# ZUSTANDSBEWERTUNG VON BUHNEN

am Beispiel von ausgewählten Wildbächen im Gebiet der WLV OÖ-West

# **CONDITION ASSESSMENT OF GROYNES**

by means of selected torrents of the WLV OÖ-West region

#### VERFASSERIN

Eva Dutzler, BSc. 01040189

BETREUER Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Peter Rauch Dipl.-Ing. Dr. Wolfram Bitterlich

#### UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN

Department für Bautechnik und Naturgefahren Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau

Wien, 2017

#### Zusammenfassung

Gegenwärtig gewinnen in der Wildbach- und Lawinenverbauung neben schutzwasserbaulichen Zielsetzungen auch gesetzlich verankerte ökologische Zielsetzungen immer mehr an Bedeutung. Diese Rahmenbedingungen bewirken eine Änderung des Anforderungsprofils von Bauwerken, die einerseits Schutz vor Hochwasser bieten und andererseits ökologische Vielfalt gewährleisten sollen. Buhnenfelder als Uferschutzbauwerke sind aufgrund ihrer strukturgebenden Elemente in vielerlei Hinsicht für die naturnahe Verbauung von Fließgewässern geeignet. In der Praxis existieren bislang keine Errichtungsstandards und die Einschätzung der Auswirkungen der einzelnen baulichen Parameter auf die Lebensdauer eines Bauwerks sowie die Veränderung der Flussmorphologie folgt Abschätzungen und Erfahrungswerten. Basierend auf dieser Problemstellung implementiert die vorliegende Arbeit eine Methode, um bauliche Parameter, verschiedene Schadensmechanismen und flussmorphologische Gegebenheiten mittels Aufnahmebogen zu erheben. In fünf ausgewählten Wildbächen, die in Untersuchungsgebieten der Wildbach- und Lawinenverbauung (Gebietsbauleitung OÖ-West) liegen, wurden im Jahr 2016 Buhnen, Standortfaktoren und Umgebungsparameter erfasst. Anschließend wurden - gestützt auf statistischen Analysen - die unterschiedlichen Variablen zueinander in Beziehung gesetzt und Zusammenhänge hergestellt. Dabei wurden unter anderem Materialschäden, Kolkbildung, Sedimentstruktur der Bauwerksumgebung, Verlandungstendenzen und Eintiefungen des Flussbettes untersucht. In Bezug auf die Materialschäden und die Kolkbildung ist beispielsweise das Verhältnis von Flussbreite zur Bauwerksgeometrie zu nennen, da es durch die Einengung des Fließquerschnittes aufgrund größer dimensionierter Bauwerke zu verstärkten Beanspruchungen der Flusssohle und des Bauwerks an sich kommt. Dieses Verhältnis steht gemeinsam mit dem Verhältnis von Bauwerksabstand zu Bauwerksgeometrie auch in Zusammenhang zu Ablagerungstendenzen im Buhnenfeld, die durch größere Bauwerken, die mehr Strömungsschutz bieten, forciert werden. Jedoch muss beachtet werden, dass die vorliegende Strömungsverhältnisse, Geschiebefracht, generelles Abflussgeschehen Arbeit oder Ereignishäufigkeit und -intensität nicht berücksichtigt und in Hinblick darauf weitere Untersuchungen notwendig sind.

I

#### Abstract

Currently, besides flood protection, ecological objectives, which are defined in the legislation, are playing an increasingly important role in the Torrent and Avalanche Control. This framework leads to a change of the requirements applied to a construction to provide on the one hand flood protection and on the other hand ensure ecological diversity. Due to their structuring elements, groyne fields are in many ways suitable for the semi-natural bank protection of rivers. No practical standards have been established regarding the construction of groynes. The estimation of how individual structural parameters affect the durability of a groyne and change the river morphology is mostly based on assumptions only. Based on this issue this master's thesis implements a method to collect structural parameters, different damage mechanisms and morphological river conditions using a record sheet. In the summer of 2016, groynes, location factors, and environmental parameters of five selected torrents in the region OÖ-West of the Torrent and Avalanche Control (WLV) were recorded. Based on statistical analysis, the relationships between the recorded variables are established. Material damages, scouring, sediment structure around the construction, sedimentation tendencies, and erosions of the riverbed are investigated. Regarding material damages and scouring, for example the ratio between river width and construction geometry must be mentioned. The narrowing of the flow cross section due to larger-dimensioned structures increases the stress along the riverbed and on the structure itself. Additionally this ratio is related to the deposition tendencies. The ratio of the distance between the groynes and construction geometry has the same tendencies. Due to increased flow protection by larger structures depositions are forced. However, it is important to note that this master's thesis does not take flow conditions, bed-load, flow-regime, or event frequency and intensity into account. Further investigations in this regard are necessary.

#### Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die durch ihre Unterstützung und fortlaufende Motivation einen großen Teil zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben.

Zuerst gebührt mein Dank *Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Peter Rauch*, der meine Arbeit betreut und begutachtet hat und mich mit endloser Geduld, hilfreichen Anregungen und konstruktiver Kritik in der Entstehung meiner Masterarbeit begleitet hat.

Ich möchte mich ebenfalls bei *Dipl.-Ing. Dr. Wolfram Bitterlich* für die Unterstützung bei der Recherche nach geeigneten Bauwerken und Untersuchungsgebieten in der Gebietsbauleitung sowie allen Mitarbeitern der WLV OÖ-West für die freundliche Aufnahme und den dringend notwendigen Kaffee bedanken.

Ein weiterer Dank geht an *Teresa* und *Melanie*, die mir mit ihren aufmunternden und motivierenden Worten durch das eine oder andere Motivationstief geholfen haben sowie an meine Chefin *Christa*, die in der Endphase häufig auf meine Arbeitskraft verzichten musste.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner gesamten Familie bedanken, meinen Eltern *Andrea* und *Michael*, die mir das Studium ermöglicht haben, meinem Bruder *Felix*, meinen Großeltern *Irmgard* und *Adolf* sowie meiner Tante *Barbara*, die mich all die Jahre lang unterstützt und mir immer ein offenes Ohr geliehen haben.

Abschließend gilt mein Dank *Martin*, der durch seine andauernde Motivation, den anregenden und konstruktiven Gesprächen sowie der endlosen Wiederholung des Satzes "Los, arbeit' was!" diese Masterarbeit für mich erst möglich machte.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung I									
Abst	ract	•••••	II						
Dan	DanksagungIII								
Abki	ürzung	en	1						
1	Einlei	tung	2						
2	Grundlagen								
	2.1	Klassif	fizierung und Design-Kriterien von Buhnen7						
		2.1.1	Klassifizierung nach dem Einbauwinkel7						
		2.1.2	Klassifizierung nach Art und Materialien des Bauwerks sowie der Durchströmbarkeit8						
		2.1.3	Klassifizierung nach der Überströmung9						
		2.1.4	Klassifizierung nach der Erscheinung im Grundriss9						
		2.1.5	Klassifizierung nach Bautyp9						
		2.1.6	Buhnenorientierung13						
		2.1.7	Buhnenlänge						
		2.1.8	Buhnenabstände13						
		2.1.9	Gefälle der Buhnenseiten und des Buhnenkopfes16						
	2.2	Morph	nologische und hydrologische Einflüsse von Buhnen16						
		2.2.1	Strömungsmuster in der Umgebung einzelner Buhnen17						
		2.2.2	Strömungsmuster in Buhnenfeldern18						
		2.2.3	Ablagerungs- und Erosionsprozesse21						
		2.2.4	Einbauwinkel23						
		2.2.5	Art der Durchströmung						
		2.2.6	Überströmung26						
		2.2.7	Erscheinung im Grundriss27						

	2.3	Zustandsbewertungen von ingenieurbiologischen und technischen Bauwerken2					
		2.3.1	Zustandserfassung	30			
		2.3.2	Dokumentation	31			
3	Unter	suchung	gsgebiete	33			
	3.1	Geolo	gie	33			
	3.2	Klima		35			
	3.3	Grüna	aubach	36			
	3.4	Schine	dlbach	38			
	3.5	Retter	nbach	39			
	3.6	Wang	auer Ache	41			
	3.7	Weiße	nbach	43			
4	Meth	odik		45			
	<u>4</u> 1	Aufna	hmehogen	45			
		/ 1 1	Allgemeines	15			
		4.1.1		45			
		4.1.2	Flussbezogene Angaben	46			
		4.1.3 Bauwerksbezogene Angaben					
		4.1.4	Geometrie	47			
		4.1.5	Material	48			
		4.1.6	Schäden	49			
			4.1.6.1 Kolkbildung	49			
			4.1.6.2 Verlust des Flankenwiderstands	49			
			4.1.6.3 Bauwerksbewegungen	50			
			4.1.6.4 Materialschäden	50			
		4.1.7	Flussmorphologische Wirkungen	51			
	4.2	2 Kartierung					
	4.3	Berechnung des Gefälles					
	4.4	Statist	tische Auswertung	54			
		4.4.1	Datenniveau	54			

		4.4.2	Boxplot.		55
		4.4.3	Korrelat	ion nach Pearson	56
		4.4.4	Entwickl	ung eines Bewertungsschemas für Material-Schadensmecl	hanismen.57
5	Frach	nicco			61
5	Ligen	111550			
	5.1	Bauty	oen im Ur	ntersuchungsgebiet	61
		5.1.1	Steinbuł	nnen	63
		5.1.2	Steinspo	orne	64
		5.1.3	Betonbu	hnen	65
		5.1.4	Wurfsch	lachten	67
		5.1.5	Stammb	uhnen	68
	5.2	Zustar	ndsanalys	e	70
		5.2.1	Schäden	nach Untersuchungsgebiete	70
			5.2.1.1	Materialschäden	73
			5.2.1.2	Kolkbildung	77
			5.2.1.3	Ausspülung der Bauwerke	78
			5.2.1.4	Verklausung der Bauwerke	79
		5.2.2	Schäden	nach unterschiedlichen Parametern der Bauweisen	80
			5.2.2.1	Materialschäden	81
			5.2.2.2	Kolkbildung	86
			5.2.2.3	Ausspülung der Bauwerke	92
			5.2.2.4	Unterspülung der Bauwerke	97
		5.2.3	Auswirk	ungen auf die Flussmorphologie	98
			5.2.3.1	Sedimentstruktur	98
			5.2.3.2	Verlandungsfläche	103
			5.2.3.3	Eintiefungen des Flussbettes	106
			5.2.3.4	Ufererosionen	109
6	Disku	ssion			112
	6.1	Unter	suchungs	gebiete	112
	6.2	Schad	ensmecha	anismen	113
		6.2.1	Material	schäden	113

		6.2.2	Kolkbildung11	4						
		6.2.3	Ausspülung11	5						
	6.3	Auswir	kungen auf die Flussmorphologie11	6						
		6.3.1	Sedimentstruktur11	6						
		6.3.2	Verlandungen11	6						
		6.3.3	Eintiefungen des Flussbettes11	7						
		6.3.4	Ufererosionen11	7						
7	Conclu	usio	1'	18						
8	Literatur 121									
9	Abbildungsverzeichnis									
10	Tabellenverzeichnis									
11	Anhang									
	11.1	Aufnał	1mebogen13	34						
	11.2	Korrela	ationstabellen und Diagramme13	36						
		11.2.1	Zusammenhang zwischen Buhnengeometrie und Kolkgeometrie, -verortur und -häufigkeit	ıg 36						
		11.2.2	Zusammenhang zwischen Buhnengeometrie und Verlandungsfläche13	39						
Ehre	nwörtl	iche Erk	lärung14	Ehrenwörtliche Erklärung						

## Abkürzungen

- L<sub>B</sub> Buhnenlänge [m]
- B<sub>B</sub> Buhnenbreite [m]
- H<sub>BW</sub> Höhe der Buhnenwurzel [m]
- H<sub>BK</sub> Höhe des Buhnenkopfs [m]
- F<sub>B</sub> Flussbreite [m]
- A<sub>a</sub> Abstand zur nächsten Buhne flussabwärts [m]
- A<sub>b</sub> Abstand zur nächsten Buhne flussaufwärts [m]
- A<sub>c</sub> Abstand zur gegenüberliegenden Buhne flussaufwärts [m]
- A<sub>d</sub> Abstand zur gegenüberliegenden Buhne flussabwärts [m]
- E<sub>M</sub> Eintiefungen der Flussmitte [m]
- E<sub>GÜ</sub> Eintiefungen der gegenüberliegenden Flussseite (relativ zum Bauwerk) [m]
- T<sub>K</sub> Kolktiefe [m]
- L<sub>K</sub> Kolklänge [m]
- B<sub>K</sub> Kolkbreite [m]
- A<sub>v</sub> Verlandungsfläche [m<sup>2</sup>]
- A<sub>B</sub> Fläche des Buhnenfeldes [m<sup>2</sup>]
- r Korrelationskoeffizient
- R<sup>2</sup> Bestimmtheitsmaß

# 1 Einleitung

Aufgrund des Erlasses der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) und deren Implementierung in Österreich in Form des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans (NGP) gewinnen neben herkömmlichem Schutzwasserbau ökologische Zielsetzungen für Planung und Praxis an Bedeutung. Dies schließt einerseits die Durchgängigkeit für aquatische Fauna als auch die Gewährleistung und Wiederherstellung eines gewässertypischen Lebensraums mit ein. Für die Umsetzung sind vor allem Strukturvielfalt und Gewässerdynamik nach dem Vorbild naturnaher Fließgewässer von Bedeutung. Dies bedeutet, dass dem Fluss die Möglichkeit zur Umlagerung, Eintiefung in das Flussbett sowie lokalen Auflandung gegeben werden muss – auch eine gewässertypische Ufervegetation muss gewährleistet werden. (EBERSTALLER-FLEISCHANDERL & EBERSTALLER, 2014)

Buhnen stellen in Hinblick auf diese Richtlinien und schutztechnischen Ansprüche gute Lösungen im Wasserbau dar, da sie einerseits dem Ufer Schutz bieten und andererseits als strukturgebendes Element neue, vielfältige Lebensräume schaffen. Als schutzwasserbauliche Mittel des Flussbaus dienen sie in größeren Gewässern als Erhalt von Navigationskanälen für die Schifffahrt. In kleineren, nicht schiffbaren Gewässern wie Wildbächen steht der Schutz vor Ufererosion im Vordergrund.

In Hinblick auf die schutzwasserbauliche Wirkung als Längsverbauung der Uferlinien sind aber auch andere Maßnahmen – beispielsweise Blocksteinschlichtungen – wirksam. Abbildung 1 stellt ein durch Blocksteinschlichtung gesichertes Ufer einem Buhnenfeld vergleichend gegenüber. Während die Steinschlichtung allein dem Uferschutz dient, liegt der Vorteil von Buhnen in zusätzlichen flussmorphologischen Auswirkungen und der positiven Beeinflussung der ökologischen Gegebenheiten. Dazu zählen unter anderem die Veränderung der Strömungsmuster in den einzelnen Buhnenfeldern, die An- und Ablagerungen von Sedimenten sowie die Ausbildung von Tiefwasserbereichen (SUKHODOLOV et al., 2002, 2014, 2016).



Abbildung 1: Längsschutz, links: Blocksteinschlichtung, rechts: Buhnenfeld (Eigene Darstellung, 2017)

Buhnen wurden in ihren Funktionsweisen und ihren Möglichkeiten zur Ausgestaltung aufgrund der beschriebenen positiven Funktionsweise in Hinsicht auf Uferschutz und Steigerung der ökologischen Qualität der Gewässer vielfach untersucht (PRZEDWOJSKI et al., 1995). Eine Kontextualisierung der Buhnen in ihren baulichen Ausprägungen mit dem Bauwerkszustand wurde dabei jedoch nicht vorgenommen. Buhnen werden in unterschiedlichsten Ausprägungen errichtet Stein-, Beton-, Holz-, Lebendbauwerke sind nur einige wenige Errichtungsmöglichkeiten, die zusätzlich sich zusätzlich noch in der Dimensionierung ihrer Abmessungen unterscheiden können. Zudem gibt es für die Ausführungen dieser Bauwerke in der Praxis keine standardisierten Vorgehensweisen und in vielen Fällen ist unklar, wie sich die unterschiedlichen Bauweisen nach Errichtung tatsächlich auswirken. Auf Basis dieser Defizite in der Forschung, aber auch in der Praxis wurden folgende Forschungsfragen und Hypothesen formuliert:

#### 1. Wie wirkt sich die Bauweise einer Buhne auf den Zustand des Bauwerks aus?

Diese Frage beschäftigt sich mit dem Zusammenhang von Bautyp, Bauwerksgeometrie und Alter der Buhnen und den unterschiedlichen Schadensmechanismen. Zur Untersuchung dieser Forschungsfrage werden nachfolgende Hypothesen herangezogen:

- 1.1. Flexiblere Bautypen erweisen sich widerstandsfähiger gegenüber bestimmten Schadensmechanismen als unflexible Bautypen.
- 1.2. Längere und größere Ausführungsformen des Buhnenkörpers sind auf Grund ihrer größeren Angriffsfläche schadensanfälliger.
- 1.3. Unterschiedliche Bauwerksgeometrien in Relation zur Flussbreite und zum Bauwerksabstand haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Kolkbildung.
- 1.4. Das Alter der Buhnen kann mit bestimmten Schadensmechanismen in Zusammenhang gebracht werden.

1.5. Die Lage der Buhnen im Fluss sowie auch zueinander (in Buhnenfeldern) steht in Zusammenhang mit gewissen Schadensmechanismen.

#### 2. Welche Auswirkungen hat die Bauweise von Buhnen auf die Flussmorphologie?

Mit der zweiten Frage soll der ökologische Wert von Buhnen untersucht werden. Dabei müssen vor allem auch die Auswirkungen auf die Flussmorphologie beachtet werden. Die Analyse dieser Auswirkungen soll anhand folgender Hypothesen durchgeführt werden:

- 2.1. Im Bereich rund um die Buhnen entsteht durch die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse eine diverse Sedimentstruktur.
- 2.2. Strömungsablenkungen in eine bestimmte Richtung bedingen Eintiefungen im Flussbett sowie Erosionen am gegenüberliegenden Ufer.
- 2.3. Unterschiedliche Bauwerksgeometrien in Relation zur Flussbreite und zum Bauwerksabstand haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Flussmorphologie.

Ziel dieser Arbeit ist daher eine umfassende Erhebung und Analyse von baulichen Parametern der Bauwerke in Wildbächen und deren Kontextualisierung mit verschiedenen Auswirkungen auf den Bauwerkszustand und die Flussmorphologie.

Die Erhebung dieser Daten fand im Sommer 2016 mittels eines eigens entwickelten Aufnahmebogens statt. Dabei wurden in fünf unterschiedlichen Untersuchungsgebieten der Wildbach- und Lawinenverbauung Oberösterreich-West Daten zu den Fließgewässern, den Geometrien der Bauwerke, etwaige Schadensmechanismen und deren Auswirkungen auf die Flussmorphologie erfasst und im Anschluss statistisch analysiert. Im Fokus der Auswertungen stehen die Auswirkungen der unterschiedlichen Bauweisen (Bautyp und Baugeometrie) auf den Zustand der Bauwerke sowie die Einflüsse auf die flussmorphologischen Gegebenheiten.

Diese Arbeit soll keine konkreten Handlungsanweisungen zur Errichtung von Bauwerken für die Praxis bieten, sondern eine Erhebung von Grundlagen für weiterführende Untersuchungen darstellen, indem relevante Buhnen-Parameter, die den Zustand des Bauwerks und die Flussmorphologie beeinflussen, analysiert werden. Zusätzlich ist darauf hinzuweisen, dass die Konzentration der Auswertung allein auf den Bauwerken und deren Ausführungen liegt und Hochwasserereignisfrequenz und -intensität, Abflussparameter und Geschiebefracht und deren Auswirkungen nicht berücksichtigt werden.

Der erste Teil dieser Arbeit beinhaltet eine umfassende Beschreibung von Buhnen, deren Funktionsweisen und Auswirkungen auf Strömungs-, Erosions- und Ablagerungsprozesse. Dabei wird auch auf die mögliche Klassifizierung der Bauwerke eingegangen und ein Überblick der unterschiedlichen Designkriterien, die sich auf Basis ausgiebiger Literaturrecherchen teilweise als widersprüchlich darstellen, geboten. Zusätzlich wird ein Einblick in die Vorgehensweise bei Zustandsbewertungen von Wildbachbauwerken sowie von ingenieurbiologischen Systemen gegeben.

Im zweiten Teil werden die methodischen Vorgehensweisen dokumentiert. Einerseits wird die Konzeption des Aufnahmebogens und andererseits Grundlagen der statistischen Auswertung und Darstellungsmethoden erläutert.

Der Hauptteil der Arbeit beinhaltet die Darstellung und Erläuterung der Ergebnisse der statistischen Analysen. Dabei wird auf die Unterschiede in den einzelnen Untersuchungsgebieten, in Bezug auf die unterschiedlichen Bauweisen sowie auf die Auswirkungen auf die Flussmorphologie eingegangen.

Die Interpretation der wichtigsten Ergebnisse findet sich im nachfolgenden Kapitel - der Diskussion. Dabei wird kurz eine Zusammenfassung der Ergebnisse dargelegt und diese im Anschluss analysiert.

Im letzten Kapitel – der Conclusio – werden im Zuge eines Fazits noch einmal die wichtigsten Punkte dieser Arbeit dargelegt. Zusätzlich werden aufbauende Untersuchungsmöglichkeiten angeführt und Kritik an den verwendeten Methoden und der Vorgehensweise geübt.

# 2 Grundlagen

Folgendes Kapitel stellt die grundlegende Theorie über Buhnen überblicksmäßig dar. Zusätzlich wird anschließend eine Einführung zum Thema Zustandsbewertung in der Ingenieurbiologie gegeben.

Buhnen sind dammartige Querbauwerke, die in den Flussquerschnitt ragen, die Strömung von kritischen Zonen ablenken, Ufererosion verhindern und einen günstigen Strömungskanal in Bezug auf Hochwasserschutz, eventuelle Schifffahrt, Ufersanierung oder Strukturierung des Gewässers bewirken (ERCAN & YOUNIS, 2009; NACHTNEBEL et al., 2008; PRZEDWOJSKI et al., 1995; SAVIĆ et al., 2013). Sie werden bereits seit dem 19. Jahrhundert zum Schutz von Flussbänken und -ufern verwendet. (KLUMP & BAIRD, 1992). Buhnen dienen jedoch nicht zur kontinuierlichen Regulierung des Flusslaufes, sondern schaffen an den Uferlinien Strukturen, welche zu unregelmäßigen Fließmustern in der Strömung sowie einem Anstieg des Wasserspiegels führen (JANY & GEITZ, 2013b; PRZEDWOJSKI et al., 1995). Zudem trennen sie die Streichlinie und die Uferlinie voneinander. In diesen Zwischenräumen verhindern die Konstruktionen starke Strömungen, beeinträchtigen die Fließgeschwindigkeit und bewirken somit eine Geschiebeanlandung sowie die Bildung von Sandbänken und neuen Uferlinien (PRZEDWOJSKI et al., 1995). In den Zirkulationszonen zwischen den einzelnen Bauwerken eines Buhnenfeldes bilden sich durch Ablagerung und beruhigten Strömungsmustern zudem neue Lebensräume, die vor allem für Klein- und Jungfische ideale Laich- und Aufwuchsorte sind und Alternativen zu verlorenen Habiten bieten (EICK & THIEL, 2013).

Buhnen werden landseitig mit der sogenannten Wurzel im Ufer verankert, das flussseitige Ende (an der Streichlinie) ist der Buhnenkopf (PRZEDWOJSKI et al., 1995; SCHIECHTL & STERN, 2002). Dazwischen befindet sich der Buhnenkörper (FLORINETH, 2012; NACHTNEBEL, 2003). Abbildung 2 skizziert diese einzelnen Bestandteile von Buhnen.



Abbildung 2: Schema einer Steinbuhne (Eigene Darstellung, 2017)

# 2.1 Klassifizierung und Design-Kriterien von Buhnen

Buhnen können in Bezug auf die Bauweise (Bautyp und Bauwerksgeometrie), das Erscheinungsbild und die Auswirkungen auf das Abflussgeschehen starke Unterschiede aufweisen. PRZEDWOJSKI et al. (1995) bieten verschiedene Möglichkeiten zur Klassifikation von Buhnen. Folgender Abschnitt erläutert diese Arten der Klassifizierung. Anschließend werden einige – teilweise kontroverse – Meinungen verschiedener Autorinnen und Autoren zum Thema Buhnen angeführt und miteinander verglichen. Die Einteilung der Kriterien erfolgt nach KLUMP & BAIRD (1992), da sie in ihrem Bericht detailliert auf unterschiedliche Parameter eingehen.

