
- Hassinger, R. (2006). Borstenelemente als Strömungsbremse in Durchlässen. In S. Röck & W. Konold (Eds.), *Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken* (Vol. 50, pp. 91-96). Culterra, Schriftenreihe des Instituts für Landespflege.
- Hotchkiss, R. H., & Frei, C. M. (2007). Design for Fish Passage at Roadway-Stream Crossings: Synthesis Report. United States. Federal Highway Administration.
- Huet, M. (1949). Aperr des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweiz. Z. Hydrol*, (11), 322-351.

- Illies, J. (1961). Versuch einer allgemeinen biozönotischen Gliederung der Fließgewässer. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 46(2), 205-213. <https://doi.org/10.1002/iroh.19610460205>
- Jackson, S. D. (2003). Design and construction of aquatic organism passage at road-stream crossings: ecological considerations in the design of river and stream crossings.
- Kapitzke, I. R. (2010a). Culvert Fishway Planning and Design Guidelines. Part C – Fish Migration Barriers and Fish Passage Options for Road Crossings. James Cook University.
- Kapitzke, I. R. (2010b). Culvert Fishway Planning and Design Guidelines. Part F – Baffle Fishways for Box Culverts. James Cook University.
- Kapitzke, I. R. (2010c). Culvert Fishway Planning and Design Guidelines. Part G – Baffle Fishways for Pipe Culverts. James Cook University.
- Kappler, W., & Trier, H. (2018). Benutzerhandbuch FIS Wanda. Fachinformationssystem Wanderhindernisse (Version 2). HLNUG.
- Keep, J., Watson, J., Cramp, R., Jones, M., Gordos, M., & Franklin, C. (2020). Low light levels increase avoidance behaviour of diurnal fish species: Implications for road culverts. <https://doi.org/10.1101/2020.01.07.896605>
- Kemp, P. S., & O’Hanley, J. R. (2010). Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis: Evaluation of fish passage. *Fisheries Management and Ecology*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2010.00751.x>
- Keuneke, R. (2011). Leitfaden Kreuzungsbauwerke. Anleitung zur Herstellung der Durchgängigkeit für Fische und andere Bachbewohner beim Bau von Durchlässen und Brücken an Bach-Wege-Kreuzungen. Zweckverband Naturpark Südeifel.
- Keuneke, R., & Dumont, U. (2011). Wasserkraftnutzung und Wasserrahmenrichtlinie - Anhang 2 bis 4 (Texte 74/2011). Dessau-Roßlau: UBA.
- Keuneke, R., Donner, M., & Stoschek, O. (2017). Bewertung der Durchgängigkeit von Fließgewässern für Sedimente Anwenderhandbuch Sedimente. Erstellt im Rahmen des Projektes "Bewertung der Durchgängigkeit von Fließgewässern für Fische und Sedimente" (Projekt-Nr. O 5.14).
- Kiffney, P. M., Pess, G. R., Anderson, J. H., Faulds, P., Burton, K., & Riley, S. C. (2009). Changes in fish communities following recolonization of the Cedar River, WA, USA by Pacific salmon after 103 years of local extirpation. *River Research and Applications*, 25(4), 438-452. <https://doi.org/10.1002/rra.1174>
- Lake, P. S., Bond, N., & Reich, P. (2007). Linking ecological theory with stream restoration. *Freshwater Biology*, 52(4), 597-615. <https://doi.org/10.1111/j.13652427.2006.01709.x>
- Lange, G., & Lecher, K. (2000). Gewässerregulierung, Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern (3.). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-91580-1_1
- LANUV (Ed.). (2017). Entscheidungshilfe zur Auswahl von zielführenden hydromorphologischen Maßnahmen an Fließgewässern. Anlage 3: Maßnahmen-Toolbox. Recklinghausen.
- Larinier, M. (2002). Fish passage through culverts, rock weirs and estuarine obstructions. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 364. <https://doi.org/10.1051/kmae/2002097>
- LUBW (Ed.). (2007). Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern Leitfaden Teil 2 - Umgehungsgewässer und fischpassierbare Querbauwerke.pdf. Karlsruhe.