### 2.1.1 Klassifizierung nach dem Einbauwinkel

Je nach Bedarf und gewünschter Wirkung kann eine Buhne in unterschiedlichen Winkeln (zur Fließrichtung) errichtet werden: deklinant, rechtwinkelig und inklinant.

- Deklinante Buhnen sind flussabwärts gerichtet und lenken die Strömung in die Flussmitte (PATT et al., 2009; PRZEDWOJSKI et al., 1995). Bei Hochwasser und Überströmung des Bauwerks wird die Strömung jedoch verstärkt auf das flussabwärts liegende Ufer gelenkt, welches folglich gesichert werden sollte (PATT et al., 2009; RossoLL et al., 1992). Aus diesem Grund ist die deklinante Bauform zur Ufersicherung ungeeignet, sie findet jedoch im naturnahen Wasserbau Verwendung, da sie eigendynamische Entwicklungen des Flussbettes begünstigt. (PATT et al., 2009)
- Die rechtwinklige Bauform wirkt überwiegend neutral (PATT et al., 2009), wird in der Regel eher kurz ausgeführt und ändert die Strömungsrichtung nur mäßig, ohne sie direkt vom Ufer weg zu lenken (PRZEDWOJSKI et al., 1995).
- Inklinante Buhnen sind flussaufwärts geneigt und lenken den Strom stark in die Flussmitte ab (PRZEDWOJSKI et al., 1995). Auch bei geringer Überströmung kann jedoch das flussaufwärts liegende Ufer angegriffen werden, weshalb die Buhnenwurzel tief verankert und durch eine Ufersicherung flussaufwärts ergänzt werden sollte (PATT et al., 2009). Laut RossoLL et al. (1992) sowie PRZEDWOJSKI et al. (1995) ist die inklinante Bauform für den Uferschutz am günstigsten, da durch die vermehrte Geschiebeanlandung der Uferbereich vor Erosion geschützt und bei Hochwasser der Hauptstrom des Gewässers effektiv in Richtung Flussmitte abgelenkt wird.

Abbildung 3 visualisiert die Ausführungen mit unterschiedlichen Buhnenneigungen und stellt zusätzlich die Beeinflussung der Strömung dar, die zu einer unterschiedlichen Anlagerung von Material führt.



# 2.1.2 Klassifizierung nach Art und Materialien des Bauwerks sowie der Durchströmbarkeit

Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Bauformen von Buhnen, die jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf das Abflussgeschehen haben.

Durchströmbar und undurchströmbar ergibt sich aus der Fähigkeit des Materials zur Strömungsübertragung. Durchströmbare Buhnen (Pfähle, Bambus, Holz) verlangsamen den Strom, während undurchströmbare (solide) Buhnen (Beton, Stein, Schotter, Gabionen) den Strom ablenken. Durchströmbare Buhnen eignen sich für alluviale Gerinne, die einen beträchtlichen Geschiebetransport entlang der Sohle sowie eine hohe Sedimentkonzentration aufweisen, welche eine rasche Ablagerung an der Buhne bewirken. Diese Sedimentation wird durch Einschränkung der Strömung und Reduktion der Fließgeschwindigkeit erreicht. Sie können jedoch auch in schnelleren, klaren Gerinnen eingesetzt werden, in welchen eine Verminderung der Strömung und somit der Erosionskraft des Flusses ausreicht, um lokal Ufer zu schützen. (PRZEDWOJSKI et al., 1995)

Solide Buhnen werden häufig errichtet, um erodierte Abschnitte zu schützen und das Flussbett in eine gewünschte Ausrichtung zu drängen. Um dies zu erreichen, wird eine Sedimentation zwischen den einzelnen Buhnen unterstützt. Da sich an den Köpfen von undurchströmbaren Buhnen durch sich schnell ändernde Fließmuster Kolke bilden, eignet sich diese Form besonders zum Erhalt von Schifffahrtswegen in größeren Strömen. (Przedwojski et al., 1995)

# 2.1.3 Klassifizierung nach der Überströmung

Buhnen können auch danach klassifiziert werden, ob die Oberkante des Bauwerks unterhalb (überströmt) oder oberhalb (nicht überströmt) der Wasseroberfläche liegt. Die Oberkante solider Buhnen sollte über dem Wasserspiegel liegen, da durch überströmendes Wasser häufig starke Erosionen entlang des Buhnenkörpers entstehen. Durchströmbare Bautypen sind für die überströmte Version vorteilhafter, da sie nur geringe Störungen der Strömung bewirken. (PRZEDWOJSKI et al., 1995)

# 2.1.4 Klassifizierung nach der Erscheinung im Grundriss

Buhnenköpfe können auf unterschiedliche Arten ausgeführt werden. Die verschiedenen Möglichkeiten, von denen in Abbildung 4 eine Auswahl zusammengefasst dargestellt wird, dienen unter anderem der Verstärkung des Buhnenkopfes, der vermehrten Anlandung von Geschiebe, der Verringerung des Risikos von Kolkbildung, der Maximierung des Uferschutzes oder der Steigerung des Effekts der Kanalisierung für die Schifffahrt. (PRZEDWOJSKI et al., 1995; SHRESTA et al., 2012)



Abbildung 4: Unterschiedliche Ausführungen von Buhnenköpfen (Eigene Darstellung, 2017)

# 2.1.5 Klassifizierung nach Bautyp

Abschließend können Buhnen auch nach ihrem grundsätzlichen Bautyp unterschieden werden. Folgende Liste gibt einen Ausschnitt aus den vielfältigen Möglichkeiten (FLORINETH, 2012; PATT et al., 2009):

-	Steinbuhne	-	Steinkastenbuhne
-	Steinsporn	-	Flechtwerksbuhne

- Wurzelstockbuhne

- Faschinenbuhne

- Raubaumbuhne

etc.

- Krainerwandbuhne

Im Zuge dieser Arbeit sind folgende Bautypen von Bedeutung:

#### <u>Steinbuhnen</u>

Dieser Bautyp wird entweder aus Schüttgut oder großen Wasserbausteinen errichtet, welche in die Sohle sowie in das Ufer eingebunden werden. Laut SINDELAR & MENDE (2009) liegt das Steinvolumen üblicherweise zwischen 1,5-3 m<sup>3</sup> – Klassifizierung nach DIN EN 13383: HMA<sub>3000/6000</sub> (EISENHAUER, 2002). Steinbuhnen sind aufgrund ihrer lockeren, nicht vermörtelten Bauform flexibel und unerwünschten Auswirkungen kann durch Entfernen oder Zufügen von Steinen entgegengewirkt werden. Diese naturnahe Ausführung – visualisiert in Abbildung 5 – von Buhnen erhöht die Strukturvielfalt des Flusses und ist somit als ökologisch wertvoll einzustufen. (PATT et al., 2009; EBERSTALLER-FLEISCHANDERL & EBERSTALLER, 2014)



Abbildung 5: Steinbuhne, links: 3D-Schema, rechts: Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung, 2017)

#### <u>Steinsporne</u>

Die Bauform der Steinsporne ähnelt den Steinbuhnen, jedoch ist der Grundriss zum Ufer hin verbreitert, weswegen sie auch als Dreiecksbuhne bezeichnet wird. Das Verhältnis von Buhnenlänge zu Buhnenbreite entlang des Ufers beträgt bei Steinspornen 1:1 bis 2:1. Dieser Unterschied wird auch aus Abbildung 6 ersichtlich. Am Buhnenkopf bilden sich häufig tiefe Kolke mit grobem Sediment und hohen Fließgeschwindigkeiten aus. Deswegen ist die Einbindung dieses Bereiches in die Sohle besonders wichtig. (PATT et al., 2009) Bei Überspülung wirken Steinsporne wie inklinante Buhnen und schützen somit effektiv das Ufer (JANY & GEITZ, 2013a; PATT et al., 2009). Jedoch entsteht durch die Überspülung im Unterwasser ein Kolk, weshalb die Sedimentation in diesem Bereich reduziert wird (PATT et al., 2009).

Dreiecksbuhnen sind ökologisch sehr wertvoll, da sich in ihren Hohlräumen oberhalb der Wasseroberfläche Feinsediment und Schwemmmaterial anlagern und so neue Lebensräume entstehen, die schnell von beispielsweise Erlen und Weiden besiedelt werden. Unterhalb der Wasseroberfläche werden ebendiese Hohlräume regelmäßig ausgespült und bleiben so auf Dauer für unterschiedlichste Lebewesen erhalten. (PATT et al., 2009)



Abbildung 6: Steinsporn, links: 3D-Schema, rechts: Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung, 2017)

#### <u>Betonbuhnen</u>

Betonbuhnen sind Steinbuhnen, deren Zwischenräume mit Beton verfüllt wurden (dargestellt in Abbildung 7). Dies führt zu einer starken Verringerung der Flexibilität und häufig auch zur Unterspülung des gesamten Bauwerks. Infolge kommt es zu Bauwerksbewegungen oder zum Bruch des Buhnenkörpers. Um diesem Problem vorzubeugen, muss das Bauwerk tief in die Sohle des Flusses eingebunden werden. Bei starken Strömungen verhindert diese Bauform jedoch auch den Abtrag von einzelnen Bauwerksteilen und gewährleistet so eine andauernde Funktionserfüllung.



Abbildung 7: Betonbuhne, links: 3D-Schema, rechts: Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung, 2017)

#### <u>Wurfschlachten</u>

"Schlacht" ist ein altertümlicher Ausdruck für eine wasserbauliche Maßnahme, wie folgender Ausschnitt aus PIERER (1862, S. 202) zeigt: "*Schlacht, 1)* ein Damm [..] längs des Ufers, um das Wasser von demselben abzuhalten [...]". Diese Schlachten können aber auch dammartig quer zur Fließrichtung als Buhnen ausgeführt werden (ROHR, 2007). Wurfschlachten sind rampenartige Bauwerke, deren Bauhöhe auf Sohlniveau beginnend in Fließrichtung ansteigt. Dabei muss das gesamte Bauwerk sowohl in die Gewässersohle als auch in das Ufer eingebunden werden. Eine Wurfschlacht besteht aus einem Rahmen aus Rundhölzern, welcher mit Wasserbausteinen und Beton (alternativ auch ohne Beton) aufgefüllt wird. Eine Möglichkeit der Ausführung zeigt das 3D-Schema beziehungsweise die Konstruktionsskizze in Abbildung 8.



Abbildung 8: Wurfschlacht, Blickrichtung flussaufwärts, links: 3D-Schema, rechts: Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung, 2017)

#### <u>Stammbuhnen</u>

Für Stammbuhnen werden horizontale Holzstämme beziehungsweise Rundhölzer übereinander gelegt und an Holz- oder Stahlpiloten – die in die Gewässersohle gerammt werden – befestigt (Abbildung 9). Die vertikale Wand aus Totholz bietet unterschiedlichsten Lebewesen und Benthosorganismen Lebensraum und dient auch als Nahrungsquelle. Die Stabilität des Bauwerks ist abhängig von der Einbindetiefe der einzelnen Piloten in die Sohle. (EBERSTALLER-FLEISCHANDERL & EBERSTALLER, 2014)



Abbildung 9: Stammbuhne, Blickrichtung flussaufwärts, links: 3D-Schema, rechts: Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung, 2017)

Die nachfolgenden Punkte legen den Fokus auf die unterschiedlichen Design-Kriterien von Buhnen und deren mögliche Ausprägungsformen.

# 2.1.6 Buhnenorientierung

Die Buhnenorientierung wird als der Winkel zwischen dem Ufer flussabwärts und der Buhnenachse definiert (siehe Punkt 2.1.1) und wurde vorrangig durch praktische Erfahrungswerte festgelegt (COPELAND, 1983; KLUMP & BAIRD, 1992).

# 2.1.7 Buhnenlänge

Laut NACHTNEBEL (2003) richtet sich die Länge einer Buhne nach folgenden Parametern:

- Gewünschte Regelungsbreite
- Baumaterial
- Hydraulische Notwendigkeiten (zB gegenüberliegendes Ufer darf nicht gefährdet werden)
- Anforderungen zur Strukturverbesserung

Grundsätzlich gilt, dass kurze Buhnen kurze Abstände bedingen und so zu einem übermäßigen Bedarf an Material und zu unerschwinglichen Kosten führen (SOBHAN & DAS, 1999). Dafür haben Buhnenfelder mit kurzen Buhnen den Vorteil, dass sie schneller verlanden (NACHTNEBEL, 2003). Zu lange Buhnen hingegen erhöhen die Möglichkeit von Mäanderbildungen oder können die Strömung so sehr einengen, dass sich der allgemeine Zustand des Gewässers verschlechtert und die gegenüberliegende Uferlinie erodiert wird (SOBHAN & DAS, 1999).

Sowohl JHA et al. (2000) als auch SHRESTA et al. (2012) raten zu einer Buhnenlänge von nicht mehr als einem Fünftel der Flussbreite sowie einem Mindestmaß der 2,5-fachen erwarteten Kolktiefe.

### 2.1.8 Buhnenabstände

Den Abständen zwischen den einzelnen Buhnen kommt eine große Bedeutung zu, weshalb dieses Kriterium in der Literatur vielfach behandelt und diskutiert wird. Die Buhnenabstände sind abhängig von der Buhnenlänge, der Flussbreite, der Fließgeschwindigkeit, der Buhnenorientierung, der Form der Uferlinie sowie der gewünschten Funktion (Oosting et al., 2015; PRZEDWOJSKI et al., 1995; SOBHAN & DAS, 1999).

Bei zu kleinen Abständen werden die individuellen Strukturen der einzelnen Buhnen nicht optimal ausgenützt, das Buhnenfeld wäre ineffizient in Bezug auf die Strömungsregulierung und grundsätzlich teurer in der Ausführung (PRZEDWOJSKI et al., 1995). Bei zu großen Abständen kann der Umstand auftreten, dass die Strömung wieder zurück ans Ufer schwenkt bevor der Einfluss der nachfolgenden Buhne beginnt (PRZEDWOJSKI et al., 1995; SOBHAN & DAS, 1999). Dies würde zu Ufererosionen, Mäanderbildung, starken Fließgeschwindigkeitsunterschieden und in manchen Fällen zur Zerstörung oder Verlust der nachfolgenden Buhne führen (PRZEDWOJSKI et al., 1995).

Die Länge eines durch eine Buhne geschützten Uferstreifens beträgt mindestens das Zweifache ihrer eigenen Länge. Aus diesem Grund wird empfohlen, den Abstand auf keinen Fall kleiner zu gestalten (TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, 2004), da ansonsten zwei Bauwerke wie ein einzelnes wirken würden (AHMED et al., 2010). Für einen reinen Uferschutz ist es ausreichend, wenn der Abstand das Vier- bis Fünffache der Buhnenlänge beträgt, da so die Strömung in etwa auf die Mitte der nächsten Buhne trifft (NACHTNEBEL, 2003; ROSSOLL et al., 1992). Bei undurchströmbaren Bauwerke wird ein Abstand der drei- bis vierfachen Buhnenlänge empfohlen (AHMED et al., 2010). Bei PRZEDWOJSKI et al. (1995) werden anhand einer Tabelle (siehe Tabelle 1) unterschiedliche Meinungen bezüglich der Gestaltung der Abstände zusammengefasst.

Autor	Empfo Längenv	ohlenes verhältnis	Ufertyp	Bemerkung	
	A <sub>a</sub> /L <sub>B</sub>	A <sub>a</sub> /FB			
United Nations (1953)	1		Prallufer	General practice	
	2 – 2,5		Gleitufer		
Ahmad (1951)	4,29		Geraden		
	~ 5		Kurven		
Joglekar (1971)	2~2,5		-		
US Army (1984a)	2			Mississippi River	
Mathes (1956)	1.5				
Strom (1962)	3 - 5				
Acheson (1968)	3 - 4			Variiert abhängig zu Kurvatur und Gefälle	
	4		Geraden	α > 75°	
Altunin (1962)	3			$0.005 \le I \le 0.01$	
	2			I ≥ 0.01	
	2 – 6			Uferschutz	
Richardson et al. (1975)	3 – 4			T-Kopf für Schiffahrtswege	
	1,5 – 2			Tiefe Kanale für Schifffahrt	
Mamak (1956)	2 – 3	1			
		0.5	Prallufer		
Macura (1966)		5/4	Gleitufer		
		3/4-1	Geraden		
lansen et al. (1979)		1-2		In begradigten Flüssen	
		0.5-1			
Blench et al. (1976)	3,5				
Copeland (1983)	> 3		Prallufer		
Akantisz et al. (1983-1986		0.9-1		Φ=45-50° R/B=8-13	
1989)		1.1		Φ= 55° R/B=8	
		1.1 – 0.9		Φ= 55° R/B=13.5	
Kovacs et al. (1983)	1 – 2			Donau	
Mohan und Agraval (1979)	5			Überströmte Buhnen mit einer Höhe von 1/3 der Wassertiefe	
Maza Alvaroz (1090)	5,1 – 6,3		Geraden	Sloping-crested Buhnen zum	
1969)	2,5 – 4		Kurven	Uferschutz	

A<sub>a</sub>= Abstand zwischen den Buhnen L<sub>B</sub> = Buhnenlänge

FB = Flussbreite

#### Tabelle 1: Literaturvergleich nach PRZEDWOJSKI et al. (1995, S. 336)

In der Praxis kann von einer Faustregel ausgegangen werden, die ein Verhältnis von Abstand zu Buhnenlänge von zwei bis fünf vorgibt. Diese Vorgehensweise hat in der Vergangenheit unabhängig von Flussbreite, Flusstypologie, etc. zu zufriedenstellenden Ergebnissen geführt (PRAMOD & RAVINDRA, 2012). Zusätzlich gilt der Grundsatz, dass Buhnen an Gleitufern doppelt so weit voneinander entfernt platziert werden können wie an Prallufern (KLUMP & BAIRD, 1992; SOBHAN & DAS, 1999; NACHTNEBEL, 2003; PRZEDWOJSKI et al., 1995).

Auch das Verhältnis Bauwerksabstand zu Bauwerkshöhe beeinflusst die Strömungsverhältnisse im Buhnenfeld. Große Abstände zwischen den Buhnen bedingen bei Überströmung im Zuge von Hochwasserereignissen, dass jene Strömung, die über die flussaufwärts gelegene Buhne fließt, bereits vor dem nächsten Bauwerk wieder am Flussbett auftrifft. Dies führt zu starken Erosionen in diesem Bereich. Kleinere Abstände hingegen verhindern diese Erosion, indem sie die Strömung über das Buhnenfeld hinweg transportieren und somit die Scherkräfte entlang der Flusssohle reduzieren. Empfehlenswert ist ein Bauwerksabstand, der in etwa dem Siebenfachen der Bauwerkshöhe entspricht. (YOSSEF & VRIEND, 2010)

#### 2.1.9 Gefälle der Buhnenseiten und des Buhnenkopfes

Das Gefälle des Buhnenkopfes beeinflusst die Kolkausbildung in der Nähe des Buhnenkopfs und soll laut KEHE (1984) zwischen 3:1 und 5:1 liegen (KLUMP & BAIRD, 1992). NACHTNEBEL (2003) und LANGE & LECHER (1993) fassen dieses Feld jedoch breiter und empfehlen ein Gefälle des Buhnenkopfes zur Gewässermitte hin nach Abhängigkeit vom Fluss von 1:4 bis 1:10. YOSSEF & VRIEND (2010) verweisen in ihrer Studie auf ein Gefälle von 1:3.

Auch bezüglich des Gefälles der Buhnenseiten findet man in der Literatur keine einheitlichen Angaben. Während bei KEHE (1984) für die flussaufwärtsgerichtete Seite Verhältniswerte von 1,5:1 und 3:1 und für die flussabwärtsgerichtete Seite Werte von 2:1 und 4:1 zu finden sind, soll laut NACHTNEBEL (2003) und LANGE & LECHER (1993) die Steigung der Oberwasserböschung ein Verhältnis von 1:2 bis 1:3 und die Unterwasserböschung 1:3 bis 1:4 aufweisen.

# 2.2 Morphologische und hydrologische Einflüsse von Buhnen

Als strukturierendes Element beeinflussen Buhnen durch Ablagerungen und Kolkbildung einerseits die Flussmorphologie andererseits in Folge der Veränderung des Strömungsmusters auch die Hydrologie. Folgender Abschnitt bietet einen Überblick über aktuelle Forschungen bezüglich Auswirkungen von Buhnen auf die Flussmorphologie. Zudem werden die bisher erläuterten Ausprägungen unterschiedlicher Klassifizierungen und Design-Kriterien in Hinblick auf ihre Einflüsse auf Strömungsmuster und Ablagerungs- und Erosionsprozesse betrachtet.

Strömungsmuster entstehen primär durch die Teilung der Hauptströmung am Buhnenkopf. Während ein Großteil der Strömung abgelenkt wird, fließt der Rest in das Buhnenfeld und bildet dort je nach Ausrichtung der Bauwerke mehr oder weniger stark ausgeprägte Wirbel. (SUKHODOLOV et al., 2002) Dabei darf aber nicht außer Acht gelassen werden, dass die Ausbildung der Strömungsmuster dreidimensional erfolgt und alle Wasserschichten von unterschiedlichen Strömungsprozessen beeinflusst werden (SUKHODOLOV, 2014). Die Bildung von Strömungswirbel und -mustern in der Nähe von einzelnen Buhnen unterscheidet sich signifikant von jener in Buhnenfeldern.

### 2.2.1 Strömungsmuster in der Umgebung einzelner Buhnen

Die einfachste Form einer Buhne ist ein einzelnes Bauwerk entlang eines geraden Flussabschnittes. Durch die Einengung des Flussquerschnittes beeinflusst das Bauwerk in seiner Umgebung maßgeblich die Bewegungs- und Fließstruktur des Gewässers, die Fließgeschwindigkeit steigt. Strömungsmuster in der Nähe einer einzelnen Buhne wurden vielfach untersucht und YosseF (2002) beschreibt folgende Parameter (Verortung der Zonen sind Abbildung 10 zu entnehmen):

- Separation region

Im Unterwasser der Buhne formt sich ein geschützter, von der Hauptströmung abgetrennter Bereich. Grundsätzlich kann das Strömungsfeld in vier unterschiedliche Zonen unterteilt werden: Hauptströmungszone, Zirkulationszone, *Mixing Layer* und *Seperation Point*. Die Hauptströmungszone bezeichnet den beschleunigten Strömungsbereich zwischen Buhnenkopf und gegenüberliegender Uferseite.

Die Zirkulationszone liegt flussabwärts und besteht üblicherweise aus zwei großen Wirbeln. Das Zentrum des größeren Wirbels ist etwa sechs Buhnenlängen vom Bauwerk entfernt, während der kleinere ungefähr eine Buhnenlänge entfernt liegt.

Zwischen Hauptströmungszone und Zirkulationszone bestehen Strömungsdifferenzen. Dieser Umstand führt zu Scherkräften zwischen den unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten – in diesem Bereich kommt es zur Ausbildung eines *Mixing Layers*. Der *Seperation Point* differiert je nach Strömungsverhältnissen der Wirbel im *Mixing Layer* und dem unstabilen Gleichgewicht zwischen der Hauptströmung und jener in der Zirkulationszone.

Die *Seperation Region* ist demnach jener Bereich, zwischen der Trennung des Hauptstroms am Buhnenkopf bis zum *Seperation Point* und kann zwischen sieben bis fünfzehn Mal so lang sein wie das Bauwerk.

- Horizontale, große Wirbel

Ein anderer wichtiger Aspekt eines Strömungsfeldes einer Einzelbuhne sind die horizontalen Wirbel, die am Buhnenkopf entstehen und sich im *Mixing Layer* ausbreiten. HIGHAM et al. (2017) untersuchten in ihrer Studie das spontane Wachstum dieser Wirbel. Die Forschung resultiert in der Erkenntnis, dass die Wirbel, welche an der Spitze und flussaufwärts des Hindernisses – der Buhne – entstehen, mit jenen des *Mixing Layers* interagieren und dies zu einer plötzlichen Ausdehnung der Wirbel führt.

- Fluktuation der Wasseroberfläche

Durch die flussabwärts gerichtete Bewegung der horizontalen Wirbel kommt es zu einer Fluktuation der Wasseroberfläche. Zusätzlich ist der Wasserspiegel an der flussaufwärts gerichteten Seite der Buhne höher als auf der flussabwärts gerichteten Seite. Dieser Einfluss des Bauwerks auf den Wasserspiegel erstreckt sich auf rund die zehnfache Buhnenlänge.