- LUBW (Ed.). (2008). Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern Leitfaden Teil 4 - Durchlässe, Verrohrungen, sowie Anschluss Seitengewässer und Aue. Karlsruhe.
- LUBW (Ed.). (2015). Gestaltung von Pegelanlagen. Handlungsempfehlung Messwesen und Durchgängigkeit. Karlsruhe.
- Lucas, M. C., Baras, E., Thom, T. J., Duncan, A., & Slavik, O. (2001). Migration of freshwater fishes. Oxford ; Malden, MA: Blackwell Science Ltd.
- Lucas, M. C., Bubb, D. H., Jang, M.-H., Ha, K., & Masters, J. E. G. (2009). Availability of and access to critical habitats in regulated rivers: effects of low-head barriers on threat-ened lamp reys. *Freshwater Biology*, 54(3), 621-634. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02136.x>
- Männel, R. (2009). Bemessung Unterbau, Krone und Nachbett. In *Naturnahe Sohlengleiten* (pp. 98-108). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- Männel, R., & Maulhardt, H. (2009). Bauarten und Bauweisen von Sohlengleiten. In *Naturnahe Sohlengleiten* (pp. 24-28). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- McKinley, W., & Webb, R. (1956, January 1). A Proposed Correction of Migratory Fish Problems at Box Culverts. *Fisheries Research Papers*, 1(4), 33-45.
- Mueller, R. P., Southard, S. S., May, C. W., Pearson, W. H., & Cullinan, V. I. (2008). Juvenile Coho Salmon Leaping Ability and Behavior in an Experimental Culvert Test Bed. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(4), 941-950. <https://doi.org/10.1577/T06-244.1>
- MUNLV (Ed.). (2005). *Handbuch Querbauwerke: Wasserwirtschaft* (1. Aufl.). Düsseldorf: MUNLV.
- Northcote, T. (1998). Migratory Behaviour of Fish and its Significance to Movement through Riverine Fish Passage Facilities. In *Fish Migration and Fish Bypasses* (pp. 3-18). Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Ode, T., Moratz-Pauly, N., & Möller, S. (2013). Machbarkeitsstudie zur Umsetzung der Maßnahmen nach WRRL am Hellbach. Wasserkörper NMKZ-0100. Endbericht. Rostock: Natura et Cultura.
- Ovidio, M., & Philippart, J.-C. (2002). The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish - Synthesis of a 5-year telemetry study in the River Meuse basin. *Hydrobiologia*, 483, 55-69. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0771-8_8
- Patt, H. (Ed.). (2016). *Fließgewässer- und Auenentwicklung. Grundlagen und Erfahrungen* (2.). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Patt, H., & Gonsowski, P. (2011). *Wasserbau: Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen* (7., aktualisierte Aufl). Berlin: Springer.
- Patt, H., Jürging, P., & Kraus, W. (2009). *Naturnaher Wasserbau: Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern* (3.). Berlin: Springer.
- Patt, H., Jürging, P., & Kraus, W. (2018). *Naturnaher Wasserbau: Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern* (5.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22478-3>
- Pavlov, D. S., Lupandin, A. I., & Skorobogatov, M. A. (2000). The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish. *Journal of Ichthyology*, 20, S232-S261.
- Pavlov, D. S., Mikheev, V. N., Lupandin, A. I., & Skorobogatov, M. A. (2008). Ecological and behavioural influences on juvenile fish migrations in regulated rivers: a review of experimental and field studies. *Hydrobiologia*, 609(1), 125-138. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9396-y>

- Pottgiesser, T. (2018). Die deutsche Fließgewässertypologie. Zweite Überarbeitung der Steckbriefe der Fließgewässertypen. Essen.
- Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1990). Hydraulics of culvert fishways III. Weir baffle culvert fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17, 558-568. <https://doi.org/10.1139/I90-064>
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., & McQuitty, N. (1989). Hydraulics of Culvert Fishways II: Slotted-Weir Culvert Fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16(3), 375-383. <https://doi.org/10.1139/I89-061>
- Righetti, A., Müller, J., Andres, M., Drollinger, P., Maurer, V., Zumbach, S., & Meyer, A. (2008). Faunagerechte Sanierung von bestehenden Gewässerdurchlässen. Tiefbauamt des Kantons Aargau und Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- Rödel, T. (2013). Merkblatt für das Anlegen von Furten und für den Weidebetrieb an Gewässern. LfULG. https://www.lfulg.sachsen.de/download/lfulg/Merkblatt_Furten_Weidebetrieb-an-Gewaessern.pdf. Stand: 11.03.2020
- Rodgers, E. M., Heaslip, B. M., Cramp, R. L., Riches, M., Gordos, M. A., & Franklin, C. E. (2017). Substrate roughening improves swimming performance in two small-bodied riverine fishes: implications for culvert remediation and design. *Conservation Physiology*, 5(1). <https://doi.org/10.1093/conphys/cox034>
- Ruiz Rodriguez, E., & Sallfner, F. (2018). Der Gitterrost Benthos Pass, eine kombinierte Aufstiegshilfe für Fische und Makrozoobenthos. *Journal Für Arbeitsschutz Und Umwelt*, 18-20.
- Schaber-Schoor, G., Ostermann, R., Wurm, K., Henne, N., & Häusler, A. (2008). Abschlussbericht 2008. Erhalt und Entwicklung naturnaher Bachläufe im Wald im Rahmen der Waldbewirtschaftung. DBU-Projekt Nr. 22388-33/2. FVA.
- Schmidt, D., Steinert, C., Hornbogen, M., Meinel, E., Signer, J., & Giebler, S. (2019). Straßenbrücken als Kreuzungsbauwerke an Gewässern und ihre Relevanz für die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit. In Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): *Komplexe Planungsaufgaben im Wasserbau und ihre Lösungen* (pp. 445-454). Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik.
- Schwevers, U., Adam, B., Schindehütte, K., & Steinberg, L. (2004). Zur Passierbarkeit von Durchlässen für Fische. *LÖBF-Mitteilungen*, 3/04, 37-43.
- Sellheim, P. (2001). Kreuzungsbauwerke an Fließgewässern – Gestaltungsvorschläge für Durchlässe, Brücken, Verrohrungen und Düker. *gewässer-info*, 21, 113-115.
- Speirs, D., & Ryan, G. (2006). Best Practice Guidelines for Waterway Crossings. Environment Waikato Technical Report 2006/25R. Hamilton East: Environment Waikato.
- Stevenson, C., Auckland (N.Z. : Region), Regional Council, & National Institute of Water and Atmospheric Research (N.Z.). (2008). Culvert barrel design to facilitate the upstream passage of small fish. Auckland, N.Z.: Auckland Regional Council.
- Syrbe, R.-U., & Grunewald, K. (2013). Restrukturierungsbedarf für regionaltypische Landschaftselemente und Biotopstrukturen am Beispiel Sachsens. *Natur und Landwirtschaft*, 88(3), 103-111.
- TLUG. (2011). Handbuch zur naturnahen Unterhaltung und zum Ausbau von Fließgewässern (Vol. Schriftenr. Thür. Landesanstalt für Umwelt u. Geologie). Jena: TLUG.