Abbildung 10: Verortung der unterschiedlichen Strömungszonen (Eigene Darstellung, 2017, nach Ouillon & Dartus, 1997)

# 2.2.2 Strömungsmuster in Buhnenfeldern

In Buhnenfeldern bilden sich in den Zirkulationszonen zwischen den einzelnen Bauwerken ebenfalls bestimmte Strömungsmuster aus. Auch in diesem Fall teilt sich die Hauptströmung am Buhnenkopf des ersten Bauwerks und wird beschleunigt. Ein Teil der Hauptströmung wird im flussaufwärtsgerichteten Bereich der nächsten Buhne zwischen die Bauwerke gelenkt. Dies führt zu einem zirkulären Rückfluss – einem großen horizontalen Wirbel, welcher das Feld flussabwärts der ersten Buhne wieder verlässt. REHBOCK (1926) benutzte schwimmende Kerzen, um diese Strömungsmuster darzustellen (Abbildung 11). Der Partikelaustausch zwischen Buhnenfeld und Hauptströmung findet dabei über den *Mixing Layer* oder über große Wirbelsysteme, die sich entlang des Buhnenkopfes bilden, statt (UIJTTEWAAL et al., 2001).



Abbildung 11: Strömungsmuster, dargestellt durch schwimmende Kerzen - Fließrichtung von links nach rechts (REHBOCK, 1926)

Grundsätzlich können Strömungsmuster in Buhnenfeldern nach der Ablenkung der Hauptströmung klassifiziert werden (COPELAND, 1983; KLINGELMANN et al., 1984). In Abbildung 12 werden sechs unterschiedliche Typen mit größer werdenden Buhnenabständen nach COPELAND (1983) dargestellt.

- Bei geringen Abständen zwischen den einzelnen Bauwerken wird die Hauptströmung vom Buhnenfeld abgelenkt und fließt am Feld entlang. Innerhalb des Feldes bilden sich ein oder mehrere Wirbel (Typ 1 und 2). Diese Typen eignen sich besonders für den Erhalt eines Navigationsbereichs für Schiffe, da sich entlang der Streichlinie ein kontinuierlicher, tiefer Kanal bildet.
- Bei mittleren Abständen fließt die Hauptströmung in das Buhnenfeld und wird auf die flussabwärts liegende Buhne gelenkt. Dabei entstehen entweder zwei Wirbel – wobei der flussaufwärts liegende stärker ist als der flussabwärts (Typ 3), oder ein einzelner, starker Wirbel (Typ 4)
- Sehr große Abstände zwischen den Bauwerken führen dazu, dass die Hauptströmung bis an das Ufer gelangt. Dabei können zwei kleinere Wirbel auf beiden Seiten der Strömung entstehen, welche dem Ufer etwas Schutz bieten (Typ 5). Fehlt dieser Schutz der beiden Wirbel, wird das Ufer direkt angegriffen (Typ 6).



Abbildung 12: Strömungsmuster in Buhnenfeldern mit steigendem Verhältnis zwischen Bauwerksabstand und -länge (COPELAND, 1983)

Auch SUKHODOLOV et al. (2002), McCoY et al. (2008) sowie WEITBRECHT et al. (2008) haben den Zusammenhang zwischen den Strömungsmustern und dem Verhältnis von Bauwerksabstand A<sub>a</sub> und Bauwerkslänge L<sub>B</sub> untersucht (Abbildung 13). Liegt dieses Verhältnis unter 0,5 (A<sub>a</sub> < L<sub>B</sub>), bilden sich zwei Strömungswirbel entlang der Bauwerke. Bei einem Verhältnis zwischen 0,5 und 2,0 (A<sub>a</sub>  $\simeq$  L<sub>B</sub>) entsteht ein einzelner, großer Wirbel. Ist der Abstand größer als die Bauwerkslänge (A<sub>a</sub> > L<sub>B</sub>) – Verhältnis über 2,0 – bilden sich zwei Wirbel entlang des Ufers aus. Der flussabwärts liegende Wirbel ist dabei größer als der flussaufwärts liegende.



Abbildung 13a-c: Wirbelbildung abhängig von A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> (Eigene Darstellung, 2017, nach Suкноdolov et al., 2002)

Weiterführende Studien von SUKHODOLOV et al. (2016) beschäftigen sich mit dem Einfluss von Vegetation auf die Strömungsmuster. Dabei wurden Buhnenfelder mit einem Abstand-Längen-Verhältnis von größer 2,0 (Abbildung 13c) mit künstlicher Vegetation (Holzzylinder für starre Ufervegetation und Silikonstrukturen für flexible aquatische Vegetation) besetzt. In bewachsenen Buhnenfeldern wird die Bildung eines zweiten Wirbels verhindert, zusätzlich wird die Fließgeschwindigkeit der gesamten Zirkulationszone verringert. Der *Mixing Layer* zwischen Hauptströmung und Zirkulationszone im Buhnenfeld hingegen wird durch Vegetation kaum beeinflusst.

Die beschriebenen Strömungsmuster entstehen bei Bauwerken, deren Oberkante über dem Wasserspiegel liegt. Dauerhaft überströmte Buhnen (Oberkante liegt unterhalb des Wasserspiegels) bedingen viel komplexere Strömungsverhältnisse, da sich die Strömung, welche in Richtung Buhne transportiert wird, teilt und zusätzlich über die Bauwerksoberkante fließt. McCoy et al. (2007) und TERAGUCHI et al. (2011) haben sich intensiv mit diesem Thema auseinander gesetzt. Da der Fokus dieser Masterthesis jedoch auf nicht-überströmten Bauwerken liegt, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

#### 2.2.3 Ablagerungs- und Erosionsprozesse

Verortung, Interaktion und Energieaustausch des primären und sekundären Wirbels beeinflussen den Ablagerungsprozess und definieren bestimmte Ablagerungsmuster. Tabelle 2 stellt vereinfacht Ablagerungen mit unterschiedlichen räumlichen Verteilungen zwischen zwei Bauwerken dar. Erklärungsansätze für diese räumlichen Verteilungen werden von SUKHODOLOV et al. (2002) geboten. Demnach entsteht Typ 1, die dreiecksförmige Ablagerung flussabwärts, durch ein Zirkulationsmuster aus zwei Wirbeln. Dabei ist der Wirbel an der flussabwärts liegenden Buhne stärker ausgeprägt, während die Strömung im zweiten Wirbel schwächer ist. Für die dreiecksförmige Ablagerung flussaufwärts (Typ 2) gilt die umgekehrte Ausbildung der beiden Wirbel. Wellenförmige Ablagerungen (Typ 3 und 4) repräsentieren je einen stärkeren und einen kaum vorhandenen Wirbel. Für die Typen 5, 6 und 7 werden in der angeführten Quelle keine Erläuterungen dargelegt.

Тур	Definition	Ablagerungsmuster	Тур	Definition	Ablagerungsmuster
1	Dreiecksförmige Ablagerung flussabwärts		2	Dreiecksförmige Ablagerung flussaufwärts	+
3	Wellenförmige Ablagerung flussabwärts		4	Wellenförmige Ablagerung flussaufwärts	



Tabelle 2: Ablagerungsmuster nach SUKHODOLOV et al. (2002; Eigene Darstellung, 2017)

HENNING & HENTSCHEL (2013) haben in einer 10-jährigen Felduntersuchung an der Elbe die Ablagerungs- und Erosionsmuster von unterschiedlichen Buhnentypen auf Basis von Strömungsanalysen erforscht. Reguläre (gerade) Bauwerke (Abbildung 14a), deren Oberkante über dem Wasserspiegel liegt, entwickeln einen großen Strömungswirbel in der Mitte des Buhnenfeldes und zwei kleinere an den Buhnenwurzeln (siehe auch Abbildung 12 - Typ 1). Sediment und Geschiebe, welches durch die Kolkbildung an den Buhnenköpfen aktiviert wird, wird entlang des Mixing Layers transportiert. Aufgrund der verringerten Fließgeschwindigkeiten lagert sich hier grobes Material ab, während Feinsediment in das Buhnenfeld weiter getragen und vom großen Wirbel aufgenommen wird. In der Mitte des Buhnenfeldes - des Wirbels tendieren die Fließgeschwindigkeiten gegen Null – dies führt zu einer Sedimentablagerung. Zusätzlich werden feine Partikel von den beiden kleinen Wirbeln aufgenommen und in den Ecken des Buhnenfeldes abgelagert. Sediment, welches nicht im Buhnenfeld abgelagert wird, wandert wieder zurück in den Mixing Layer und kann in Folge erneut in den Kreislauf aufgenommen werden. Überspülte Bauwerke bewirken eine höhere Fließgeschwindigkeit im Buhnenfeld. Durch die Überströmung bildet sich auf der strömungsabgewandten Seite der Buhne ein vertikaler Wirbel, der in weiterer Folge zu Erosion führt. Durch die Rückströmung wird das so aktivierte Sediment direkt entlang des Bauwerks abgelagert. Diese Prozesses sind jedoch schwierig vorherzusagen und abhängig von einer Reihe von anderen Parametern (Geometrie, Material, Sediment, etc.). Geschlitzte Buhnen führen zu einer Strömungsdiversität im Buhnenfeld aufgrund der konstanten Störung des Hauptwirbels durch die Strömungsenergie, welche durch den Schlitz in das Feld gelangt. Zusätzlich führt die Erosion flussabwärts des Schlitzes zu einer größeren Heterogentät des Flussbettes und Ablagerung kann durch die zusätzliche Strömung verhindert werden. Überspülte, geknickte Bauwerke lenken die Strömung in die Mitte des Buhnenfeldes und aktivieren so in diesem Bereich Sedimenttransport. Gleichzeitig wird durch höhere Fließgeschwindigkeiten die Ablagerung verhindert.



Abbildung 14a-d: Ablagerungs- und Erosionsmuster für a) nicht überspülte Buhnen, b) überspülte Buhnen, c) geschlitzte, nicht überspülte Buhnen und d) geknickte, überspülte Buhnen (HENNING & HENTSCHEL, 2013)

PRZEDWOJSKI (1995) untersuchte Erosionsvorgänge (die Kolkbildung) an zwei ausgewählten Prallufern des Flusses Warta (Polen). Das Ergebnis dieser Feldstudie, in welcher Flusstiefe, durchschnittliche Fließgeschwindigkeit, Abstand und Lage der Bauwerke relativ zur Kurvenform und Bauwerksausrichtung miteinbezogen wurden, lautet, dass ein lokaler Kolk immer eine Funktion all dieser genannten Parameter ist. Die tiefsten Kolke entstehen innerhalb des Buhnenfeldes flussabwärts des Kurvenscheitelpunktes, während am Anfang und am Ende der Biegung die geringsten Kolktiefen auftreten. Zusätzlich zeigt sich eine starke Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeiten und Flussbettbeschaffenheit und dass die wirksame Länge einer Buhne (geschützter Bereich flussabwärts) nicht der Grund für eine Kolkbildung sondern ein daraus entstandener Effekt ist.

Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass eine gewisse Dynamik in den Ablagerungs- und Erosionsprozessen besteht, die zu einem laufenden Materialaustausch führt (CONSTANTINESCU et al., 2009).

#### 2.2.4 Einbauwinkel

Die Auswirkungen von deklinanten, inklinanten und rechtwinkligen Bauwerken wurde bereits bei Punkt 2.1.1 erläutert. Des Weiteren können Buhnen auch geknickt errichtet werden. Das bedeutet, dass die uferseitige Bauwerkshälfte eine andere Ausrichtung aufweist (inklinant), als die flussseitige (deklinant) ALAUDDIN & TSUJIMOTO (2012) haben in ihrer Studie untersucht, wie geknickte Buhnen konfiguriert werden müssen, um die optimale Wirkung sowohl bei Hochwasser als auch bei Niedrigwasser zu erreichen. Dabei wurden drei unterschiedliche Errichtungsweisen getestet. Für die erste Bauform *m1* wurde die erste Hälfte des Bauwerks inklinant (100 ° Neigung zur Uferlinie flussabwärts) und die zweite Hälfte deklinant (80 ° Neigung zur Hauptströmung) errichtet. Die uferseitige Hälfte der Bauform *m2* wurde rechtwinklig und die flussseitige deklinant (70 ° Neigung zur Hauptströmung) konfiguriert. Die dritte Errichtungsform *m3* war eine parabolisch gebogene, deklinante Buhne mit einer durchschnittlichen Neigung von 80° zur Hauptströmung. Die deklinante Ausrichtung der zweiten Hälfte von m1 und m2 sowie die gebogene Form von m3 sollen dabei eine Konzentration der Strömung auf die Flussmitte und dort auf diese Art einen tieferen Kanal bedingen. Zusätzlich sollen große Auswirkungen auf die gegenüberliegende Uferseite verhindert sowie die Tendenz zur Kolkbildung am Buhnenkopf bei Hochwasser minimiert werden. m2 bewirkte im Zuge dieser Untersuchung eine stärkere Erosion der Flusssohle (auch bei Niedrigwasser), während m1 eine stärkere Verlandung im Buhnenfeld forcierte. Schutz vor Ufererosion bieten alle drei unterschiedlichen Ausbildungsformen. Die optimale Funktionsweise lieferte in dieser Studie m2 auf Basis der Strömungsablenkung bei Niedrigwasser und des Uferschutzes bei Hochwasser. Es wird jedoch auch angeführt, dass weitere Untersuchungen zu unterschiedlichen Bauwerksabstand-Längen-Verhältnissen und Neigungen durchgeführt werden müssen.

### 2.2.5 Art der Durchströmung

KANG et al. (2011) erforschten in ihrer Studie "Permeability effects of single groin on flow characteristics" die Auswirkungen der Durchströmbarkeit von Buhnen auf die Strömungseigenschaften. Dabei wurden undurchströmbare, durchströmbare (20 %, 40 %, 60 % und 80 % Durchlässigkeit) sowie dreiecksförmige (Höhe des Bauwerks steigt ab Sohlniveau vom Buhnenkopf zur Wurzel kontinuierlich an) untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass undurchlässige Buhnen eine Zunahme der Fließgeschwindigkeit am Buhnenkopf sowie ein breites Spektrum an Zirkulationsmustern und -zonen auf der strömungsabgewandten Seite bedingen. Dies wirkt sich stark auf die Kolkbildung und die Flussbettveränderungen im Hauptströmungskanal aus. Mit zunehmender Durchströmung der Buhnen (beispielsweise größere Abstände bei Holzpilot-Bauwerken) sinken die Fließgeschwindigkeit am Buhnenkopf und die Stärke der Verwirbelungen sowie die Größe des Zirkulationsbereiches (Abbildung 10). Bei einer Durchlässigkeit von 40 % entwickeln sich die Zirkulationszone und die Verwirbelungen noch rund um die Piloten des Bauwerks, steigt die Durchlässigkeit auf über 60 %, findet keine Reduktion der Fließgeschwindigkeit statt. Für dreiecksförmige Buhnen gilt, je flacher sie ausgeführt werden, desto weniger beschleunigen sie die Fließgeschwindigkeit am Buhnenkopf. Bei dieser Bauform bildet sich zudem ein schwächerer Wirbel als bei undurchlässigen Bauwerken - dies führt wiederum zu einer geringeren Tendenz zur Kolkbildung am Buhnenkopf. Auch die

Rückströmung entlang des Ufers ist schwächer ausgeprägt. Aufgrund der Sicherung der Tiefe des Hauptströmungskanals, der geringen Kolkbildung und der Entwicklung von Lebensraum in der Zirkulationszone eignen sich dreiecksförmige Buhnen für die unterschiedlichsten Anwendungsformen.

Die Ergebnisse der Studie von TERAGUCHI et al. (2011) schließen sich trotz differierendem Versuchsaufbau jenen von KANG et al. (2011) an. Zusätzlich zu den Strömungseigenschaften durchlässiger und undurchlässiger Bauwerke betrachteten sie auch die Auswirkungen auf die Ablagerungs- und Erosionsprozesse. Die Flusssohle rund um undurchlässige Buhnen verändert sich aufgrund der ausgeprägten Strömungsmuster und differierenden Fließgeschwindigkeiten stärker als im Nahbereich von durchlässigen Buhnen. Diese Erosionsvorgänge führen zudem zu stärkeren Sedimentablagerungen flussabwärts der Bauwerke. Durchlässige Buhnen hingegen bedingen nur geringe Erosionen direkt an der Bauwerksstruktur und lagern das erodierte Material in Ufernähe ab.

Auch YEO et al. (2005) untersuchten die Unterschiede von durchlässigen und undurchlässigen Buhnen in Bezug auf die Fließgeschwindigkeit am Buhnenkopf und Strömungsmuster in Verbindung mit der Bauwerkslänge. In den Modellversuchen wurden vier unterschiedliche Verhältnisse von Buhnenlänge zu Kanalbreite (0,10, 0,15, 0,20 und 0,25) und fünf unterschiedliche Durchströmungsstufen (0 %, 20 %, 40 % und 60 %) getestet. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Durchlässigkeit starken Einfluss auf die Veränderung der Fließgeschwindigkeit hat. Undurchlässige Bauformen beschleunigen die Strömung auf das 1,7fache ihrer Ausgangsgeschwindigkeit, während bei durchströmbaren Bauwerken dieser Faktor bei 1,1 liegt. Zusätzlich wurde die Veränderung des Winkels zwischen der Hauptströmung und jener Linie, welche den Buhnenkopf und den *Seperation Point* verbindet (*Seperation Length*), gemessen. Der *Seperation Point* ist vereinfacht jener Punkt, an welchem die Hauptströmung wieder bis an die Uferlinie reicht und ein Teil der Strömung Richtung Bauwerk abgelenkt wird (Abbildung 10). Je durchlässiger das Bauwerk ausgeführt wird, desto größer ist dieser Winkel. Mit zunehmender Bauwerkslänge wird der Winkel kleiner. Die *Seperation Length* sinkt demnach mit zunehmender Durchlässigkeit und steigt bei längeren Bauwerken.

Für die Vollständigkeit wird an dieser Stelle erwähnt, dass im asiatischen Raum noch eine alternative, dritte Form der Durchströmbarkeit bekannt ist. Bei diesen so genannten *Bandals* wird der untere Bereich der Buhne aus Bambusstangen – das heißt durchströmbar – errichtet, während im oberen Bereich dichte Bambusmatten angebracht werden. Diese Form der Errichtung dient vor allem dem Erhalt von schiffbaren Gewässertiefen bei Niederwasser. Dabei werden durch die undurchströmbare Bambusmatte die schnelleren Fließgeschwindigkeiten an

der Wasseroberfläche in Richtung Flussmitte gelenkt. Die langsamen, sedimentreichen Strömungen entlang der Flusssohle können die Bambusstangen durchfließen und lagern das Material in Ufernähe ab. (ZHANG & NAKAGAWA, 2018) Da diese Bauform keine Anwendung im europäischen Raum findet, wird in dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen.

## 2.2.6 Überströmung

MENDE (2012) beschäftigt sich mit bei Niederwasser überströmten Bauwerken, so genannten Lenkbuhnen (Abbildung 15). In ihrer Wirkung ähneln sie klassischen Sohlschwellen, bedingen jedoch eine Spiralströmung, welche sohlnahes Wasser in Richtung Bauwerk lenkt. Oberflächenwasser mit schnellerer Fließgeschwindigkeit hingegen wird vom Bauwerk weg transportiert. Bedingt durch den Massenund Energieaustausch kommt es im Umgebungsbereich Lenkbuhne verminderten Fließgeschwindigkeiten der zu und Sedimentablagerungen. Die Hauptströmung des Flusses hingegen wird vom Bauwerk abgelenkt, beschleunigt und führt zu Erosionen des Flussbettes.



Abbildung 15: Isotachen-Darstellung eines geraden Flussabschnittes ohne (links) und mit Lenkbuhne (rechts) (SINDELAR & MENDE, 2009)

Die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse bei überströmten und nicht überströmten Bauwerken untersuchten YosseF & VRIEND (2011). Während nicht überströmte Buhnen durch ausgeprägte Wirbel im Buhnenfeld, die durch den Austausch mit der Hauptströmung in Bewegung gehalten werden, gekennzeichnet sind, ist dieses Zirkulationsmuster bei überströmten Bauwerken nicht zu beobachten. Bei diesen Bauwerken kann von einem Bereich mit langsamer Fließgeschwindigkeit gesprochen werden, der durch ein sich veränderndes Muster an Beschleunigung und Verlangsamung der Strömung über und um die Buhne geprägt ist. Auch in Bezug auf den *Mixing Layer* (Abbildung 10) sind Unterschiede erkennbar. Während sich dieser bei nicht überströmten Buhnen am Buhnenkopf bildet und beim Transport flussabwärts größer wird, bleibt er bei überströmten Bauwerken aufgrund der kontinuierlichen Turbulenzen der aufeinander folgenden Buhnen in seiner Ausbreitung gleich. Vor allem bei überströmten Bauwerken bilden sich durch ein geringeres Gefälle des Bauwerkkopfs (siehe Punkt 2.1.9) geringere Strömungsturbulenzen aus. Die Verlängerung des Kopfes verbreitert zudem den *Mixing Layer* und verringert starke Wirbelbildung. (UIJTTEWAAL, 2005)

### 2.2.7 Erscheinung im Grundriss

L-förmige Buhnen zeichnen sich durch einen rechtwinklig zur Strömung errichteten Körper und einem parallel zur Strömung ausgerichteten Kopf aus sowie einer vermehrten Sedimentablagerung im Buhnenfeld. DEHGHANI et al. (2013) untersuchten die Auswirkungen von L-förmigen Buhnen in Bezug auf die Kolkbildung am Buhnenkopf. Resultate dieser Studie zeigen, dass L-förmige Bauwerke, deren Kopf (Fuß der L-Form) flussaufwärts gerichtet ist, eine geringere Tendenz zur Kolkbildung aufweisen, als gerade oder flussabwärts gerichtete Buhnenköpfe, und sich diese Kolke hauptsächlich in der geschützten Zone zwischen Kopf und Ufer entwickeln. Flussabwärts gerichtete Buhnenköpfe hingegen bedingen eine geringe Kolkbildung flussaufwärts des Bauwerks.

SAFARZADEH et al. (2016) untersuchten mittels einer 3D-Modell-Strömungsanalyse die Unterschiede bestimmter Parameter (Wirbelbildung am Buhnenkopf entlang des Flussbettes horseshoe vortex system (HSV), Separation Length und Mixing Layer - siehe Abbildung 10) an drei Bauwerksformen: einzelne, gerade Buhnen und zwei T-Buhnen mit unterschiedlichen Kopflängen (7,5 cm und 15 cm). Die Simulationen fanden dabei in einem kontrollierten Umfeld eines 11 m langen und 1 m breiten Becken statt. Im Zuge der Untersuchungen konnte beobachtet werden, dass an geraden Bauwerken das HSV-System - das erodierende Wirbelsystem entlang der Flusssohle am Buhnenkopf – stärker ausgeprägt ist als an Buhnen mit kurzen T-Köpfen und sich an Bauwerken mit langen T-Köpfen dieses Wirbelsystem gar nicht erst ausbildet. Zudem ist das Zentrum des HSV-Systems bei T-förmigen Buhnen weiter von der Flusssohle und der Struktur des Bauwerks entfernt und flussabwärts lösen sich Strömungswirbel, die in Verbindung mit dem HSV-System stehen, schneller auf als bei geraden Bauwerken. Vor allem bei Bauwerken mit längeren T-Köpfen ist diese schnelle Auflösung des bodennahen Wirbelsystems zu beobachten. Laut dieser Studie sind die Einflüsse der Bauwerksform vor allem in der bodennahen Schicht von großer Bedeutung. Dort entwickeln sich zwei Zonen mit beschleunigter Fließgeschwindigkeit, eine entlang des Mixing Layers und eine weiter in Richtung Flussmitte. Die Zirkulationszone flussabwärts der Buhne unterscheidet sich bei geraden Bauwerken und Buhnen mit langen T-Köpfen auch in ihrer horizontalen Ausbildung. Während diese Zone bei geraden Buhnen entlang des Flussbettes kürzer ist als in oberflächennahen Bereichen, bewirken lange T-Köpfe die umgekehrte Ausprägung. Die Zentren der Zirkulationszonen verlagern sich dabei bei zunehmender Kopflänge (gerades Bauwerk – kurzer T-Kopf – langer T-Kopf) weiter flussaufwärts und damit näher zum Bauwerk. Die transversalen Fluktuationen des *Mixing Layers* von T-Buhnen sind größer als bei geraden Bauwerken. Dies bedingt eine stabilere Zirkulationszone bei geraden Buhnen.

# 2.3 Zustandsbewertungen von ingenieurbiologischen und technischen Bauwerken

Alle technischen Bauwerke – besonders die Bauwerke zum Schutz vor Naturgefahren aufgrund der hohen Belastungen, denen sie standhalten müssen – sind gewissen Alterungs- und Abnutzungsprozessen unterworfen. Diese beschränkte Lebensdauer gilt es durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung zu maximieren. (SUDA et al., 2007)

Ingenieurbiologische Systeme haben aufgrund der Verwendung von Pflanzen zur Sicherung an Fließgewässern und Böschung (FLORINETH, 2012) komplexere Ansprüche an Zustandsbewertungen. ingenieurbiologischen Bauwerken Bei kommt einerseits die stabilisierende Wirkung unterschiedlicher Funktionen der Vegetation zum Einsatz, andererseits werden auch häufig technische, unbelebte Hilfsmittel verwendet, die vorübergehend (bis zur vollständigen Entwicklung der Pflanzen) oder permanent die Funktionstauglichkeit der Sicherungsmaßnahme garantieren (Abbildung 16). Häufig verwendete Materialien sind dabei Holz, Stein, Naturfaser und Metall. Die Zustandsbewertung für ingenieurbiologische Systeme an Fließgewässern wurde von BMLFUW (2015) entwickelt und beschreibt das Bauwerk an sich sowie den unmittelbaren Nah- und Wirkungsbereich (Abflussprofil des Gewässerabschnittes bis zur Böschungskrone).



Abbildung 16: Lebenszyklus ingenieurbiologischer Systeme und deren Komponenten (BMLFUW, 2015)

Die Biologischen Komponenten eines ingenieurbiologischen Bauwerks werden anhand folgender Kriterien beurteilt (BMLFUW, 2015):
- Vegetationsstruktur
- Deckungsgrad
- Anwuchsrate
- Flexibilität
- Vegetationsdichte
- Neophyten
- Verbiss/Viehtritt

Die Bewertung des Zustandes der technischen Bauteile erfolgt durch die Dokumentation der Baustoffe und etwaiger Schäden und Mängel. Durch die Einteilung in eine Zustandsstufe wird die Funktionsfähigkeit dieser Komponente beschrieben. Folgende Schadensmechanismen werden für das technische System von BMLFUW (2015) definiert (für komplexere Bauwerke siehe SUDA, 2012):

- Abtrag von Bauwerksteilen
   Einzelne oder mehrere Komponenten fehlen oder sind nicht mehr an der vorgesehen
   Stelle
- Verwitterung

Fortschreitende Verwitterung schränkt die Funktionstauglichkeit des Bauwerks ein

- Baumängel

Das Bauwerk wurde nicht dem Zielzustand oder allgemein gültigen Regeln der Technik entsprechend errichtet

- Pilzbefall

Der Nah- und Wirkungsbereich eines Bauwerks wird anhand folgender Schadenstypen erhoben (BMLFUW, 2015):

- Uferanbruch

Abtrag von Festgestein und Lockermaterial an Uferböschungen

- Unterspülung

Erosion unter dem Bauwerk oder Bauwerksteilen

- Hinterspülung

Erosion hinter einem Uferschutzbauwerk

- Verklausung

Angeschwemmtes Treibgut oder Totholz verschließt teilweise oder vollständig den Gewässerquerschnitt

- Sturzbaum

Ins Gewässer gestürzter Baum beeinträchtigt Strömungs- und Abflussverhältnisse

Im Zuge dieser Arbeit liegt die Konzentration der Erhebungen auf den technischen Hilfsmitteln von ingenieurbiologischen Systemen sowie dem Nah- und Wirkungsbereich der Bauwerke. Aus diesem Grund wird in Folge zusätzlich der Vorgang der Zustandserhebung der Wildbach- und Lawinenverbauung für technische Schutzbauwerke erläutert. Die Instandhaltung von wasserbaulichen Schutzbauwerken auf Grundlage der ONR 24803, 2008 läuft in zwei Stufen ab:

- Inspektion: Diese Stufe dient dazu den momentanen Zustands des Bauwerks zu erheben, beschreiben und bewerten und umfasst alle Vorgänge, die zur Zustandsbewertung notwendig sind (SUDA, 2012).
- Instandsetzung: Die zweite Stufe beinhaltet alle konkreten baulichen Maßnahmen, welche wiederum in den Bauwerksunterhalt, die Erneuerung und die Veränderung eines Bauwerks unterteilt werden kann (SUDA et al., 2007).

Der Prozess der Instandhaltung wird in Abbildung 17 vereinfacht dargestellt.



Abbildung 17: Übersicht der Stufen der Instandhaltung von Schutzbauwerken (SubA et al., 2007)

### 2.3.1 Zustandserfassung

Basis der Inspektion ist die Erfassung des Zustandes eines Bauwerkes, welche in mehreren Stufen abläuft. (SUDA et al., 2007)

1. Erstaufnahme

Die Erstaufnahme dient der Erhebung des Bestandes von Schutzbauwerken in einem Bearbeitungsgebiet. Dabei wird für jedes Bauwerk ein Bestandsblatt angelegt und zusätzlich wird es kartographisch festgehalten. (SUDA et al., 2007)

2. Laufende Überwachung

Im Zuge der laufenden Überwachung wird die Gebrauchstauglichkeit der Schutzbauwerke festgestellt und etwaige äußerlich erkennbare Schäden dokumentiert. Diese Schäden oder Veränderungen des Bauwerks müssen dem Erhaltungspflichtigen schriftlich mitgeteilt werden. Grundsätzlich empfiehlt es sich, diese Überwachung im Rahmen der jährlichen Begehung des Wildbaches durchzuführen. (SUDA et al., 2007)

3. Kontrolle

Bei der Kontrolle werden mittels Augenschein Zustand und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks erhoben und in einem K-Protokoll eingetragen. (Suda et al., 2007)

4. Prüfung

Die Prüfung dient der genaueren Erhebung des Bauwerkszustandes, falls dieser bei der vorangegangenen Kontrolle nicht eindeutig beurteilt werden konnte. Dabei muss nach genauen Richtlinien erhoben, dokumentiert und bewertet werden. (SUDA et al., 2007)

### 2.3.2 Dokumentation

Die Dokumentation dieser Zustandserfassungs-Stufen ist für die Nachvollziehbarkeit aller durchgeführten Kontrollen und die Übersicht über den Lebenszyklus eines Bauwerks unerlässlich. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Dokumentations-Blätter nach BMLFUW (2015) erläutert.

Im Lauf der Erstaufnahme beziehungsweise nach der Fertigstellung von Bauwerken muss ein Bestandsblatt (B-Blatt) angelegt werden. Dieses dient zur Dokumentation aller wichtigen, technischen Parameter des Bauwerks. Bei baulichen Veränderungen im Zuge von Sanierungsmaßnahmen muss ein zweites B-Blatt erstellt werden, welches in Folge mit dem ersten auf Änderungen gegenkontrolliert wird. Folgende Punkte sollen durch die Dokumentation erfasst werden:

- Geographische Lage (Bundesland, Gemeinde, Einzugsgebiet, ...)
- Fortlaufende Bauwerksnummer
- Koordinaten des Bauwerks (bei Längsbauwerken durch Anfangs- und Endpunkt gekennzeichnet)
- Bauwerkskategorie (Schlüssel- oder Standardbauwerk)
- Baujahr und Zeitpunkt der letzten Sanierung (Umbau/Neubau)
- Bauwerksklassifizierung (Funktion, Typ, ...)
- Zusätzliche einwirkende Prozesse (Lawinen, Steinschlag, Wildbachprozesse, ...)
- Bauwerksgeometrie, etc.

Zusätzlich sind dieser Dokumentation Fotos beizufügen, um einen visuellen Vergleich unterschiedlicher Bauwerke zu ermöglichen.

Die Dokumentation der Laufenden Überwachung dient als Basis für Sichtungen des Bauwerks in Hinblick auf Beeinträchtigungen und Schäden und zusätzlich auch als Nachweis, dass laufende Kontrollen durchgeführt werden. Folgende Informationen müssen unter anderen in diesem Dokument enthalten sein:

- Angaben über Schäden und Mängel mit Bauwerksnummer, -kategorie, -klassifizierung und Anmerkungen zu den Schäden
- Skizzen und Fotos
- Anmerkungen zur Gebrauchstauglichkeit
- Beobachtungsprotokolle
- Geographische Lage, etc.

Das Protokoll der Kontrolle dient als Checkliste und Dokumentation der erhobenen Daten. Dabei muss eine vollständige Zustandsbewertung enthalten sein sowie vereinbarte, zukünftige Maßnahmen festgehalten werden. In einem K-Protokoll müssen folgende Punkte bearbeitet werden:

- Geographische Lage
- Bauwerksnummer
- Zustandsbewertung (Zustandsstufe)
- Sofortmaßnahmen aufgrund von Mängeln oder Schäden
- Maßnahmen zur Behebung von Schäden mit Angabe des Durchführungszeitraums
- Vergleich des erfassten Zustandes mit jenem der letzten Kontrolle
- Wenn notwendig: Anordnung einer Prüfung des Bauwerks

# 3 Untersuchungsgebiete

Die ausgewählten Untersuchungsgebiete liegen im oberösterreichischen Salzkammergut, welches am Nordrand der Alpen liegt und sich über das gesamte oberösterreichische Seengebiet bis hin zum Almtal erstreckt. Kleine Teile dieses historischen Kultur- und Landschaftsraumes liegen zudem in der Steiermark (das Ausseerland) sowie in Salzburg. (Salzkammergut Tourismus, 2016; Salzkammergut Tourismus, 2016)

Die fünf Untersuchungsgebiete – Grünaubach, Schindlbach, Rettenbach, Weißenbach und Wangauer Ache – verteilen sich auf das Gebiet des äußeren Salzkammergutes. Die Lage der Einzugsgebiete wird in Abbildung 18 dargestellt, wobei das Einzugsgebiet des Schindlbachs ein Teileinzugsgebiet des Grünaubachs ist.



Abbildung 18: Übersichtskarte der Untersuchungsgebiete (Eigene Darstellung, 2017)

# 3.1 Geologie

Das Gebiet des Salzkammergutes hat Anteil an drei unterschiedlichen Landschaftstypen: dem flachen Alpenvorland in der Molassezone, an den Mittelgebirgen der Flyschzone sowie den nördlichen Kalkalpen (SCHADLER, 1959). Aufgrund der differierenden Lage der Untersuchungsgebiete herrschen unterschiedliche geologische Gegebenheiten vor (Abbildung 19). Die Untersuchungsgebiete Grünaubach und Schindlbach liegen in einem Ausläufer der Flyschzone, deren Hauptgesteine Sandsteine, Mergel und Schiefertone sind. Besonderheit des Flysches ist aufgrund des hohen Mergel(Ton)anteils eine geringe Wasserdurchlässigkeit (GAMERITH et al., 2007). Diese wasserstauenden Schichten befinden sich aber unterhalb des Talniveaus, weshalb sich das Gebiet – gespeist durch Karstkomplexe des umgebenden Kalkgesteins – als hervorragender Grundwasserleiter erweist (PAVUZA & TRAINDL, 1984). Eine weitere Besonderheit, die es in Bezug auf bauliche Maßnahmen zu berücksichtigen gilt, ist die geringe Hangstabilität in Folge von wasserstauenden Gleitschichten und die daraus resultierende Anfälligkeit für Rutschungen in dieser Zone (GAMERITH et al., 2007; PETSCHKO et al., 2014).

Das Untersuchungsgebiet Rettenbach liegt in den nördlichen Kalkalpen, die in höheren Lagen durch ein Karstrelief gekennzeichnet sind und deren Schichten überwiegend aus Kalken und Dolomiten der mittleren Trias aufgebaut sind (BACHER et al., 2007a). Geomorphologisch ist das Gebiet geprägt von den Eigenschaften dieser gebirgsbildenden Gesteinsformationen, die in weiten Teilen durch glaziale und periglaziale Prozesse überprägt wurden (BACHER et al., 2007b). Eine Besonderheit der Landschaft ist die vorherrschende Karsthydrographie, für die das Fehlen einer durchgehenden Oberflächenentwässerung kennzeichnend ist. Die Mehrzahl der durch Karstgebiete führenden Flüsse entspringt außerhalb und stellt damit sogenannte Fremdlingsflüsse dar (EMBLETON-HAMANN, 2007).

Im Bereich des Weißenbachs und der Wangauer Ache dominieren quartäre Ablagerungen. Der Unterschied liegt primär im umgebenden Gestein. Der Weißenbach liegt in einer Region, die von Kalkgestein abgegrenzt wird, während das Gebiet der Wangauer Ache von der Flyschzone umgeben ist. Quartäre Ablagerungen sind einerseits glaziale Ablagerungen des Traungletschers und andererseits weiträumige Kiesschüttungen, in welchen Eintiefungen des Gewässernetzes bestehen. Vor allem im Donautal sind zur Zeit des Postglazials noch starke Sedimentation und Bildung von neuen Kies- und Schotterterrassen nachgewiesen. (VAN HUSEN, 1981)



Abbildung 19: Geologische Karte der Untersuchungsgebiete (Eigene Darstellung, 2017)

# 3.2 Klima

Das Gebiet des Salzkammergutes liegt in der Zone der Atlantischen Klimaprovinz und ist sowohl ozeanisch als auch kontinental geprägt. Daraus folgen geringere Temperaturamplituden im Jahresverlauf und mäßig warme Sommer. Die Winde kommen meist aus West bis Nordwest, das bedeutet viel feuchte Luft aus dem Atlantikgebiet. Dies bedingt ganzjährige Niederschläge und ein grundsätzlich humides Klima. (NAGL, 1983)

Diese humiden Tendenzen zeigen auch nachfolgende Klimadiagramme von Wetterstationen im Bereich der Untersuchungsgebiete (Abbildung 20). Der durchschnittliche Niederschlag pro Jahr liegt zwischen 1545,1 mm/a und 1725,6 mm/a. Diese hohe Niederschlagsrate wird durch die Staulage am Nordrand der Alpen bedingt (BACHER et al., 2007b). Das Niederschlagsmaximum wird im Hochsommer erreicht, während sich im Februar das Minimum (ca. 80 – 90 mm/Monat) abzeichnet. Der Herbst ist etwas ärmer an Niederschlag, während im Winter die Niederschlagsrate auf 130 – 140 mm/Monat ansteigt.

Die Temperaturkurve unterläuft eine jährliche Schwankung von ca. 20 °C, wobei die wärmsten Monate Juli und August sind und im Jänner die Durchschnittstemperatur knapp unter den Gefrierpunkt sinkt (-0,5 – -1,8 °C). Die kältesten gemessenen Temperaturen liegen dabei zwischen -20,0 °C und -25,1 °C.



Abbildung 20: Klimmadiagramme nach Walter/Lieth, links: Grünau, Mitte: Bad Ischl, rechts: Mondsee (Eigene Darstellung, 2017)

Vergleicht man die Klimadiagramme der drei Wetterstationen Grünau, Bad Ischl und Mondsee, so wird ersichtlich, dass im Gebiet das Almtals (Grünau) die Amplituden sowohl der Temperatur als auch des Niederschlags im Jahresverlauf am größten sind (vgl. Abbildung 20 li.).

Am niederschlagärmsten erweist sich das Gebiet um die Wetterstation Mondsee (vgl. Abbildung 20 re.). Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Region nicht in einer Tallage am Alpennordrand liegt und somit die Stauregen etwas schwächer ausfallen. Auch die Winter sind in diesem Gebiet etwas milder – dies lässt sich durch den mildernden Effekt des Mondsees erklären, der in den kalten Monaten als Wärmespeicher dient. (FUCHS et al., 2007)

### 3.3 Grünaubach

Der Grünaubach liegt im Gemeindegebiet Grünau, mündet im Ortsgebiet Grünau als rechtsufriger Zubringer in die Alm und ist durch seine markante Umlagerungstendenz geprägt. Das Einzugsgebiet ist 54,73 km<sup>2</sup> groß und verläuft birnenförmig von der Mündung in die Alm (501 m Seehöhe) ostwärts bis zum Kasberg (1.747 m Seehöhe). (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003)

Der Bach hat eine Länge von ca. 4,4 km und entsteht durch den Zusammenfluss von Stoßbach und Schindlbach. Wichtige Zubringer sind außerdem bei hm 31,9 rechtsufrig der Enzenbach und bei hm 28,6 orographisch links der Cederlingbach. (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003)

Die 30-jährliche Hochwassermenge beträgt 90 m<sup>3</sup>/s, während das rechnerische Höchsthochwasser eine Menge von 150 m<sup>3</sup>/s erreicht. (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003) Laut HÜBL & PÜRSTINGER (2003) ist mit einer Geschiebefracht von 12.460 m<sup>3</sup> zu rechnen, aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit und des nicht vorhandenen Raums zur Ablagerung geht die Wildbach- und Lawinenverbauung jedoch von einer Menge von nur 3.000 m<sup>3</sup> aus (BITTERLICH, 2006).

Das Einzugsgebiet liegt im Wuchsgebiet 4.1 nach KILIAN und somit im nördlich randalpinen Fichten-Tannen-Buchenwaldgebiet (KILIAN et al., 1993). Der Waldanteil beträgt rund 50 % und besteht hauptsächlich aus Mischwaldbeständen (Fichte, Lärche, Buche, Bergahorn und andere Laubbaumarten) – lokal sind auch Fichtenreinbestände zu finden. Forstliche Eingriffe sind nur kleinräumig möglich, da bei großflächigem Kahlschlag der Oberflächenabfluss steigen würde, der wiederum eine Zunahme des Hochwasserabflusses im Grünaubach bedingen würde. (Віттекцісн, 2006)

Abbildung 21 zeigt einen typischen Abschnitt im Mittellauf des Grünaubachs. Links findet sich eine harte Verbauung des Ufers, welches zusätzlich durch Stammbuhnen geschützt wird. Auf der rechten Uferseite – am Gleitufer – wird vermehrt Geschiebe angelandet.



Abbildung 21: Grünaubach, Blickrichtung flussabwärts

Aufgrund der ausgedehnten Wälder im Gebiet des Almtals wurde der Grünaubach früh zum Zweck der Holztrift und seit 1900 auch schutzwasserbautechnisch verbaut. Auf der gesamten Länge des Fließgewässers sind zahlreiche Holzquerwerke aufzufinden. Diese langjährigen Verbauungsmaßnahmen bedingen eine geringe Tendenz zur Umlagerung und einen stärkeren Transportcharakter. (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003)

In den 30iger Jahren wurde mit der Erweiterung der Infrastruktur und der Erschließung durch Fortstraßen die Holztrift eingestellt. Einige Triftbauten, wie z.B. Längsbauwerke in Trockenmauerung, sind noch erhalten geblieben, Klausen und der Rechen an der Almmündung sind verfallen. (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003, S. 332)

Die Wildbach- und Lawinenverbauung führt seit der Jahrhundertwende laufend neue Maßnahmen aus, die hauptsächlich dem Objektschutz und dem Erhalt geregelter Abflussverhältnisse dienen. Die Fließstrecke im Ortsgebiet Grünau bis zur Mündung in die Alm wurde im Zuge eines Projektes in den Jahren 1950 bis 1952 reguliert. (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003)

Tabelle 3 zeigt eine Auflistung aller Hochwasserereignisse von historischer Bedeutung. In den Jahren 1897 bis 1991 dürfte die Höchsthochwassermenge laut Berichten erreicht beziehungsweise überschritten worden sein. (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003)

Jahr	Wildbachchronik					
1807 upd 12 00 1800	Katastrophenhochwässer im Almtal.					
1897 010 12:09:1899	Verwüstung des gesamten Einzugsgebietes.					
1927	-					
Mai 1950	Durch das Hochwasser vom Mai 1950 wurde die Landesstraßenbrücke (Stahlbeton) über den Unterlauf im Ortsgebiet zerstört.					
1954	-					
1955	-					
31.0701.08.1977	Die Katastrophenhochwässer der Jahre 1977					
1978	(die Hochwasserwelle erreichte um ca. 04:30 Uhr ihren Höchststand) und 1978 verursachten mehrere Uferanbrüche, durch welche Verkehrswege unterbrochen wurden und Rutschungen entstanden. Ein Bachausbruch bei hm 6,0 führte zur Überflutung der angrenzenden Grundstücke, Objekte und Wege.					
01.08.1991	Durch die beiden Hochwässer des Jahres 1991					
25.12.1991	kam es zu ausgedehnten Schäden im Einzugsgebiet des Grünaubaches (Uferanbrüche, Schäden an Schutzbauten, Überschotterungen).					
07.08.1997	-					
12.08.2002	Das Hochwasserereignis vom August erreicht gegen Mittag seinen Höchststand. Es werden unzählige Triftbauten zerstört und in einigen Bereichen kommt es zu Überflutungen.					

Tabelle 3: Historische Hochwasserereignisse am Grünaubach (HüBL & PÜRSTINGER, 2003)

# 3.4 Schindlbach

Als Quellfluss des Grünaubachs liegt der Schindlbach ebenfalls im Gemeindegebiet Grünau. Er weist eine Länge von 3,44 km auf und entspringt dem Zusammenfluss von Oberer Schindlbach, Dürre Grünau und Schwarzaubach. Die Fläche des Einzugsgebiets des Schindlbachs beträgt 22,44 km<sup>2</sup>. (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003)

Das Gewässer erreicht bei einem 30-jährlichen Hochwasser eine Menge von 60 m<sup>3</sup>/s, bei einem 150-jährlichen Hochwasser rund 92 m<sup>3</sup>/s und die Höchsthochwassermenge beträgt 110 m<sup>3</sup>/s (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003). Zusätzlich gilt der Schindlbach als stark geschiebeführend, da vor allem die Quelläste Oberer Schindlbach und Dürre Grünau starke Geschiebeherde darstellen. Außerdem verschiebt sich die Dynamik des Schindlbachs in der unteren Fließstrecke von einer Umlagerungsstrecke zur Transportstrecke – dies verhindert eine Ablagerung des Geschiebes. Die Berechnungen der maximalen Geschiebefracht liegen zwischen 3.600 m<sup>3</sup> und 7.275 m<sup>3</sup>. (BITTERLICH, 2006)

Forstlich ist der Schindlbach gleich einzustufen wie der Grünaubach.

Abbildung 22 zeigt einen Flussabschnitt des Schindlbachs mit starker Geschiebeanlandung auf der orographisch linken Seite (im Bild rechts) und intensiver Ufervegetation.



Abbildung 22: Schindlbach, Blickrichtung flussaufwärts

Als Quellfluss des Grünaubachs gibt es für den Schindlbach keine gesonderten Aufzeichnungen bezüglich historischer Verbauungen. Daher ist davon auszugehen, dass auch dieser Gewässerabschnitt bereits früh für die Trift verwendet wurde und seitdem laufend Maßnahmen durchgeführt wurden.

Die Hochwasserereignisse am Schindlbach wurden ebenfalls nicht getrennt vom Grünaubach dokumentiert. Aus diesem Grund sind die bedeutenden Hochwasserereignisse der Vergangenheit aus Tabelle 3 bei Punkt 3.3 zu entnehmen.

# 3.5 Rettenbach

Der Untersuchungsabschnitt des Rettenbachs liegt in der Gemeinde Bad Ischl. Das 72,0 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet des Fließgewässers erstreckt sich jedoch bis über die Grenze in die Steiermark. Der Rettenbach entspringt auf einer Seehöhe von 1328 m und mündet als rechtsufriger Zubringer nach einer Länge von 13,8 km auf einer Seehöhe von 458 m in die Traun. Als wichtige Zubringer gelten Schwarzenbach, Grabenbach, Jaglingbach und Karbach (HÜBL et al., 2006). Der Bach wird von der Wildbach- und Lawinenverbauung als murfähig gewertet und weist vor allem im Oberlauf ein starkes Gefälle auf (56 %). Mittellauf und Unterlauf sind mit 6 % beziehungsweise 1 % Gefälle vergleichsweise flach. (GASPERL, 1999)

Die Geschiebefracht beträgt rund 150.000 m<sup>3</sup> (GASPERL, 1999) und das 100-jährliche Hochwasser 180,7 m<sup>3</sup>/s (HÜBL et al., 2006). Dabei wirkt die Verkarstung des Gebiets durch die vermehrte Versickerung abflusshemmend (GASPERL, 1999).