- Träbing, K., Stahlmann, R., & Johannsen, R. (2013). Kreuzungsbauwerke an kleinen Fließgewässern - Furten, Stege, Durchlässe und Brücken. Mainz: GFG.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., & Cushing, C. E. (1980). The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, (37), 130-137.
- Vordermeier, T., & Bohl, E. (1999). Untersuchungen zur Durchgängigkeit von Fließgewässern für Fische. München: B.L.f. Wasserwirtschaft (LfU).
- WBW Fortbildungsgesellschaft. (2010). Herstellung der Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern- Praxishilfe. WBW Fortbildungsgesellschaft.
- Werth, S., Weibel, D., Alp, M., Junker, J., Karpati, T., Peter, A., & Scheidegger, C. (2011). Lebensraumverbund Fließgewässer: Die Bedeutung der Vernetzung. *Wasser Energie Luft*, 103(3), 224-234.
- Williams, J. G. (2008). Mitigating the effects of high-head dams on the Columbia River, USA: experience from the trenches. *Hydrobiologia*, 609(1), 241-251. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9411-3>
- Winkler, H. (2009). Rückbau von Querbauwerken - Möglichkeiten und Perspektiven. In *Naturnahe Sohlengleiten* (Vol. DWA-Themen, pp. 133-142). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- Wofford, J. E. B., Gresswell, R. E., & Banks, M. A. (2005). Influence of barriers to movement on within-watershed genetic variation of coastal cutthroat trout. *Ecological Applications*, 15(2), 628-637. <https://doi.org/10.1890/04-0095>
- Zerbe, S., Wiegand, G., & Fronczek, R. (Eds.). (2009). *Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa* (1. Aufl.). Heidelberg: Springer Spektrum.
- Zitek, A., Haidvogel, M., Jungwirth, P., Pavlas, P., & Schmutz, S. (2007). Ein ökologisch-strategischer Leitfaden zur Wiederherstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern für die Fischfauna in Österreich. AP5 des MIRR-Projektes, Endbericht. Studie im Auftrag von Lebensministerium und Land Niederösterreich.

Impressum:

Regierungspräsidium Gießen
Landgraf-Philipp-Platz 1 - 7
35390 Gießen

www.rp-giessen.de
facebook.com/rp.giessen

Stand: Mai 2021

© Sonja Steegmüller M.Sc. 2020

Alle Inhalte, insbesondere Texte und Grafiken sind urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, einschließlich der Vervielfältigung, Veröffentlichung, Bearbeitung und Übersetzung, bleiben vorbehalten.

Kontakt: Sonja.steegmueller@gmail.com

Grafiken:

Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei Sonja Steegmüller M.Sc.

Bildnachweis Titel:

Clipdealer.com

Erarbeitet im Rahmen der Masterthesis „Longitudinale Durchgängigkeit an Kreuzungsbauwerken – Auswertung der Datenbank FIS Wanda für den Regierungsbezirk Gießen und technische Möglichkeiten zur Schaffung der Durchgängigkeit an Kreuzungsbauwerken“ im Studienfach Umweltwissenschaften an der Justus-Liebig-Universität Gießen in Kooperation mit dem Regierungspräsidium Gießen (Dezernat 41.2).