Das Einzugsgebiet hat einen Waldanteil von 80 % und liegt ebenfalls im Wuchsgebiet 4.1 nach KILIAN (GASPERL, 1999). Diese submontane Waldgesellschaft ist im gesamten Einzugsgebiet dominierend, zusätzlich sind Auswirkungen der salinären Großkahlschläge erkennbar. Die Landwirtschaft in diesem Gebiet ist durch Almen und Kleinbetriebe geprägt. (GASPERL, 1999)

In Abbildung 23 ist ein Abschnitt des Rettenbacher Unterlaufs zu erkennen. Rechts im Bild befindet sich ein Buhnenfeld mit Betonbuhnen.



Abbildung 23: Rettenbach, Blickrichtung flussaufwärts

Bis zum Jahr 1939 wurden am Rettenbach keine Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung durchgeführt, jedoch fand bis in die 30er Jahre eine rege Trifttätigkeit statt. 1942/44 und 1948/49 wurden die Orte Rettenbach und Hubhanslau durch Verbauungsmaßnahmen im Mündungsbereich des Gewässers geschützt. In den Jahren 1954 und 1957 wurde der Unterlauf weiter ausgebaut und teilweise begradigt. In den folgenden Jahren wurde diese Verbauung systematisch weitergeführt und ergänzt. In den 80er und 90er Jahren fanden dann vor allem Bachräumungen und Sicherungen beziehungsweise Sanierungen im Bereich der Rettenbachmühle statt. (WLV OÖ-WEST, o.A.)

Jahr	Wildbachchronik			
1899	-			
1939	-			
1954	Ablagerung von 30.000 m <sup>3</sup> Geschiebe im Mündungsbereich			
1986	-			
1996	Im Bereich der Rettenbachmühle fanden nach dem Ereignis große Umlagerungen statt			
2002	-			

Tabelle 4 zeigt eine Auflistung aller durch die Wildbach- und Lawinenverbauung dokumentierten Hochwasserereignisse.

Tabelle 4: Historische Hochwasserereignisse am Rettenbach (WLV OÖ-WEST, o.A.)

### 3.6 Wangauer Ache

Die Wangauer Ache entspringt auf einer Seehöhe von ca. 1000 m im Kulmgraben nördlich der Kulmspitze, mündet auf 481 m Seehöhe in den Mondsee (AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG, ABTEILUNG OBERFLÄCHENGEWÄSSERWIRTSCHAFT, 2011) und durchfließt dabei die Gemeinden Oberwang und Innerschwand, wobei der untersuchte Abschnitt in Innerschwand liegt. Das Einzugsgebiet hat eine Größe von 35,3 km<sup>2</sup>, das von der Wangauer Ache auf einer Länge von 12,4 km zuerst in nördlicher und dann in südlicher Richtung durchquert wird (AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG, ABTEILUNG OBERFLÄCHENGEWÄSSERWIRTSCHAFT, 2011). Die wichtigsten Zubringer sind Putzbach, Lehwinkelgraben, Tauernbach, Respelbach, Wildroithbach, Grömerbach, Oberaschauergraben und Riedlbach (BITTERLICH, 2000). Bis zur Autobahnunterquerung bei hm 35 fließt die Wangauer Ache abwechselnd durch Wiesen- und Waldbereiche, danach durch ein geschlossenes Waldgebiet.

Laut einem Kollaudierungsoperat der WLV OÖ-WEST (2000) muss bei einem 30-jährlichen Hochwasser mit einer Wassermenge von 55 m<sup>3</sup>/s und bei einem 100-jährlichen mit 70 m<sup>3</sup>/s gerechnet werden. Das Gewässer wird mit einem Gefälle von 0-5 % als schwach geschiebeführend bewertet. (BITTERLICH, 2000) Das vorhandene Geschiebe entsteht hauptsächlich durch Seitenerosion, bedingt auch durch die Tendenz zur Mäanderbildung des Gewässers. Die Uferunterschneidungen, die durch die Mäandrierung entstehen, sind auch der Grund für erhöhten Wildholzeintrag und teilweise starken Verklausungen an Engstellen. (WLV OÖ-WEST, 1993)

Das Einzugsgebiet der Wangauer Ache besteht zu 60 % aus Wald und liegt im nordalpinen FI-TA-BU-Wald-Wuchsgebiet (4.1 nach KILIAN). Landwirtschaftliche Nutzung findet durch Wiesenflächen statt und das Gebiet ist vor allem im Ort Oberwang und entlang der A1-Westautobahn durch starke Besiedlung (entlang der Autobahn Betriebsansiedlung) geprägt. (ВITTERLICH, 2000)

Abbildung 24 zeigt ein Prallufer der Wangauer Ache mit einer großen, bewachsenen Steinbuhne, welche durch die Ablenkung der Strömungen einen großen Kolk über die gesamte Flussbreite bedingt hat.



Abbildung 24: Wangauer Ache, Blickrichtung flussaufwärts

Die ersten Aufzeichnungen von Verbauungen an der Wangauer Ache stammen aus einem Kollaudierungsoperat aus dem Jahr 1936. Darin werden *"[...] Verbauungen besonders schadhafter Bachstrecken [...]"* in den Jahren 1933-36 erwähnt. (WLV OÖ-WEST, 1936)

Anfang der 60er Jahre wurden dann ausgehend vom Mündungsbereich der Wangauer Ache bis nach Loibichl Regulierungen des Flussbettes durchgeführt (WLV OÖ-WEST, 2000). 1965 waren im Zuge eines großen Projektes umfangreiche Ausbauten und Regulierungsmaßnahmen vorgesehen, von denen jedoch nur Teilbereiche realisiert wurden (WLV OÖ-WEST, 1996). Ende der 1960er wurden dann in den Mündungsbereichen Grömerbach und Widlroithbach lokale Regulierungen durchgeführt (WLV OÖ-WEST, 2005). 1999 wurden diese Maßnahmen erneut umgebaut und ergänzt (BITTERLICH, 2000). Für die Wangauer Ache wurden nur wenige historische Hochwasserereignisse dokumentiert. Tabelle 5 gibt Aufschluss über die wenigen festgehaltenen Ereignisse:

Jahr	Wildbachchronik				
1054 upd 1050	Überschwemmung des Talbodens und				
1954 und 1959	Schäden an Ufern und Brücken				
	30jährliches Hochwasser: Erosion von				
Sommer 1991	Prallufern, die dadurch ihres schützenden				
	Uferbestandes beraubt wurden				
12. und 13. August 2002	Starkniederschlag				

Tabelle 5: Historische Hochwasserereignisse an der Wangauer Ache (WLV OÖ-WEST, 1993; 2005)

## 3.7 Weißenbach

Der Weißenbach entspringt in der Gemeinde Steinbach am Attersee auf einer Seehöhe von 727 m, mündet nach 10,2 km auf einer Seehöhe von 468 m in den Attersee und hat ein 31,7 km<sup>2</sup> großes Einzugsgebiet. Der Fluss hat einen mächtigen Schwemmkegel im Attersee gebildet und weist nach wie vor Auflandungen von Kalkschotter auf.

Das Gewässer ist von einer natürlichen Umlagerungsstrecke oberhalb des Schwemmkegels geprägt und überflutet bei Hochwasserereignissen bevorzugt das linke Ufer. Das 30-jährliche Hochwasser entspricht einer Menge von 85 m<sup>3</sup>/s und das 100-jährliche 105 m<sup>3</sup>/s (NACHTNEBEL et al., 2008).

Forstlich ist das Gebiet des Weißenbaches der tiefmontanen bis subalpinen Höhenstufe zuzuordnen und liegt ebenfalls im Wuchsgebiet 4.1 nach KILIAN. Im unteren Bereich des Einzugsgebietes bestehen die Waldgesellschaften aus Buchen mit Tanne und im oberen Bereich aus Latschengebüsch. Dabei ist das gesamte Gebiet zu 80 % bewaldet.

Abbildung 25 zeigt einen Abschnitt des Weißenbaches von einem Prallufer aus gesehen. Erkennbar ist einerseits die – im Vergleich zu den anderen Untersuchungsgebieten – größere Flussbreite sowie die Umlagerungstendenz des Flusses auf Basis des jungen Bewuchses auf den schottrigen Uferbänken.



Abbildung 25: Weißenbach, Blickrichtung flussaufwärts

Das Gebiet des Weißenbaches dürfte schon in der mittelalterlichen Hochblüte der Salinentätigkeit durch die Holztrift geprägt worden sein. In den Jahren von 1920-1938 war der Weißenbach in Privatbesitz – aus diesem Grund wurden zu dieser Zeit nur lokale Sicherungsmaßnahmen durch Rustikalbauten (beispielsweise Buhnen) errichtet. 1952 wurde das Wasserrecht dann von der Nationalbank übernommen, die das 1948 zerstörte Wehr wieder errichtete. In den darauffolgenden Jahren wurden unterschiedliche lokale Ufersicherungen vor allem in den Bereichen der Zubringer durchgeführt. 1969 wurde begonnen größere Schottermengen aus dem Weißenbach zu entnehmen. (WLV OÖ-WEST, 1978) In den Jahren 1980-1982 wurden auf der gesamten Länge umfangreicher Sohl- und Ufersicherungen durchgeführt (WLV OÖ-WEST, 2009).

Die von der Wildbach- und Lawinenverbauung dokumentierten Hochwasserereignisse im Gebiet des Weißenbaches sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Jahr	Wildbachchronik					
16.09.1049	Im Zuge dieses Hochwassers wurde ein Wehr					
10.08.1948	zerstört					
	HQ50 – Zerstörung eines Dammes,					
12.09.1050	Überflutung der Bundesstraße streckenweise					
13.06.1939	bis zu 1,5 m und Zerstörung des Europacamps,					
	einem Lagerplatz der Sozialistischen Jugend					
1974 und 1977	Hochwasserereignisse geringer Bedeutung					
2002	Schäden an mehreren Objekten im Bereich					
2002	des Lux-Sägewerks					

Tabelle 6: Historische Hochwasserereignisse am Weißenbach (WLV OÖ-WEST, 1978; 2009)

# 4 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die im Zuge dieser Arbeit angewandten Methoden. Diese umfassen die Entwicklung eines Aufnahmebogens zur Zustandserfassung der Buhnen, eine ausführliche Kartierung der aufgenommenen Bauwerke mittels ArcGIS sowie die statistische Auswertung der Erhebungsergebnisse.

# 4.1 Aufnahmebogen

Aufgrund des Umstands, dass kein Aufnahmebogen vorlag, der konkret für die Zustandserfassung von Buhnen konzipiert wurde, musste als erster Schritt in Anlehnung an unterschiedliche literarische Quellen (u.a. LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG, 2010; BMLFUW, 2015; SUDA, 2012) ein spezifiziertes Aufnahmeblatt entwickelt werden. Folgend werden die einzelnen Abschnitte des Aufnahmebogens angeführt und erläutert (gesamter Aufnahmebogen siehe Anhang 11.1).

### 4.1.1 Allgemeines

Im ersten Abschnitt des Aufnahmebogens (Tabelle 7) werden allgemeine Daten über den Aufnahmeort und den Aufnahmetag gesammelt, um so im Nachhinein bestimmte, zum Beispiel erschwerende Bedingungen, nachvollziehen zu können. (SUDA, 2012)

1. Allgemeines						
Gemeinde		Bezirk				
Aufnahmedatum		Flussname				
Wetter Einzugsgebiet						

Tabelle 7: Aufnahmebogen - 1. Allgemeines

Als Abschließende Punkte des Aufnahmebogens folgen zudem eine Fotodokumentation, Subjektive Bewertung des Bauwerks und etwaige Skizzen der Buhne und deren Nah- und Wirkungsbereichs.

Eine ausführliche und detaillierte Fotodokumentation (Tabelle 8) der Feldarbeiten vereinfacht zu einem späteren Zeitpunkt einerseits die Auswertung, da man einzelne Angaben wenn nötig nochmals auf den Fotos überprüfen kann, und bietet andererseits die Möglichkeit Auffälligkeiten und bestimmte Merkmale auch bildlich darzustellen. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten müssen von allen erhobenen Bauwerken Fotos in Fließrichtung, gegen Fließrichtung und von oben aufgenommen werden. Zusätzlich sollten auch Auffälligkeiten, Schäden und sonstige Merkmale fotografisch festgehalten werden.

8. Fotodokumentation						
Fotonummern	Von			Bis		
1. in Fließrichtung		2. geg	en Fließrichtung		3. von oben	
	_					

Tabelle 8: Aufnahmebogen - 8. Fotodokumentation

Der Abschnitt für subjektive Bewertungen Tabelle 9 wurde im Zuge der Feldarbeiten entwickelt, um zusätzlich den subjektiven Eindruck nach lokalem Augenschein festzuhalten. Dabei wurden einerseits der Gesamtzustand und andererseits die Funktionserfüllung (bezogen auf den Uferschutz) nach Schulnotensystem bewertet. Für die statistische Auswertung ist dieser Erhebungspunkt irrelevant, jedoch hilft diese Bewertung den ersten Eindruck für einen späteren Zeitpunkt zu dokumentieren.

9. Subjektive Bewertung						
Gesamtzustand	Funktionserfüllung					
Bemerkung						

Tabelle 9: Aufnahmebogen - 9. Subjektive Bewertung

Der Bereich für Skizzen (Tabelle 10) bietet freien Platz, um das Bauwerk zu veranschaulichen. Dies ist für das Verständnis des Umfeldes und des Aufbaus des Flussbettes unerlässlich. Vorgesehen sind zwei Skizzen: erstens ein Querschnitt durch das Bauwerk und den gesamten Flussquerschnitt und zweitens ein Grundriss der größeren Umgebung.

I VI DIVILLUII
----------------

- Querschnitt mit Bauwerken und Flusstiefen

- Grundriss der größeren Umgebung (flussauf-, flussabwärts und gegenüberliegende Buhnen)

Tabelle 10: Aufnahmebogen - 10. Skizzen

### 4.1.2 Flussbezogene Angaben

Der zweite Abschnitt (Tabelle 11) bezieht sich auf allgemeine Angaben, die das Gewässer selbst betreffen. Dabei werden die Flussbreite, die geschätzte Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche und die relative Tiefe des Gewässers direkt bei dem zu untersuchenden Bauwerk aufgenommen, um so den möglichen Einfluss dieser Faktoren, beziehungsweise den Einfluss des Bauwerks auf ebendiese Faktoren ermitteln zu können.

2. Flussbezogene Angaben		
Flussbreite FB	Flusstiefe	
Fließgeschwindigkeit		

Tabelle 11: Aufnahmebogen - 2. Flussbezogene Angaben

### 4.1.3 Bauwerksbezogene Angaben

In diesem Teil des Aufnahmebogens (Tabelle 12) wird die Buhne bezüglich der Lage im Fluss, der Lage zu anderen Buhnen sowie der Bauart beschrieben (SUDA, 2012). Der erste Punkt betrifft die Anzahl der Buhnen – ist die vorliegende Buhne eine Einzelbuhne (schützt meist vor lokalen, kleinräumigen Uferanbrüchen) oder Teil eines Buhnenfeldes. Im Falle eines Buhnenfeldes muss angeführt werden, wie die Buhnen zueinander angeordnet sind. Direkt gegenüberliegende Buhnen halten die Strömung in der Flussmitte und führen so zu einer Eintiefung des Flussbettes, während mäandrierend angelegte Buhnenfelder vor allem ökologischen Wert haben und bei Niedrigwasser einen mäandrierenden Verlauf des Gewässers bedingen. (RossoLL et al., 1992)

Zur vollständigen Kartierung wird die Lage im Fluss aufgenommen. Dabei ist vor allem von Bedeutung, ob das Bauwerk am Prall- oder Gleitufer liegt. Üblicherweise werden Buhnen an Prallufern errichtet, da hier die Strömung – bedingt durch die Biegung des Flusses – frontal ans Ufer gelangt, dort abgelenkt wird und somit vermehrt Erosion verursacht.

Zusätzlich werden in diesem Abschnitt die Koordinaten des Bauwerks sowie der verwendete Bautyp erhoben. Bezüglich des Bautyps wurde versucht im Vorhinein Typen auszuwählen, die in den Untersuchungsgebieten vermutet werden, um die Liste an Bauformen am Aufnahmebogen einzuschränken. Für abweichende Bautypen kann die Auswahlmöglichkeit "Sonstiges" benutzt werden, die auch eine zusätzliche Beschreibung der Bauform ermöglicht.

3. Bauwerksbezogene Angaben								
Kollaudierungsope	erat			Baujahr			Hektometer	
🗆 Buhnenfeld	Anzak	hl dor Pouw	vorko		nüha	~ _	] mäandrierend	
🗆 Einzel-Buhne	Alizai	Inzahl der Bauwerke 🗆 gegenüber 🗀 maandrierend 🗀 einufrig						
Lage am Fluss	🗆 lin	ksufrig		] rechtsufri	g	🗆 P	rallufer	🗆 Gleitufer
Ausrichtung	🗆 inł	klinant		deklinant		$\Box$ r	echtwinklig	
Koordinaten		x	·				У	_·
Doute in	🗆 Ste	einbuhne	🗌 Dreie	ecksbuhne		Steinl	kastenbuhne	🗆 Flechtwerksbuhne
Бацур	🗆 Wi	urzelstock-E	Buhne	🗆 Sons	stiges:			

Tabelle 12: Aufnahmebogen - 3. Bauwerksbezogene Angaben

### 4.1.4 Geometrie

Die Geometrie eines Bauwerkes – die Abmessungen – ist für den Zustand eines Bauwerkes ein wichtiger Faktor. Eine zu lange oder zu kurze Ausführung einer Buhne kann zum Beispiel eine Exposition des Bauwerks bewirken und somit zu größeren Schäden führen. Diese Parameter werden im vierten Teil des Aufnahmebogens erfasst (Tabelle 13).

Zusätzlich gilt es zu untersuchen, ob unterschiedliche Ausführungen (beispielsweise unterschiedliche Wurzelkopfhöhen oder die Abstände  $A_a$  und  $A_b$  zu den nächstgelegenen

Buhnen) anfälliger für bestimmte Schadensmechanismen sind beziehungsweise andere Auswirkungen auf das Umfeld haben.

Bei Buhnen an beiden Ufern wird auch die Breite des Flusses zwischen den Bauwerken gemessen. Fällt dieser Abstand sehr klein aus, bedeutet das eine starke Einengung des Flusses und dies kann zu einem verstärkten Angriff auf die Sohle führen. Im Falle von mäandrierenden Buhnenfeldern steht der Abstand A<sub>c</sub> für die gegenüberliegende Buhne flussaufwärts und der Abstand A<sub>d</sub> für die gegenüberliegende Buhne flussabwärts (dieser Aufnahmeparameter wurde erst nachträglich während den Aufnahmen im Feld hinzugefügt).

4. Geometrie		
Länge L <sub>B</sub>	Höhe Wurzel H <sub>BW</sub>	
Breite B <sub>B</sub>	Höhe Kopf <sub>нвк</sub>	
Abstand A <sub>a</sub>	Zur Buhne flussabwärt	ts
Abstand A <sub>b</sub>	Zur Buhne flussaufwär	ts
Abstand A <sub>c</sub>	Mäandrierend: zur geg	genüberliegenden Buhne flussaufwärts
Abstand A <sub>d</sub>	Mäandrierend: zur geg	genüberliegenden Buhne flussabwärts

Tabelle 13: Aufnahmebogen - 4. Geometrie

Abbildung 26 visualisieren die erhobenen Maße an einer einzelnen Buhne sowie im gesamten Buhnenfeld



Abbildung 26: Abmessungen, links: Buhnengeometrie, rechts: Abstände im Buhnenfeld

### 4.1.5 Material

Das Material spielt bei der Zustandsbewertung eine große Rolle, da in den meisten Fällen ein Versagen des Materials in Folge auch ein Versagen des gesamten Bauwerks bedingt. In Tabelle 14 sind die Hauptbaumaterialien für wasserbauliche Maßnahmen aufgeführt. (SUDA, 2012) Falls eindeutig ersichtlich ist, dass im Zuge der Errichtung lebendes Pflanzenmaterial verwendet wurde (beispielsweise Weidensteckhölzer o.Ä.), ist dies zusätzlich in diesem Abschnitt – wenn möglich mit Artbestimmung – anzuführen.

5. Material						
🗆 Stein	□ Schotter/Kies	🗆 Holz	🗆 Mauerwerk	Pflanzenarten		
🗆 Beton	🗆 Stahl	🗌 Pflanze	en			

Tabelle 14: Aufnahmebogen - 5. Material

### 4.1.6 Schäden

Dieser Abschnitt bildet den Hauptteil des Aufnahmebogens und befasst sich mit unterschiedlichen Schadensmechanismen.

#### 4.1.6.1 Kolkbildung

Die Kolkbildung ist als Schadensmechanismus bei Buhnen von großer Bedeutung, da durch die Turbulenzen, die sich um das Bauwerk bilden, häufig im Bereich des Buhnenkopfs ein Kolk entsteht. Dieser kann je nach Tiefe in weiterer Folge zu Bauwerksbewegungen wie Kippen oder Brechen oder zu einer vollständigen Unterspülung des Bauwerks führen. Die Kolktiefe  $T_K$  wird am tiefsten Punkt gemessen, die Breite  $B_K$  in Richtung Flussmitte und die Länge  $L_K$  in Fließrichtung. Tabelle 15 fasst den diesbezüglichen Abschnitt des Aufnahmebogens zusammen.

#### Kolkbildung

kein	🗆 flach			mitt	el		$\Box$ tief	
	untere Einbin	untere Einbindung intakt		geringe untere Einbindung			freiliegende Unterkante	
Verortung	🗆 Wurzel	🗆 Mitte	🗌 Kopf		] Unterspülung	🗆 flus	saufwärts	🗌 flussabwärts
Kolktiefe $T_{K}$		K	olkbreite B <sub>K</sub>	<		Kolklä	inge L <sub>K</sub>	

Tabelle 15: Aufnahmebogen - 6. Schäden - Kolkbildung

#### 4.1.6.2 Verlust des Flankenwiderstands

Bei der Untersuchung des Flankenwiderstands steht die Einbindung des Bauwerks in das Ufer im Fokus der Betrachtung. Eine geringe Einbindung kann zur Instabilität des Bauwerks beziehungsweise bei starkem Hochwasser auch zur kompletten Zerstörung führen. Folgende drei Mechanismen können einen Verlust des Flankenwiderstandes bedingen (SUDA, 2009):

#### Mechanismus 1: Tiefenerosion, Kolkausbreitung

Bei diesem Mechanismus breitet sich ein Kolk im Flussbett so weit aus, dass die Flanken des Ufers, welche das Bauwerk einbinden, abrutschen.

#### Mechanismus 2: Seitenerosion, Flankenabtrag

Der zweite Mechanismus zielt darauf ab, dass die seitlichen Flanken von starker Strömung und/oder Hochwasser so weit abgetragen werden, dass sie das Bauwerk nicht mehr vollständig einbinden.

#### Mechanismus 3: Oberflächenerosion, Flankenabtrag durch Oberflächenwässer

Der dritte Mechanismus wird durch Oberflächenwasser bedingt, welches an der Böschung abfließt und eine Erosion bewirkt, die je nach Dauer beziehungsweise Menge des Abflusses die Flanken freilegen kann.

Tabelle 16 zeigt diesen Abschnitt des Aufnahmebogens.

#### Verlust des Flankenwiderstandes

 kein
 Mechanismus 1 Tiefenerosion, Kolkausbreitung
 Mechanismus 2 Seitenerosion, Flankenabtrag

 Mechanismus 3 Oberflächenerosion, Flankenabtrag durch Oberflächenwasser
 Vollständige Umgehung

 Tabelle 16: Aufnahmebogen - 6. Schäden - Verlust des Flankenwiderstandes

#### 4.1.6.3 Bauwerksbewegungen

Wie bei Punkt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bereits erwähnt, können einerseits Kolkbildung zu Bauwerksbewegungen führen, aber auch generelle Sohleintiefungen oder extreme Abflussmengen von Hochwasserereignissen. Im Zuge der Feldarbeiten wurden diesem Abschnitt zwei weitere Punkte hinzugefügt. Einerseits die Ausspülung des Bauwerks, da in vielen Fällen einzelne Bauwerksteile (vor allem bei Steinbuhnen) ausgespült werden und somit eine Funktionserfüllung des Bauwerks nicht ausreichend gewährleistet ist. Andererseits muss auch die Verklausung der Buhnen berücksichtigt werden, da diese teilweise sehr stark ausfallen und die Wirkung des Bauwerks beeinflussen kann. Für die Erfassung dieser Mechanismen wurden die in Tabelle 17 dargestellten Variablen herangezogen.

#### Bauwerksbewegungen

🗌 Kippen	🗌 Zur Flussmitte	🗌 Gegen Fli	eßrichtung	🗆 In Fließrichtung		
🗆 Bruch	🗆 Wurzel	🗆 Mitte		🗌 Kopf		
Ausspülung	🗆 Kein	□ Gering	🗆 Mittel	🗆 Stark		
Verklausung	🗆 Kein	□ Gering	□ Mittel	🗆 Stark		

Tabelle 17: Aufnahmebogen - 6. Schäden - Bauwerksbewegungen

#### 4.1.6.4 Materialschäden

Der Hauptteil des Abschnitts "Schäden" betrifft spezifische Materialschäden, die nach SUDA (2009; 2012) formuliert wurden (Tabelle 18).

Bewertet werden diese Schäden mittels einer vierstufigen Skala:

- Keine Schäden
- Geringe Schäden:

Als gering werden kleine Schäden erachtet, die zwar ersichtlich sind, jedoch keinerlei Auswirkungen auf das Material beziehungsweise auf das gesamte Bauwerk haben ("Schönheitsfehler"). - Mittlere Schäden:

Diese Schäden machen das Bauwerk angreifbarer gegenüber Einwirkungen von außen, jedoch sind sowohl Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit als auch die Dauerhaftigkeit kaum beeinflusst.

- Starke Schäden:

Starke Schäden schwächen das Bauwerk in jeder Hinsicht und es kann davon ausgegangen werden, dass stark beschädigte Bauwerke ihre Funktion nicht mehr, beziehungsweise in Kürze nicht mehr erfüllen können.

Material	Schadmechanismus	kein	gering	mittel	stark	Anmerkung	
	Erosion/Abrasion						
	Plattenförmige Abplatzungen						
Beton	Verwitterung						
	Frostsprengung/Risse						
	Bewuchs						
	Erosion/Abrasion						
	Verwitterung/Vermorschung						
	Verformung						
Holz	Pilzbewuchs						
	Insekten						
	Nager						
	Bewuchs						
	Erosion/Abrasion						
	Verwitterung						
Stein	Verformung						
	Risse						
	Bewuchs						
	Korrosion						
Stahl	Verformung/Bruch						
	Verankerungsschäden						
	Erosion/Abrasion						
	Verwitterung						
Mauanuarti	Verformung						
wauerwerk	Risse						
	Durchfeuchtung/-strömung						
	Bewuchs						

#### Materialschäden

Tabelle 18: Aufnahmebogen - 6. Schäden - Materialschäden

# 4.1.7 Flussmorphologische Wirkungen

Jede wasserbauliche Maßnahme hat gewisse Auswirkungen auf die vorhandene Flussmorphologie. Dieser Abschnitt des Aufnahmebogens (Tabelle 19) soll erheben, inwieweit bestimmte Buhnentypen und bestimmte Ausführungen Einfluss auf die Flussmorphologie haben. Die Erhebungsparameter stellen in diesem Fall nur eine kleine Auswahl aller möglichen Auswirkungen dar und wurden aufgrund der Auswertungsmöglichkeiten und Aussagekraft bezüglich der Wirkung von Buhnen ausgewählt

Die Sedimentstruktur lässt sich einfach ermitteln und gibt einen wichtigen Hinweis auf die Sedimentdiversität und somit auch der Diversität der Lebensräume im Umfeld der Buhne. Die Einteilung der einzelnen Korngrößenklassen erfolgte nach Landesanstalt für Umwelt, Messungen UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2010).

Ufererosionen – und vor allem wo diese Erosionen stattfinden – lassen auf die Funktionserfüllung der Buhnen schließen. Wenn zum Beispiel Erosionen zwischen zwei Buhnen entstehen, könnte dies ein Zeichen dafür sein, dass der Abstand zwischen den Buhnen zu groß gewählt wurde. Geringe Ufererosionen beschreiben dabei einen Abtrag von oberflächlichem Lockermaterial, mittlere Erosionen betreffen bereits gröberes Material und kleinere Abbrüche der Böschungsoberkante beziehungsweise Uferunterschneidungen. Starke Ufererosionen hingegen sind großflächige Abbrüche der Böschung, welche die gesamte Stabilität des Ufers sowie die Ufervegetation beeinträchtigen.

Oft sind Buhnen der Grund für Eintiefungen im Flussbett, da sie die Strömung in eine bestimmte Richtung lenken. Dies kann in weiterer Folge zu Schäden an den Bauwerken (Unterspülung, Kippen, etc.) führen. Hierfür wird einerseits die Lage dieser Eintiefung erhoben und andererseits die Tiefe gemessen und in Relation zur generellen Flusstiefe gesetzt. Flache Eintiefungen beschreiben Stellen die das Zweifache der Flusstiefe betragen, mittlere Eintiefungen messen das Zwei- bis Dreifache und tiefe Eintiefungen sind über dreimal tiefer als die durchschnittliche Flusstiefe.

Verlandungen sind vor allem bei Buhnen, die als ökologisches Strukturelement dienen sollen, ein wichtiger Prozess, da sie der natürlichen Sukzession unterworfen sind und neue vielfältige Biotopstrukturen schaffen. Der Aufnahmebogen erfasst in Bezug auf Verlandungen deren Verortung (flussabwärts oder flussaufwärts des Bauwerks), die Abmessungen und die Fläche A<sub>v</sub>.

7. Flussmorphologische Wirkungen									
Sodimontstruktur	🗆 < 0,063 mm	🗌 0,063 – 2 m		ım	🗆 0,2 – 2 cm		□ 2-	6,3 cr	n
Seamentstruktur	🗆 6,3 – 20 cm	🗌 20 – 40 cm			□ > 40 cm				
Liferencien	Rechtes Ufer	$\Box$ kein	🗆 ge	ring	🗆 r	nittel	🗆 sta	ark	
OTELETOSION	Linkes Ufer	🗆 kein	□ ge	ring	🗆 r	nittel	🗆 sta	ark	
	Rechts	🗆 kein	🗆 fla	ch	🗆 r	nittel	🗆 tie	f	_ in cm
Eintiefungen	Flussmitte	🗆 kein	🗆 fla	ch	🗆 r	nittel	🗆 tie	f	_ in cm
	Links	🗆 kein	🗆 fla	ch	🗆 r	nittel	🗆 tie	f	_ in cm
Verlandung									
Verlandungsstelle	🗆 Flussaufwärt	☐ Flussaufwärts		🗆 Flussa	bwär	rts			
Länge L <sub>v</sub>		Breite B <sub>v</sub>				Fläche A <sub>v</sub>			
Taballa 10. Aufaabmabagan 7 Elucamarahalagischa Wirkungan									

 Tabelle 19: Aufnahmebogen - 7. Flussmorphologische Wirkungen

## 4.2 Kartierung

Die Kartierung der Buhnen wurde direkt vor Ort mittels ArcGIS durchgeführt. Dafür wurde im Vorhinein eine Grundlagenkarte der Untersuchungsgebiete angelegt, in welche im Zuge von Recherchen in den Kollaudierungsoperaten und Projektberichten der WLV OÖ-West die ungefähre Lage der Buhnen eingetragen wurde. Während der Aufnahme im Feld wurden diese Lagepunkte dann überprüft und bei Bedarf korrigiert. Dabei wurden den Bauwerken Farbcodes zugewiesen. Rot bedeutet, dass die Buhne noch nicht und grün, dass das Bauwerk fertig aufgenommen wurde. Gelb wurden jene Bauwerke markiert, die nicht zugänglich waren und orange bedeutet, dass die Buhnen nicht auffindbar beziehungsweise vollständig zerstört sind. Als Veranschaulichung dieser Vorgehensweise wird in Abbildung 27 einen Abschnitt des Grünaubachs mit erhobenen Bauwerken dargestellt.



Abbildung 27: Bauwerkskartierung - Beispiel: Ausschnitt Grünaubach

# 4.3 Berechnung des Gefälles

Die Ermittlung des Gefälles an den einzelnen Bauwerksstandorten wird ebenfalls mittels der Software ArcGIS vorgenommen. Basis bilden die kartierten Bauwerke, Gewässersegmente der untersuchten Fließgewässer sowie ein Höhenmodell mit einem Meter Genauigkeit (Quelle: BEV).

Die Berechnung wurde mittels ArcGIS-Modell implementiert, das auf einer Schleife basiert (Abbildung 28). Dazu werden die einzelnen Bauwerksstandorte nach einer zuvor vergebenen laufenden Nummer selektiert (*Iterate Feature Selection*). Für jeden Standort werden in weiterer Folge die nachgelagerten Funktionen ausgeführt. Zu Beginn wird um die einzelnen Bauwerke ein Puffer (Funktion *Buffer*) mit einem Durchmesser von 100 m gelegt. Diese Puffer-Polygone werden herangezogen, um mittels der Funktion *Clip* ein Gewässersegment, welches den Umgebungsbereich der Buhne durchfließt, aus dem Gesamtgewässernetz auszuschneiden. Diese Linie wird mittels der Funktion *Add Surface Information* mit dem Höhenmodell verschnitten. Kern dieses Prozesses ist die Berechnung des durchschnittlichen Gefälles (*Average Slope*) des geclipten Segments. Für jeden Standort wird ein Shapefile, das der Bauwerksnummer entsprechend benannt ist, abgespeichert. Abschließend wird dem Shapefile ein Feld hinzugefügt, in das die Bauwerksnummer überführt wird. Dieser Schritt dient der Verarbeitbarkeit der gewonnenen Daten. Mittels der Funktion *Merge* können alle auf diese Weise generierten Daten (181 Linien-Datensätze) vereint und weiterverarbeitet werden.

Output des Prozesses ist ein Näherungswert an das Gefälle der Fließstrecke im Umgebungsbereich der Buhnen. Ungenauigkeiten ergeben sich aus der geometrischen Auflösung des Höhenmodelles und der fehlenden Abbildung etwaiger Sohlstufen in den herangezogenen Basisdaten.



Abbildung 28: Prozess zur Gefälle-Ermittlung

### 4.4 Statistische Auswertung

Die mittels Aufnahmebogen erfassten Variablen stellen in weiterer Folge die Grundlage für statistische Analysen dar. In diesem Abschnitt werden statistische Vorgehensweisen und Kennzahlen erläutert sowie unterschiedliche Darstellungsmethoden und deren Inhalte erklärt. Dabei wird einerseits auf das Niveau der erhobenen Daten und andererseits auf die verwendeten Analysemethoden innerhalb des Statistikprogrammes SPSS und deren Parametern eingegangen.

### 4.4.1 Datenniveau

Im Zuge dieser Arbeit wurden hauptsächlich ordinale und nominale Variablen erhoben. Ordinale Daten sind Qualitätsmerkmale mit natürlicher Ordnung ("gut" – "mittel" – "schlecht"), nominale Daten hingegen sind Merkmalsausprägungen ohne natürliche Ordnung (Bauweise, Baujahr oder ja-nein-Antworten). Einige der Variablen sind aber auch metrisch (Bauwerksgeometrie, Kolkgeometrie). Der Vergleich dieser unterschiedlichen Datenniveaus ist in vielen Fällen schwierig, nicht ohne Umwege möglich und begrenzt die Auswahl an potenziellen Analysemethoden. Aus diesem Grund basieren viele Auswertungen dieser Arbeit auf deskriptiver oder explorativer Statistik und stellen Zusammenhänge zwischen zwei Variablen durch Häufigkeiten dar.

### 4.4.2 Boxplot

Ein Boxplot ist ein exploratives Mittel um ordinale und metrische Daten und deren Streuung darzustellen. Dabei wird auf einen Blick konzentriert ein Überblick der wichtigsten Lage- und Streuungsparameter gegeben (vgl. Abbildung 29). Die Box stellt dabei den Interquartilsabstand dar (Abstand zwischen 1. und 3. Quartil) und umfasst die mittleren 50 % der Daten. Die Länge der Box ist somit gleichzeitig ein Indikator für die Streuung der Daten. Die Box wird zudem durch eine Linie - den Median - geteilt, der das arithmetische Mittel der Daten angibt. Die Lage der Linie liefert eine erste Indikation zur Verteilung der Daten. Liegt die Linie ungefähr in der Mitte der Box, sind die Daten normalverteilt, rückt der Median näher an ein Quartil handelt es sich um eine schiefe Verteilung. Wenn also der Median näher am 3. Quartil liegt, bedeutet dies, dass es sich um eine linksschiefe Verteilung handelt, die Daten über dem Median liegen näher am Mittelwert als die darunter. Die Whisker ergeben sich über die Berechnung von so genannten "Zäunen". Diese Zäune errechnen sich aus dem Interquartilsabstand, der mit 1,5 multipliziert wird. Der erhaltene Wert wird danach oberhalb des 3. Quartils und unterhalb des 1. Quartils abgetragen. Diejenigen Werte der erhobenen Daten, welche diesen Zäunen am nächsten (in Richtung Box) sind, bilden die Whisker. (SCHÄFER, 2016) Laut BÜNING et al. (2000) stellen die von den Whiskern begrenzten Linien in etwa die niedrigsten und höchsten 25 % der Daten dar. Davon ausgenommen sind jedoch die Ausreißer, die Extremwerte innerhalb der Daten darstellen und außerhalb dieser Whisker liegen. Das Statistikprogramm SPSS markiert hierbei Ausreißer mit einem Kreis, wenn sie den 1,5 – 3-fachen Interguartilsabstand (= Länge der Box) von der Box entfernt sind. Ausreißer, die als Sternchen (\*) dargestellt werden, sind über den 3-fachen Interquartilsabstand von der Box entfernt.



Abbildung 29: Darstellungsbeispiel eines Boxplots

### 4.4.3 Korrelation nach Pearson

Mit einer Korrelation wird der Zusammenhang zweier Variablen ermittelt, jedoch ist hier nur der Vergleich von zwei Variablen mit gleichem Datenniveau möglich. In dieser Arbeit wurden die metrischen Daten mit einer Korrelation nach Pearson analysiert, welche die Stärke des linearen Zusammenhangs darstellt. Dieser Zusammenhang kann positiv oder negativ sein (vgl. Abbildung 30). Positiver Zusammenhang bedeutet, dass mit steigenden Werten der X-Achse auch die Werte der Y-Achse steigen, negativ bedeutet sinkende Werte auf der X-Achse bedingen sinkende Werte auf der Y-Achse. Rechts in Abbildung 30 werden unkorrelierte Daten dargestellt – es ist kein geordneter Zusammenhang erkennbar.



Abbildung 30: Positiv korrelierte, negativ korrelierte und unkorrelierte Daten (Eigene Darstellung, 2017 nach Schäfer, 2016)

Der Korrelationskoeffizient kann immer nur einen Wert im Intervall -1 < r < 1 annehmen. r = -1 beschreibt einen perfekten negativen linearen Zusammenhang, r = 1 einen perfekten positiven linearen Zusammenhang und r = 0 beschreibt völlig unkorrelierte Daten. Die Abstufungen dazwischen stellen demnach mehr oder weniger starke Zusammenhänge dar. Die Einschätzung

dieses Zusammenhanges wird laut SCHÄFER (2016) nach Cohen (1988) formuliert und in Tabelle 20 dargestellt.

r	Interpretation
0,1 - 0,3 bzw0,10,3	Schwacher Zusammenhang
0,3 - 0,5 bzw0,30,5	Mäßiger Zusammenhang
> 0,5 bzw. < -0,5	Starker Zusammenhang

Tabelle 20: Interpretation des Korrelationskoeffizienten r

Ausschlaggebend für die Bewertung der Korrelation ist das Signifikanzniveau, welches durch den p-Wert angegeben wird. Korrelationen mit p-Werten unter .05 (entspricht 5 %) oder .01 (entspricht 1 %) gelten als signifikant. (HATZINGER et al., 2014)

Zur grafischen Beschreibung von Korrelationen eignen sich am besten Streudiagramme (Abbildung 30), in welche eine Regressionsgerade integriert werden kann. Diese Gerade stellt eine Vorhersage für zusätzliche Fälle dar. Die Genauigkeit der Regressionsgeraden wird durch das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> beschrieben. Je niedriger das Bestimmtheitsmaß, desto größer ist die durchschnittliche Abweichung der beobachteten Fälle von der Regressionsgerade. (HATZINGER et al., 2014; SCHÄFER, 2016)

### 4.4.4 Entwicklung eines Bewertungsschemas für Material-Schadensmechanismen

Für die Auswertung der Schadensmechanismen der unterschiedlichen Materialen wurde ein Bewertungsschema entwickelt, das die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Bauformen bezüglich ihrer Materialschäden ermöglicht. Angelehnt an STANGL et al. (2010) wurde eine einfache Formel herangezogen, um die einzelnen Aufnahmeparameter in eine bewertbare Variable zusammenzuführen.

Nachfolgend wird ein Beispiel zur Berechnung des Schadensindex einer Betonbuhne angeführt. Die analysierte Betonbuhne besteht aus zwei Materialien: Tabelle 21 gibt die Schäden für das Material Beton wieder, Tabelle 22 fasst die Materialschäden an der Komponente Stein zusammen.

Material Beton					
				Г	
Schadens-	Erosion/	Plattenförmige	Verwitterung	Frostsprengung/Risse	Bewuchs
mechanismen	Abrasion	Abplatzungen			
SMB	SMB1	SMB2	SMB3	SMB4	SMB5
Eingabewert					
0	kein	kein	kein	kein	kein
1	gering	gering	gering	gering	gering
2	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
3	stark	stark	stark	stark	stark

Tabelle 21: Aufschlüsselung Aufnahmeparameter Beton

Material Stein					
Schadens-	Erosion/	Verwitterung	Verformung	Risse	Bewuchs
SMS	SMS1	SMS2	SMS3	SMS4	SMS5
Eingabewert					
0	kein	kein	kein	kein	kein
1	gering	gering	gering	gering	gering
2	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
3	stark	stark	stark	stark	stark

Tabelle 22: Aufschlüsselung Aufnahmeparameter Stein

Da die einzelnen Schadensmechanismen das Material unterschiedlich stark beeinträchtigen – beispielsweise beeinflusst ein Bewuchs auf Stein die Funktionalität weniger als Risse oder Erosion – müssen die Eingabewerte für eine weitere Berechnung gewichtet werden. Die genaue Gewichtung ist Tabelle 23 zu entnehmen. Zur Berechnung der Schadenswerte der einzelnen Materialien werden die gewichteten Eingabewerte addiert.

#### Funktion:

Schadenswert Beton = SMB1 \* 0,30 + SMB2 \* 0,20 + SMB3 \* 0,15 + SMB4 \* 0,30 + SMB5 \* 0,05 Schadenswert Stein = SMS1 \* 0,30 + SMS2 \* 0,20 + SMS3 \* 0,15 + SMS4 \* 0,30 + SMS5 \* 0,05

Schadensmechanismen Beton <i>(SMB)</i>	Gewichtung
Erosion/Abrasion (SMB1)	0,30
Plattenförmige Abplatzungen ( <i>SMB2</i> )	0,20
Verwitterung (SMB3)	0,15
Risse <i>(SMB4)</i>	0,30
Bewuchs (SMB5)	0,05
Summe	1,00

Schadensmechanismen Holz <i>(HSM)</i>	Gewichtung
Erosion/Abrasion (SMH	0,25
Verwitterung/ Vermorschung	0,30
Verformung	0,20
Pilzbewuchs	0,10
Insekten	0,05
Nager	0,05
Bewuchs	0,05
Summe	1,00

Schadensmechanismen Stein <i>(SMS)</i>	Gewichtung
Erosion/Abrasion (SMS1)	0,30
Verwitterung (SMS2)	0,20
Verformung (SMS3)	0,15
Risse (SMS4)	0,30
Bewuchs (SMS5)	0,05
Summe	1,00

Schadensmechanismen Stahl	Gewichtung
Korrosion	0,15
Verformung/Bruch	0,40
Verankerungs- schäden	0,40
Bewuchs	0,05
Summe	1,00

Tabelle 23: Gewichtungen der unterschiedlichen Schadensmechanismen der einzelnen Materialien

Der Wertebereich dieser Schadenswerte liegt, wie durch den Aufnahmebogen vorgegeben, immer zwischen 0 und 3. Um den Index auf einen Bereich zwischen 0 und 1 zu normieren, müssen die Schadenswerte der einzelnen Materialien anschließend durch 3 dividiert werden.

Zur Berechnung des Gesamtschadensindex eines Bauwerks werden die Schadenswerte der einzelnen Materialien erneut gewichtet, um den Grad der Beeinflussung der Funktionalität des Bauwerks durch die unterschiedlichen Materialien darzustellen. Beispielsweise ist bei Betonbuhnen das Material Stein in Bezug auf die Beeinflussung des Zustandes geringer zu bewerten als das Material Beton. Die Gewichtungen der einzelnen Materialien in den unterschiedlichen Materials-Kombinationen der Bautypen sind in Tabelle 24 angeführt. Die gewichteten Werte werden dann wieder addiert.

#### Funktion:

 $Gesamtschadensindex \ Betonbuhne = Schadenswert \ Beton * 0,70 + Schadenswert \ Stein * 0,30$ 

Materialkombination Stein / Stahl			
Material	Gewichtung		
Stein	0,35		
Stahl	0,65		
Summe	1,00		

Materialkombination Stein / Holz		
Material Gewichtung		
Stein	0,30	
Holz	0,70	
Summe	1,00	

Materialkombination Stein / Beton / Stahl		
Material	Gewichtung	
Stein	0,10	
Beton	0,60	
Stahl	0,30	
Summe	1,00	

Materialkombination Stein / Beton		
Material Gewichtung		
Stein	0,30	
Beton	0,70	
Summe	1,00	

Materialkombination Stein / Holz / Stahl		
Material Gewichtung		
Stein	0,20	
Holz	0,50	
Stahl	0,30	
Summe	1.00	

Materialkombination Stein / Holz / Beton/ Stahl		
Material	Gewichtung	
Stein	0,10	
Holz	0,35	
Beton	0,35	
Stahl	0,25	
Summe	1,00	

Tabelle 24: Gewichtungstabelle der einzelnen Materialien in unterschiedlichen Materials-Kombinationen

Der so berechnete Schadensindex stellt in angenäherter Weise den Zustand eines Bauwerks in Bezug auf seine Materialien dar und ermöglicht weiterführende Auswertungen und aufgrund seines metrischen Datenniveaus auch Korrelationen mit anderen Variablen. Basierend auf dem höchsten berechneten Indexwert (0,498) ergibt sich folgende Schadensintensitätsskala (Tabelle 25):

Schadensindexwert	Schadensintensität	
0,001 – 0,150	Geringe Schäden	
0,151 – 0,300	Mäßige Schäden	
> 0,300	Starke Schäden	

Tabelle 25: Schadensintensitätsskala

Zwar liegt die Skala des Schadensindex in einem Wertebereich zwischen 0 bis 1, jedoch müssten für einen Wert von 1 alle potentiellen Schadensmechanismen in ihrer maximalen Ausprägung auf das Bauwerk einwirken. Aus diesem Grund ist dieser Maximalwert sehr unwahrscheinlich und auch niedrigere Indexwerte beschreiben stark beeinträchtigte Bauwerke.

# 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der statistischen Auswertung dargestellt und erläutert. Zu Beginn wird ein Überblick über die in den Untersuchungsgebieten vorgefundenen Bautypen und deren unterschiedlichen Ausprägungen gegeben. Daraufhin werden die Ergebnisse der Zustandsanalyse der Buhnen in Hinblick auf Unterschiede in den einzelnen Untersuchungsgebieten, der Bautypen und auf die Auswirkungen der Bauwerke auf die Flussmorphologie dargestellt.

# 5.1 Bautypen im Untersuchungsgebiet

Im Zuge der Feldarbeiten wurden insgesamt 181 Bauwerke kartiert und deren Zustand analysiert (vgl. Tabelle 26). Die Mehrheit (77,3% - Steinbuhnen und Steinsporne) wurde aus großen Wasserbausteinen errichtet, während Betonbuhnen und Stammbuhnen mit jeweils nur sechs aufgenommenen Bauwerken die Minderheit bilden.

Bautyp	Häufigkeit (n)	Prozent (%)
Steinbuhne	31	17,1
Steinsporn	109	60,2
Betonbuhne	6	3,3
Wurfschlacht	29	16,0
Stammbuhne	6	3,3
Gesamt	181	100,0

Tabelle 26: Häufigkeiten der einzelnen Bautypen

Auch in der Aufschlüsselung der verwendeten Materialien und deren Kombinationen (vgl. Tabelle 27) wird ersichtlich, dass Stein das häufigste Baumaterial ist. Reine Steinbauwerke bilden mit 49,7% die Mehrheit, während weitere 19,3% der Bauwerke aus einer Stein-Stahl-Kombination bestehen, wobei die eingesetzten Steine mittels Stahlpiloten im Unterwasser gesichert sind. 30,4% bestehen aus unterschiedlichen Kombinationen zwischen Stein und anderen Materialien und nur ein einziges Bauwerk wurde aus reinem Holz errichtet.

Verwendete Materialien	Häufigkeit (n)	Prozent (%)
Stein	90	49,7
Stein+Stahl	35	19,3
Stein+Holz+Stahl	24	13,3
Stein+Holz+Beton+Stahl	13	7,2
Stein+Beton	3	1,7
Stein+Holz	7	3,9
Stein+Schotter+Beton	5	2,8
Stein+Schotter	2	1,1
Stein+Beton+Stahl	1	0,6
Holz	1	0,6
Gesamt	181	100,0

Tabelle 27: Häufigkeiten der unterschiedlichen Materialkombinationen

Insgesamt wurden während den Feldarbeiten neun Bauwerke in inklinanter, 26 in deklinanter und 146 in rechtwinkliger Ausrichtung erhoben. Die Verteilung der Ausrichtungen auf die einzelnen Bautypen wird in Abbildung 31 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich die deklinante Ausrichtung hauptsächlich auf Steinbuhnen und –sporne beschränkt. Inklinante Bauformen wurden nur bei Wurfschlachten und Steinbuhnen vorgefunden. Dass Beton- und Stammbuhnen nur in rechtwinkliger Ausführung erfasst wurden, kann jedoch auch an der geringen Fallzahl der beiden Bautypen zurückführen.



Ausrichtungen der unterschiedlichen Bauweisen

Abbildung 31: Bauwerksausrichtungen im Untersuchungsgebiet

### 5.1.1 Steinbuhnen

Insgesamt wurden 31 Steinbuhnen verteilt auf alle fünf Untersuchungsstandorte aufgefunden. Die Errichtungsweise variiert bei den einzelnen Bauwerken teilweise stark. In manchen Fällen wurde die Buhne aus einem einzelnen oder zwei großen Steinen errichtet (vgl. Abbildung 32), in anderen Fällen aus vielen großen Wasserbausteinen (vgl. Abbildung 33) oder mit zusätzlichen Sicherungen durch Stahlpiloten im Unterwasser (vgl. Abbildung 34).





Abbildung 32: Steinbuhne am Grünaubach

Abbildung 33: Steinbuhne an der Wangauer Ache



Abbildung 34: Steinbuhne an der Wangauer Ache mit Stahlpilotensicherung - Blickrichtung flussaufwärts

Diese Unterschiede in der Errichtung spiegeln sich auch in den Bauwerksgeometrien wider (vgl. Abbildung 35). Während ein Großteil der Steinbuhnen eine Länge von drei bis sechs Metern aufweist, misst das längste Bauwerk 13,0 m. Auch die Breite differiert zwischen 0,5 m und über 4,0 m, während die erhobenen Kopfhöhen zwischen 0,0 m und rund 1,5 m liegen. 95 % der erfassten Wurzelhöhen liegen ca. zwischen 0,2 und 1,75 m, es gibt jedoch auch Ausreißer mit bis zu über 3 m.



### 5.1.2 Steinsporne

Diese Bauform unterscheidet sich in ihrer Charakterisierung von Steinbuhnen nur durch das theoretische Längen-Breiten-Verhältnis (siehe Punkt 2.1.5). Dementsprechend sind sich diese zwei Bautypen in ihrem Erscheinungsbild in vielen Fällen sehr ähnlich (Abbildung 36) und können nur rechnerisch einem Typ zugeordnet werden. Bauwerke, denen eindeutig der Typ Steinsporn zugewiesen werden kann, werden häufig aus einem dreiecksförmigen Rahmen aus Wasserbausteinen errichtet, welcher in Folge mit Schotter- und Erdmaterial verfüllt wird. Diese Fälle sind im Bereich des Buhnenkörpers und der Buhnenwurzel häufig stark bewachsen und gliedern sich gut in das Landschaftsbild ein (vgl. Abbildung 37).



Abbildung 36: Steinsporn an der Wangauer Ache - Blickrichtung flussabwärts



Abbildung 37: Steinsporn an der Wangauer Ache - Blickrichtung flussaufwärts
Das Verhältnis von Länge und Breite der Steinsporne ist in Abbildung 38 klar zu erkennen. Während Steinbuhnen in vielen Fällen sehr viel länger sind als breit (Abbildung 35), ist das Verhältnis bei Steinspornen ausgeglichener. 95 % der Bauwerkslängen liegen im Wertebereich 1,1 – 7 m, die Breiten liegen zwischen 1 m und 6 m. Beide Abmessungskategorien weisen aber auch mehrere Ausreißer mit bis zu 9 m auf. Die Kopfhöhen sind ähnlich jener der Steinbuhnen, mit Maßen zwischen 0 m und rund 1,5 m. Auch für diese Variable wurden mehrere Ausreißer erfasst (Extremwert: 2,65 m). Die Wurzeln von Steinspornen werden durchschnittlich höher errichtet – mit Maßen zwischen 0,3 m bis 2,4 m und einem Ausreißer bei 2,85 m.



#### Bauwerksgeometrien der Steinsporne (n=109)

# 5.1.3 Betonbuhnen

Fünf Betonbuhnen wurden im Untersuchungsgebiet Rettenbach erhoben, ein Fall befand sich am Grünaubach. Während die Bauwerke am Rettenbach betonierte Steinbuhnen sind und primär zum Uferschutz errichtet wurden (Abbildung 39), ist der Hauptzweck des Bauwerks am Grünaubach vermutlich eher der Zugang zum Wasser und die Ablenkung der Flussströmung von der Steinmauer im Unterwasser (Abbildung 40).



Abbildung 39: Betonbuhne am Rettenbach - Blickrichtung flussaufwärts



Abbildung 40: Betonbuhne am Grünaubach - Verwendung als Wasserzugang

Wie in Abbildung 41 dargestellt, ragen die Betonbuhnen am Rettenbach vergleichsweise weit in den Flussquerschnitt hinein. Mit einer Länge von ca. einem Meter stellt das Bauwerk am Grünaubach einen Ausreißer bezüglich Geometrie dar. Grundsätzlich sind die erhobenen Betonbuhnen (mit Ausnahme jener am Grünaubach) im Durchschnitt größer als die erfassten Steinbuhnen und -sporne. Aufgrund der geringen Fallzahl (n = 6) kann daraus jedoch nicht geschlossen werden, dass diese kombinierte Beton-Stein-Bauweise generell nur in größeren Ausführungen errichtet wird. Die Kopfhöhen sind im Vergleich zu den oben beschriebenen Bauformen eher niedrig (0,35 - 0,7 m, Ausreißer bei 1,2 m), die Wurzelhöhen sind jenen der Steinsporne sehr ähnlich (0,4 – 2,7 m).



Bauwerksgeometrien der Betonbuhnen (n=6)



# 5.1.4 Wurfschlachten

Wurfschlachten wurden im Untersuchungsgebiet nur im Almtal aufgefunden (21 Fälle am Standort Grünaubach, acht Fälle am Standort Schindlbach). Alle erhobenen Bauwerke dieses Typs wurden ähnlich konstruiert. So bestehen Wurfschlachten im Almtal aus einem Rahmen aus Rundhölzern, welcher mit Wasserbausteinen verfüllt wird (vgl Abbildung 42 und Abbildung 44) – in 13 Fällen wurden die Hohlräume zwischen den Steinen zusätzlich mit Beton verfüllt, um Ausspülungen zu verhindern (vgl. Abbildung 43).



Abbildung 42: Wurfschlacht am Grünaubach - Blickrichtung flussabwärts



Abbildung 43: Betonierte Wurfschlacht am Schindlbach -Blickrichtung flussabwärts



Abbildung 44: Wurfschlacht am Grünaubach - Blickrichtung flussaufwärts

Aufgrund der Tatsache, dass die Längen der Buhnen immer in Richtung Flussmitte gemessen wurden, erscheinen Wurfschlachten in ihrer Geometrie breiter als lang, da sich ihre Rampenform in Fließrichtung erstreckt. Diese Rampenform erschwert auch die Messung der Kopf- und Wurzelhöhen, da diese vom Sohlniveau bis Bauwerksoberkante kontinuierlich ansteigen (vgl. Abbildung 42 und Abbildung 44). In Abbildung 45 wird zur Vergleichbarkeit mit anderen Bauwerken nur die Maximalhöhe von Buhnenkopf und -wurzel dargestellt und auch im Zuge der Auswertung werden die Kopfhöhen von Wurfschlachten auf diese Art gehandhabt. Die Längen der Wurfschlachten – in Richtung Flussmitte hin gemessen – liegen zwischen 2,1 m und 4,3 m – ein Fall weist eine Länge von 5,8 m auf. Die Bauwerke dieser Bauform sind in Fließrichtung gemessen zwischen 2,7 m und 7,4 m breit. Kopf- und Wurzelhöhen sind sich sehr ähnlich, da die Neigung zum Ufer nur geringfügig ansteigt.



# 5.1.5 Stammbuhnen

Der Bauwerkstyp der Stammbuhnen wurde nur an sechs Erhebungsstandorten im Gebiet des Grünaubachs vorgefunden. Dabei wurden jeweils zwei Rundhölzer übereinander mit leichter Steigung zum Ufer hin an Eisenpiloten befestigt und teilweise mit Wasserbausteinen im Vorfeld gesichert (Abbildung 46 und Abbildung 47).



Abbildung 46: Buhnenfeld mit Stammbuhnen - Blickrichtung flussabwärts



Abbildung 47: Stammbuhne - Blickrichtung flussaufwärts

Die einzelnen Bauwerke sind sich trotz unterschiedlicher Baujahre (1948 und 1960) in Bezug auf ihre Geometrie sehr ähnlich (vgl. Abbildung 48). In den Buhnenfeldern zwischen den Bauwerken hat sich eine große Menge an Geschiebe angelandet. Die Bauwerke sind rund 2,5 – 2,9 m lang (Extremwert bei 4,5 m) und 0,25 – 1,6 m breit (Steinsicherung im Vorfeld wurde mit gemessen). Die Kopfhöhen liegen in einem Wertebereich von 0,35 - 0,7 m, während die Bauwerkswurzeln 0,7 – 1,1m hoch sind.



Bauwerksgeometrien der Stammbuhnen (n=6)

Abbildung 48: Bauwerksgeometrie Stammbuhnen

# 5.2 Zustandsanalyse

Im Zuge der Zustandserhebung wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Schadensmechanismen (siehe 4.1.6) an den einzelnen Bauwerken aufgenommen. Im folgenden Abschnitt werden die Differenzen zwischen den einzelnen Untersuchungsgebieten und unterschiedlichen Bauweisen auf Basis der durchgeführten statistischen Analysen herausgearbeitet. Abschließend werden die Auswirkungen von Bauwerksparametern auf die lokale Flussmorphologie untersucht.

# 5.2.1 Schäden nach Untersuchungsgebiete

Um Unterschiede in der Wirkung verschiedener Schadensmechanismen für die Untersuchungsgebiete darzustellen, ist einleitend eine Charakterisierung der Gebiete bezüglich ihrer Verbauungsgeschichte und der vorherrschenden Bauwerke notwendig, da von einer maßgeblichen Beeinflussung der Schäden durch die Eigenheiten der Untersuchungsgebiete auszugehen ist.

Abbildung 49 stellt dazu in kumulierter Form die Bauwerksanzahl in den einzelnen Untersuchungsgebieten nach Baujahr dar und verdeutlicht die verschiedenen Bauphasen. Während am Grünaubach die Hauptbauphase um 1945 war, wurde dessen Zubringer – der Schindlbach – in zwei Hauptphasen (um 1970 und 2005) verbaut. Auch an der Wangauer Ache wurden die meisten Bauwerke in zwei Phasen (1990 und zwischen 2010 und 2015) errichtet. Am Weißenbach wurde ein Großteil der Buhnen um 1980 gebaut, während alle erhobenen Bauwerke am Rettenbach aus dem Jahr 2007 stammen.



Kummulierte Bauwerksanzahl nach Baujahr und Untersuchungsstandorten

Abbildung 49: Kumulierte Bauwerksanzahl nach Baujahr und Untersuchungsstandorten

Das Baujahr ist hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit einer Buhne von Bedeutung. Je älter das Bauwerk ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es aufgrund unterschiedlicher Faktoren (Verwitterung, Bewuchs, Hochwasserereignisse, Materialverschleiß, usw.) beeinträchtigt wird.

Abbildung 50 stellt die Verteilung der unterschiedlichen Bautypen auf die einzelnen Untersuchungsgebiete dar. Am Grünaubach wurden alle fünf Bautypen vorgefunden, am häufigsten jedoch der Steinsporn mit 38,0 %. Auch die Wurfschlacht ist mit 29,6 % an vielen Erhebungsstandorten erfasst worden. Darauf folgt die Steinbuhne mit 22,5 %. Zudem ist das Untersuchungsgebiet Grünaubach das einzige Gebiet, in welchem Stammbuhnen (8,5 %) errichtet wurden. Mit nur 1,4 % ist die Betonbuhne am schwächsten in diesem Gebiet vertreten. Am Rettenbach wurden drei unterschiedliche Bautypen erfasst, 37,5 % der Fälle sind Steinbuhnen, 31,3 % Steinspore und ebenfalls 31,3 % Betonbuhnen, welche an diesem Gewässer im Vergleich zu den anderen Untersuchungsgebieten am häufigsten vorkommen. Auch am Schindlbach wurden drei unterschiedliche Bautypen erfasst. Die meisten erhobenen Bauwerke waren Steinsporne (59,4 5), gefolgt von Wurfschlachten mit 25,0 % und Steinbuhnen mit 15,6 %. An der Wangauer Ache wurden nur zwei unterschiedliche Bauformen erhoben, hauptsächlich Steinsporne (90,5 %) und vereinzelt Steinbuhnen (9,5 %). Am Weißenbach sind alle untersuchten Fälle Steinsporne.



Verteilung der Bautypem in den Untersuchungsgebieten

Abbildung 50: Verteilung der Bautypen in den Untersuchungsgebieten

Betrachtet man die Verteilung der unterschiedlichen Gefälleklassen (Abbildung 51) in den einzelnen Untersuchungsgebieten, werden deutliche Unterschiede sichtbar. Das Gefälle am Grünaubach variiert stark und fällt in alle sechs Klassen (0,00 % bis über 15,00 %), auch am Schindlbach sind stärkere Varianzen erkennbar (3,01-15,00 %). Am Rettenbach ist das Gefälle sehr ausgeglichen – an 93,8 % der Buhnenstandorte liegt das Gefälle zwischen 3,01 % und 6,00 %. Das Gefälle der Wangauer Ache liegt größtenteils zwischen 3,01 % und 9,00 %, während am Weißenbach vorrangig Bauwerke an steileren Flussabschnitten untersucht wurden – 75 % der Standorte weisen eine Steigung von über 9,00 % auf.



Gefälle in den Untersuchungsgebieten

Abbildung 51: Gefälle in den einzelnen Untersuchungsgebieten

### 5.2.1.1 Materialschäden

Der Gesamtschadensindex beschreibt den Gesamtzustand der Bauwerke in Bezug auf die möglichen Materialschäden (vgl. Punkt 4.4.4). Abbildung 52 stellt die Verteilung der Indizes der einzelnen Bauwerke in den fünf Untersuchungsgebieten dar. Auffallend hierbei sind die verhältnismäßig hohen Schadenindizes am Weißenbach sowie der starke Ausreißer an der Wangauer Ache (mit einem Wert von 0,498) – obwohl an letzterem Gewässer die Indexwerte im Vergleich mit den anderen Untersuchungsgebieten durchschnittlich niedriger sind. Auch am Grünaubach und am Schindlbach finden sich Bauwerke mit Ausreißer-Werten. Grundsätzlich sind die Werte am Grünaubach jedoch höher als an seinem Quellfluss. Am Rettenbach wird eine starke Streuung der Werte ersichtlich – 50 % der Werte liegen zwischen 0,020 und 0,195.

Die Korrelation der HQ100-Angaben der einzelnen Untersuchungsgebiete mit dem Schadensindex zeigt einen signifikanten Zusammenhang zwischen Schäden und Abflusswert bei einem 100-jährlichen Hochwasserereignis (r = .265, p < .001). Jedoch muss bei dieser Auswertung beachtet werden, dass die Hochwassermenge für das gesamte Fließgewässer berechnet wurde und nicht bezogen auf die einzelnen Lagepunkte der erhobenen Fälle. Im Oberlauf beispielsweise kann die Abflussmenge geringer ausfallen als im Unterlauf. Aus diesem Grund kann die Korrelation mit dem HQ100-Wert nur als Näherungswert angesehen werden.



Zusätzlich werden die Werte des Schadensindex mittels der Schadensintensitätsskala in ArcGIS visualisiert. Dabei werden in einzelnen Gebieten Cluster von stärker beschädigten Bauwerken sichtbar.

Am Grünaubach sind bei dieser Darstellungsform vier unterschiedliche Cluster erkennbar. Der erste (Abbildung 53 links) befindet sich in einem Übergang von Prallufer zu gerader Fließstrecke und die sechs betroffenen Bauwerke sind vor 81 bzw. 85 Jahren errichtet worden. In diesem Bereich wurden außerdem fünf Buhnen, die laut Kollaudierungsoperat vorhanden sein sollten, nicht aufgefunden. Bei diesen Fällen wird davon ausgegangen, dass diese bereits vollständig zerstört und von der Strömung abgetragen wurden. Rechts in Abbildung 53 ist ebenfalls ein kleiner Cluster zu erkennen. Bei diesen Bauwerken handelt es sich um sechs Wurfschlachten mit unbekanntem Baujahr, jedoch wird auch hier vermutet, dass es sich um ältere Bauwerke handelt.



Abbildung 53: Schadenscluster am Grünaubach - Abschnitt 1 (Fließrichtung von rechts nach links)

Die anderen beiden Schadenscluster im Untersuchungsgebiet Grünaubach finden sich weiter flussaufwärts (Abbildung 54). Links in der Darstellung sind viele Bauwerke entlang eines langgezogenen Prallufers zu erkennen, die zwischen 57 und 74 Jahre alt sind. Dieser Cluster wird einerseits durch das Alter der Bauwerke, andererseits durch das lange Prallufer und die starke Richtungsänderung des Flussverlaufes bedingt. Der zweite Cluster (Abbildung 54 rechts) liegt im Übergangsbereich von einer Rechts- zu einer Linkskurve des Flusses, wobei die Bauwerke jeweils am Prallufer liegen. Ein Teil der Buhnen in diesem Bereich wurde bereits 1907 errichtet und ist somit 120 Jahre alt. Zusätzlich liegen die beschädigten Bauwerke entlang einer Uferschutzmauer und konnten aus diesem Grund nicht in das Ufer eingebunden werden. Auch in diesem Abschnitt waren zum Zeitpunkt der Feldaufnahmen fünf Bauwerke nicht auffindbar.



Schadensindex

An der Wangauer Ache sind Schadenscluster weniger stark ausgeprägt (Abbildung 55). Der erste Abschnitt (rechts oben im Bild) besteht aus Bauwerken, die eine starke Rechtskurve des Flusses lenken. Der zweite Cluster (links unten im Bild) liegt entlang einer Straße und schützt das

Abbildung 54: Schadenscluster am Grünaubach - Abschnitt 2 (Fließrichtung von rechts nach links)

straßenseitige Ufer vor Erosion. Die drei noch vorhandenen Bauwerke sind sehr groß dimensioniert (bis zu 13 m lang und 5 m breit) und stark mit unterschiedlichen Pflanzen (Kraut und Bäume) bewachsen.



Abbildung 55: Schadenscluster an der Wangauer Ache (Fließrichtung von oben nach unten)

Im Gebiet des Weißenbaches findet sich ein Cluster im Bereich einer Flusslaufverengung und zwei weitere in Flussaußenbögen (vgl. Abbildung 56). Hier hat die starke Tendenz zur Umlagerung großen Einfluss auf den Zustand der Bauwerke, denn dadurch sind diese in vielen Fällen starken Belastungen ausgesetzt.



Abbildung 56: Schadenscluster am Weißenbach (Fließrichtung von rechts nach links)

In den Untersuchungsgebieten Schindlbach und Rettenbach wurden keine eindeutigen Schadenscluster vorgefunden.

Abbildung 57 stellt den Schadensindex in Bezug auf das Gefälle der einzelnen Bauwerksstandorte dar. Zwar weisen die Fälle teilweise eine breite Streuung auf, jedoch ist auch eine leichte Tendenz zu einem positiven linearen Zusammenhang zu erkennen. Auch der Korrelationskoeffizient zeigt einen mäßigen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen (r = .171, p = .021), die Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden ist hingegen vergleichsweise gering ( $R^2 = 0.0293$ ).



#### Schadensindex nach Gefälle

Abbildung 57: Schadensindex nach Gefälle

### 5.2.1.2 Kolkbildung

Nachfolgend wird untersucht, ob in den einzelnen Untersuchungsgebieten unterschiedliche Tendenzen zur Kolkbildung bestehen. In Abbildung 58 wird die Kolkbildung in Prozent in Hinblick auf die Untersuchungsgebieten aufgeschlüsselt. In den Gebieten Schindlbach und Weißenbach wurde an ca. 60 % der Buhnen ein Kolk erhoben, über 20 % dieser Kolke legen die Unterkanten der Bauwerke frei und erhalten dementsprechend die Klassifizierung "tief". Am Grünaubach und am Rettenbach wurde in rund 50 % der Fälle eine Kolkbildung vorgefunden, wobei am Rettenbach die Tendenz zu tieferen Kolken mit 18,8 % stärker ausgeprägt ist als am Grünaubach (5,6 %). Am stabilsten bezüglich Kolkbildungen erweist sich die Sohle der Wangauer Ache. In diesem Gebiet wurde nur an rund 30 % der Untersuchungsstandorte ein Kolk erhoben – davon wurde die Mehrheit (21,4 %) als mitteltiefer Kolk (Bauwerk mit geringer Einbindung in die Sohle) und nur 2,4 % der Fälle als tiefer Kolk klassifiziert.



Kolkbildung nach Untersuchungsgebieten

### 5.2.1.3 Ausspülung der Bauwerke

Dieser Punkt stellt die Ausspülung von Bauwerken in den einzelnen Untersuchungsgebieten dar. Wie in Abbildung 59 ersichtlich wird, ist die Ausspülung einzelner Bauwerksteile vor allem am Standort Weißenbach sehr stark ausgeprägt. Nur 15 % der Bauwerke wurden im Zuge der Zustandsbewertung am Weißenbach als nicht ausgespült vorgefunden, während 35% der Bauwerke stark ausgespült waren. In den Gebieten Grünaubach, Rettenbach und Schindlbach wurden weniger ausgespülte Bauwerke (unter 38 %) erhoben, jedoch wurden am Rettenbach verhältnismäßig viele stark ausgespülte Bauwerke kartiert (18,8 %). An der Wangauer Ache war zum Zeitpunkt der Aufnahmen der Zustand der Bauwerke in Bezug auf die Ausspülung sehr gut, in weniger als 10 % der Fälle wurde eine Ausspülung erhoben.



Ausspülung der Bauwerke nach Untersuchungsgebieten

Abbildung 59: Ausspülung nach Untersuchungsgebieten

### 5.2.1.4 Verklausung der Bauwerke

Die Verklausung von Bauwerken durch Schwemmholz war zum Zeitpunkt der Erhebungen vor allem im Gebiet Weißenbach stark ausgeprägt (vgl. Abbildung 60). 75 % der Bauwerke in diesem Gebiet waren verklaust, 15 % der Fälle wiesen große Ansammlungen von Schwemmholz auf. Teilweise wurde durch extreme Verklausung eine Ausspülung der Bauwerke kompensiert und so durch natürliche Gegebenheiten eine Funktionserfüllung gewährleistet (vgl. Abbildung 61). In den restlichen vier Gebieten war die Tendenz zu Verklausung der Buhnen weniger stark ausgeprägt, an weniger als 20 % der Erhebungsstandorte wurden Schwemmholzansammlungen vorgefunden.



Verklausung der Bauwerke nach Untersuchungsgebieten

Abbildung 60: Verklausung nach Untersuchungsgebieten



Abbildung 61: Stark verklauste Buhne am Weißenbach - Blickrichtung flussabwärts

# 5.2.2 Schäden nach unterschiedlichen Parametern der Bauweisen

Folgender Abschnitt stellt unterschiedliche Schadensmechanismen der einzelnen Bauweisen vergleichend gegenüber. Dabei wird auch die Wirkung der Bauwerksausrichtung (inklinant, deklinant und rechtwinklig) sowie Zusammenhänge zwischen Buhnengeometrie und aufgetretenen Schäden betrachtet. Zu berücksichtigen sind bei diesen Auswertungen jedoch die niedrigen Fallzahlen von Beton- (n = 6) und Stammbuhnen (n = 6).

#### 5.2.2.1 Materialschäden

Zur Auswertung der Materialschäden werden die Schadensindexwerte abhängig von den Bautypen in einem Boxplot-Diagramm dargestellt (Abbildung 62). Dabei ist vor allem bei den Typen mit höheren Fallzahlen (Steinbuhne, Steinsporn) eine breite Streuung der Indexwerte (0,000 – 0,278 bzw. 0,000 – 0,283) zu erkennen. Die Lage der Boxen beider Bauwerkstypen weist darauf hin, dass 50 % der berechneten Indexwerte für Steinbuhnen und Steinsporne unter 0,120 liegen und somit nur geringe Schäden aufweisen. Bei beiden Steinbauformen finden sich jedoch auch Ausreißer mit stärkeren Schäden – zwei Fälle der Steinsporne weisen Indexwerte von rund 0,500 auf.

Die Wurfschlachten weisen trotz ebenfalls höherer Fallzahl eine geringe Varianz der Werte auf. 50 % der Indexwerte liegen bei diesem Bautyp über 0,150. Beton- und Stammbuhnen weisen ebenfalls eine geringe Streuung der Werte auf, dies lässt sich jedoch durch die geringe Fallzahl beider Bautypen erklären. Trotzdem ist auch hier ein Trend zu eher stärkeren Schäden zu erkennen, das untere Quartil liegt bei beiden Bauformen in etwa bei 0,200. Zudem ist anzumerken, dass bei den letzten drei Bautypen kein einziger Fall ohne Materialschäden erfasst wurde.







Abbildung 63 stellt die Schadensindexwerte in Bezug auf die Bauwerksausrichtungen vergleichend dar. Die statistischen Werte der deklinanten und rechtwinkligen Ausrichtungen sind sich ähnlich und die Abweichung des inklinanten Bautyps erschließt sich aus der geringen Fallzahl. Demzufolge hat die Bauwerksausrichtung nur geringen Einfluss auf Materialschäden.



Der Einfluss der Buhnengeometrie auf den Materialschadensindex ist nur schwach ausgeprägt und die diesbezüglichen Ergebnisse werden aus diesem Grund hier nur kurz angeführt. Zudem ist die Auswertung der Bauwerksgeometrie ohne Relation zu Flussbreite oder Bauwerksabstand nur bedingt aussagekräftig. Der Zusammenhang zwischen Buhnenbreite B<sub>B</sub> und Schadensindex (r = .213, p = .004) ist, verglichen mit den anderen drei Variablen am deutlichsten. Die Werte der erhobenen Längen- (L<sub>B</sub>) und Wurzelmaße (H<sub>BW</sub>) korrelieren zwar schwach mit dem Schadensindex (Korrelationswerte Länge-Index: r = .186, p = .012; Wurzel-Index: r = .156, p = .036), jedoch kann von keinem bedeutenden Zusammenhang gesprochen werden. Die Höhe des Buhnenkopfes H<sub>BK</sub> hat auf Basis der Korrelationswerte keinen Einfluss auf die Materialschäden (r = .126, p = .091).

Da die von Umgebungsumständen (Flussbreite, Bauwerksabstand) losgelöste Betrachtung der Buhnengeometrie nur in geringem Maße realitätsnahe Aussagen erlaubt, werden die Abstände zwischen den einzelnen Bauwerken in Buhnenfeldern (A<sub>a</sub>) und das Verhältnis FB/L<sub>B</sub> auf Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit eines Bauwerks und dessen Materialien untersucht. Jedoch führen sowohl die Auswertung von Bauwerksabständen und Schadensindexwerten als auch jene des Verhältnisses A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> und Indexwerten zu keinen signifikanten Korrelationen. Mithilfe von Abbildung 64 werden die erhobenen Fälle in Bezug auf das Verhältnis A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> und Schadensindex visualisiert. Die Regressionsgerade in beiden Darstelllungen zeigt einen negativen linearen Zusammenhang, jedoch ist das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> sehr gering – und somit die Abweichung der Variablen von der Geraden sehr groß – und auch die Korrelationskoeffizienten werden auf Basis der p-Werte als nicht signifikant gewertet (A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> – Index: r = -.112, p = .191).



Zusammenhang zwischen A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> und Schadensindex (n=138)

Im Fall der Auswertung des Zusammenhangs zwischen FB/L<sub>B</sub> und Schadensindex kann ebenfalls kein signifikanter Zusammenhang ermittelt werden (r = -.126, p = .090). Jedoch ist in Abbildung 65 eine leichte Tendenz zu stärkeren Schäden bei niedrigeren Verhältniszahlen (Bauwerk ist im Verhältnis zur Flussbreite länger) zu erkennen.



Zusammenhang zwischen FB/L<sub>B</sub> und Schadensindex (n=181)

Abbildung 65: Zusammenhang zwischen FB/L<sub>B</sub> und Schadensindex

Die Auswertung des Schadensindex nach anderen geometrischen Verhältnissen ( $A_a/H_{BW}$ ,  $A_a/H_{BK}$ ,  $F_B/H_{BW}$ ,  $A_a/B_B$ ) führt zu keinen signifikanten Ergebnissen.

Ein mäßiger Zusammenhang besteht zusätzlich auch zwischen Bauwerksalter und Schäden am Material (r = .319 p < .001). Die Regressionsgerade in Abbildung 66 mit dem Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup>=0,1019 zeigt einen positiven linearen Zusammenhang, wobei nur ein geringer Anteil der

Abbildung 64: Zusammenhang zwischen A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> und Schadensindex

Varianz erklärt werden kann. Daraus lässt sich schlussfolgern, je älter das Bauwerk, desto mehr wurde das Material in Anspruch genommen und in Folge beschädigt. Jedoch wurden ebenso Bauwerke erhoben, die 70-80 Jahre alt waren und keine beziehungsweise nur geringe Schäden aufwiesen. Dies spricht für die Langlebigkeit von Buhnen.



### Zusammenhang zwischen Bauwerksalter und Schadensindex (n=163)

Die Streudiagramme in Abbildung 67a-b zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Materialschadensindex und Eintiefungen im Flussbett. Die Korrelation von Eintiefungen in der Flussmitte ( $E_M$ ) und dem Schadensindex ergab einen Korrelationskoeffizienten r = .416 mit einem p-Wert von .020 – dies entspricht einem mäßigen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen. Besonders stark zeigt sich diese Tendenz auch bei  $E_{GU}$  – Eintiefungen des Flussbettes in der Nähe jener Uferseite, die dem Bauwerk gegenüberliegt (r = .596, p = .031; R<sup>2</sup> = 0,3554). Jedoch muss bei dieser Auswertung die vergleichsweise geringe Fallzahl (n = 13) beachtet werden.

Abbildung 66: Zusammenhang zwischen Bauwerksalter und Schadensindex



Abbildung 67a-b: Zusammenhang zwischen Schadensindex und Flussbetteintiefungen

Abbildung 68 stellt die Intensität der Materialschäden (Schadensintensitätsskala siehe Tabelle 25) bezüglich der Lage des Bauwerkes im Buhnenfeld dar. Auffällig bei dieser Darstellung sind die scheinbar geringen Schäden der ersten Buhnen im Feld, das bedeutet jenen Bauwerken, die ohne Schutz im Oberwasser der Strömung ausgesetzt sind. Insgesamt weisen 87,5 % der ersten Buhnen im Feld Schäden auf, 5 % der betroffenen Bauwerke sind dabei stark beschädigt. Buhnen, die in der Mitte des Feldes liegen, weisen eine geringere Anzahl von stark beschädigten Buhnen (4,2 %), dafür eine Häufung an Bauwerken mit mittleren Schäden auf (30,2 %). Die letzten Bauwerke des Buhnenfeldes sind in 92,5 % der Fälle beschädigt, 5 % weisen starke Schäden auf.

Auch Einzelbuhnen wurden in den Untersuchungsgebieten erfasst, jedoch ist die Anzahl dieser Fälle so gering (n = 5), dass die Ergebnisse bezüglich der Schäden nach relativer Lage im Buhnenfeld nicht aussagekräftig sind.



Schadensintensität nach Lage im Buhnenfeld

Abbildung 68: Schadensintensität nach Bauwerkslage im Buhnenfeld

Basierend auf den theoretischen Grundlagen besteht die Annahme, dass die Schadensintensität auch nach Uferform (Prall-, Gleitufer oder gerade Fließstrecke) differiert. Es wurden jedoch nur acht Bauwerke an Gleitufern und 14 Bauwerke an gerader Fließstrecke erhoben – die restlichen 159 Bauwerke befinden sich entlang eines Prallufers. Diese Tatsache bedingt, dass eine Auswertung diesbezüglich keine vergleichbaren und aussagekräftigen Ergebnisse liefern kann.

#### 5.2.2.2 Kolkbildung

In Bezug auf den Bautyp können bei der Tendenz zu Kolkbildung nur geringe Unterschiede festgestellt werden (vgl. Abbildung 69). Steinbuhnen und –sporne weisen in etwa 50% der Fälle einen Kolk auf, wobei rund die Hälfte dieser Fälle die Einbindung des Bauwerks in die Flusssohle beeinträchtigt. Rund 10 % der Kolke legen bei den Buhnen dieser Bauform die Unterkanten frei. Wurfschlachten neigen grundsätzlich zu einer vermehrten Kolkbildung (bei 58,6 % der Fälle wurde ein Kolk vorgefunden). Die geringen Kolkbildungen bei Betonbuhnen beziehungsweise die nicht vorhandene Kolkbildung bei Stammbuhnen ist auf Grund der geringen Fallzahl nicht repräsentativ. Das Gesamtbild der Auswertung zeigt jedoch, dass der Bautyp der Buhnen nur geringen Einfluss auf die Häufigkeit und Intensität der Kolkbildung hat.



Kolkbildung nach Bautypen

Abbildung 69: Kolkbildung nach Bautypen

In Abbildung 70 wird der Zusammenhang zwischen Bautypen der Buhnen und der Verortung des Kolkes ersichtlich. Steinbuhnen zeigen in 45,1 % der Fälle eine Neigung zur Kolkbildung im Bereich von Bauwerkskopf und -körper, wohingegen Steinsporne trotz ausgeprägter Kolke in Kopfnähe (23,9 %) auch im Uferbereich gefährdet sind (6,4 % Verortung an Wurzel, Wurzel und Körper, gesamte Buhne). Von den 29 erhobenen Wurfschlachten wurde an 13 Bauwerken (44,8 %) eine Kolkbildung im Bereich des Kopfes festgestellt, jeweils an zwei Bauwerken (6,9 %) befand sich der Kolk entlang von Kopf und Körper beziehungsweise entlang der gesamten Buhne.



Verortung des Kolkes nach Bautyp (n=181)

Abbildung 71a-b thematisiert die Tiefe (a) und die Verortung von Kolkbildungen entlang der Bauwerke (b) in Bezug auf die Bauwerksausrichtung. Hierbei ist zu erkennen, dass alle drei unterschiedlichen Ausrichtungen eine Tendenz zur Kolkbildung aufweisen, deklinante Buhnen jedoch häufiger zu tieferen Kolken neigen – insgesamt wurden in 69,2 % der Fälle ein mittlerer oder ein tiefer Kolk erhoben, bei 19,2 % war die Unterkante des Bauwerks freigelegt. Auffällig dabei ist die – im Vergleich zu den anderen beiden Ausrichtungsarten – vermehrte Auskolkung im Bereich der Bauwerkswurzel (insgesamt 15,3 % - Verortungen an Wurzel, Körper und Wurzel, gesamte Buhne) und entlang der gesamten Buhnenlänge (7,7 %). Im Fall der inklinanten Bauform ist die Neigung zur Kolkbildung schwächer ausgeprägt, nur in 33,3 % der Fälle wird zum Zeitpunkt der Aufnahmen ein Kolk vorgefunden, davon ist bei 22,2 % die untere Einbindung des Bauwerks intakt. Trotz der geringen Fallzahl der inklinanten Buhnen ist eine Tendenz zur Kolkbildung im Bereich des Kopfes zu erkennen. An 43,8 % der Standorte mit rechtwinkliger Bauausführung wurden Auskolkungen erhoben. Dabei sind durch Turbulenzen in Kopfnähe (28,8 % Verortungen an Kopf, Kopf und Körper, gesamte Buhne) in einem Großteil der Fälle mitteltiefe Kolke (21,9%) entstanden. Auch eine Neigung zur Kolkbildung in Ufernähe ist bei dieser Bauform mit insgesamt 11,7 % (Verortungen an Wurzel, Körper und Wurzel, gesamte Buhne) gegeben.



Abbildung 71a-b: Kolkbildung nach Bauwerksausrichtung, links: Kolktiefe, rechts: Kolkverortung

Der Einfluss der Buhnengeometrie auf die Kolkgeometrie ist basierend auf den erhobenen Daten nicht zu vernachlässigen, jedoch ist auch in diesem Fall wieder die von Umgebungsbedingungen losgelöste Betrachtung dieser Parameter nur bedingt aussagekräftig. Aus diesem Grund werden nachfolgend nur Auswertungen in Bezug auf unterschiedliche geometrische Verhältnisse angeführt. Diagramme und Korrelationswerte zu den einzelnen Bauwerksabmessungen sind Anhang 11.2.1 zu entnehmen.

Abbildung 72a-c stellt nachfolgend den Zusammenhang zwischen dem Verhältnis  $A_a/L_B$  und der Kolkgeometrie dar. Demnach bildet sich bei einer kleineren Verhältniszahl ( $A_a/L_B < 5$ ) ein größerer Kolk als bei größeren Verhältniszahlen ( $A_a/L_B > 5$ ). Die p-Werte der zugehörigen Korrelationen zeigen jedoch keinen signifikanten Zusammenhang (Tabelle 28).

		Τĸ	Β <sub>κ</sub>	L <sub>K</sub>
A <sub>a</sub> /L <sub>B</sub>	r	238	219	209
	р	.056	.080	.095

Tabelle 28: Korrelationswerte von A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> und Kolkgeometrie



Abbildung 72a-c: Zusammenhang zwischen A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> und Kolkgeometrie

Verhältnisse zur Flussbreite haben im Fall der Kolkbildung besonderen Einfluss, da sie die Einengung des Flussquerschnittes widerspiegeln. Abbildung 73a-c stellt die Beziehung des Verhältnisses FB/L<sub>B</sub> zur Kolkgeometrie dar. Die Streudiagramme aller drei Darstellungen zeigen dabei einen eindeutigen negativen, linearen Zusammenhang. Das bedeutet, je länger das Bauwerk in Relation zur Flussbreite ist, desto größere Kolke entwickeln sich. Auch die Korrelationswerte weisen einen mäßigen, aber signifikanten Zusammenhang nach (Tabelle 29).

		Τ <sub>κ</sub>	Β <sub>κ</sub>	L <sub>K</sub>
FB/L <sub>B</sub>	r	336	366	341
	р	.002	.001	.002

Tabelle 29: Korrelationswerte von FB/L<sub>B</sub> und Kolkgeometrie



Auch das Verhältnis der Flussbreite zur Höhe der Buhnenwurzel zeigt signifikante Korrelationen mit der Kolkgeometrie (Tabelle 30). Der negative, lineare Zusammenhang zwischen diesen Parametern wird in Abbildung 74a-c mittels Streudiagrammen dargestellt. Aufgrund der starken Streuung vor allem im niedrigen Verhältniszahlbereich (FB/H<sub>BW</sub> < 10) ist das Bestimmtheitsmaß sehr niedrig (R<sup>2</sup> <0,1). Trotzdem ist zu erkennen, dass bei niedrigen Verhältnissen (Abmessung der Buhnenwurzel ist in Relation zur Flussbreite größer) die Tendenz zu größeren Kolken vorherrscht, während hohe Verhältniszahlen eher kleinere Kolke bedingen.

		Τ <sub>κ</sub>	B <sub>K</sub>	L <sub>K</sub>
FB/H <sub>BW</sub>	r	289	249	316
	w p	.008	.024	.004

Tabelle 30: Korrelationswerte von FB/H<sub>BW</sub> und Kolkgeometrie



Abbildung 75a-b und Abbildung 76a-b schlüsseln die Verortung der Kolkbildung nach geometrischen Verhältnissen der verschiedenen Abmessungen auf. Hierfür wurden die unterschiedlichen Maße zur einfacheren Darstellung und Analyse in Klassen eingeteilt. Durch diese Einteilung wird zusätzlich ersichtlich, welche Abmessungsklassen stärkere Kolkbildungen aufweisen.

Abbildung 75a setzt die Verortung und Häufigkeit eines Kolkes mit dem Verhältnis von Flussbreite zu Bauwerkslänge (FB/L<sub>B</sub>) in Beziehung. Dabei ist bis auf den Ausreißer der Klasse 1,830-2,619 deutlich zu erkennen, dass kürzere Bauwerke im Verhältnis zur Flussbreite geringere Tendenzen zur Kolkbildung aufweisen. Für die niedrigste Klasse < 1,830 wurden demnach in 58,8 % der Fälle ein Kolk erfasst, während es für die höchste Klasse > 4,667 nur noch 32,6 % waren. Die Verortung hingegen hängt auf Basis dieser Auswertung nicht von dem Verhältnis FB/L<sub>B</sub> ab, da kein logisches Muster in der Verteilung der Kolkverortungen auf die einzelnen Klassen erkennbar ist.

Die Darstellung in Abbildung 75b zeigt die Kolkverortung und –häufigkeit aufgeschlüsselt nach Klassen des Verhältnisses A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub>. Dabei wird erneut deutlich, dass kürzere Bauwerke – dieses Mal im Verhältnis zum Bauwerksabstand – eine schwächere Neigung zur Kolkbildung haben. Die niedrigste Klasse (A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub> < 2,001 – Abstand ist maximal doppelt so lang wie die Buhnenlänge) weist zu 58,6 % der Fälle einen Kolk auf, die größte Klasse > 5,952 nur zu 37,0 %. Diese Analyse bildet zudem ein Muster bezüglich der Kolkverortung entlang des Bauwerks ab. Die größeren Klassen zeigen eine Tendenz Kolke im Bereich der Wurzel zu entwickeln.

Bei beiden Auswertungen ist eine Abweichung der zweiten Klasse (FB/L<sub>B</sub> = 1,830-2,619 und  $A_a/L_B$  = 2,001-2,927) von der allgemeinen Tendenz der übrigen Klassen ersichtlich.





Abbildung 75a-b: Kolkverortung und -häufigkeit nach a) FB/L<sub>B</sub> und b) A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub>

Das Verhältnis A<sub>a</sub>/B<sub>B</sub> beeinflusst die Kolkbildung insofern (Abbildung 76a), dass breitere Bauwerke im Verhältnis zum Bauwerksabstand (Klassengrenze 3,749) zu einer stärkeren Kolkbildung insgesamt, aber auch im Bereich des Kopfes führen. Schmälere Bauwerke hingegen neigen weniger häufig zu einer Kolkbildung, dafür häufiger im Bereich der Bauwerkswurzel.

Abbildung 76b stellt abschließend noch die Beziehung zwischen Kolkverortung, -häufigkeit und dem Verhältnis von Flussbreite zur Kopfhöhe (FB/H<sub>BK</sub>) dar. Diese Auswertung zeigt deutlich, dass niedrigere Köpfe eindeutig weniger Kolke entwickeln als hohe Köpfe. Die niedrigste Klasse (FB/H<sub>BK</sub> < 10,000) weist in 55,9 % der Fälle einen Kolk auf, während bei der höchsten Klasse (FB/H<sub>BK</sub> > 36,666) nur noch bei 28,6 % der Fälle ein Kolk erfasst wurde. Auf die Lage des Kolkes wirkt sich diese Variable hingegen kaum aus.



Abbildung 76a-b: Kolkverortung und -häufigkeit nach a) A<sub>a</sub>/B<sub>B</sub> und b) FB/H<sub>BK</sub>

Betrachtet man die Ergebnisse der Verortung des Kolkes zusammenfassend, kann geschlussfolgert werden, dass sich die unterschiedlichen Verhältnisse nur in geringem Maße auf die Lage des Kolkes auswirkt. Jedoch ist der Einfluss der Buhnenmaße in Verhältnis zu Bauwerksabstand – vor allem die Kopfhöhe – und Flussbreite auf die grundsätzliche Tendenz zur Kolkbildung nicht zu vernachlässigen.

#### 5.2.2.3 Ausspülung der Bauwerke

Folgender Abschnitt beschreibt die Ergebnisse bezüglich der Ausspülung der Bauwerke in Hinsicht auf Bautyp, Bauwerksausrichtung und Geometrie der Buhne.

Abbildung 77 stellt die Ausspülung der Buhnen aufgeschlüsselt nach ihren Bauformen dar. Eindeutig erkennbar ist, dass hauptsächlich die flexiblen Bautypen (Steinbuhne, -sporn) Ausspülungen von einzelnen Bauwerksteilen aufweisen. Betonierte beziehungsweise fix verankerte Typen (Betonbuhne, Stammbuhne) sind nur gering durch eine Schädigung aufgrund von Ausspülung gefährdet. Wurfschlachten hingegen stellen in dieser Hinsicht einen besonderen Fall dar, da sie einerseits durch den Holzrahmen geschützt werden und andererseits gibt es sie sowohl mit loser Steinfüllung als auch in betonierter Form. Die 27,2 % an ausgespülten Bauwerken lassen sich somit auf unbetonierte Wurfschlachten zurückführen, bei denen einzelne Steine aus dem Bereich, in welchem das Bauwerk flach in die Sohle überläuft und somit der Schutz des Holzrahmens fehlt, ausgespült wurden.



Abbildung 77: Ausspülung der Bauwerke nach Bautyp

Diese Tendenz zeigt sich auch bei der Auswertung der Ausspülung nach Materialien (vgl. Abbildung 78). Betonierte Bauwerke werden im Vergleich zu nicht-betonierten Bauwerken viel weniger ausgespült. Es wurde nur bei 15,4 % der Bauwerke mit Stein/Holz/Beton/Stahl-Kombination (und einem Bauwerk mit Stein/Beton/Stahl-Kombination) eine Ausspülung erfasst, während im Gegensatz dazu 34,0 % der reinen Steinbauwerke oder 34,1 % der Stein/Stahl-Bauwerke von Ausspülung betroffen sind. Die Materialkombination Stein/Holz/Stahl präsentiert hier wieder die Wurfschlachten – daraus lässt sich die geringe Ausspülungsrate von 16,0 % erklären.



Ausspülung nach Materialien

Abbildung 78: Ausspülung nach Materialien

Die Einflüsse der Buhnengeometrie auf die Ausspülung der Bauwerke werden in Abbildung 79a-b und in Abbildung 80a-b dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Buhnenlänge starke Auswirkungen auf die Ausspülung der Bauwerke hat. Der Prozentsatz von nicht ausgespülten Buhnen sinkt mit der Bauwerkslänge stetig. Während Buhnen mit Längen von 1,51-3,00 m nur zu 18,3 % Ausspülungen aufweisen, sind Bauwerke mit einer Länge von 6,01-7,50 m zu 64,3 % ausgespült. Auch die Intensität steigt mit zunehmender Länge - im Vergleich 6,7 % in der Klasse 1,51-3,00 m und 50,0 % in der Klasse 6,01-7,50 m. Die abweichenden Ergebnisse der Klasse > 7,50m werden aufgrund der geringen Fallzahl von n=8 aus diesen Betrachtungen ausgeschlossen. Dasselbe trifft auch auf die Werte der Klasse 0,00-1,50 m zu, die zwar grundsätzlich in das Muster der restlichen Ergebnisse fallen würden, jedoch aufgrund der geringen Fallzahl (n=6) als nicht aussagekräftig angesehen werden muss.

Die Buhnenbreite hingegen hat nur geringe Auswirkungen auf die Ausspülung der Bauwerke. Alle Breitenklassen weisen mit ca. 30-40 % an ausgespülten Bauwerken sehr ähnliche Werte auf und differieren auch in ihrer Ausspülungsintensität nur gering. a) Ausspülung der Bauwerke nach L<sub>B</sub>



b) Ausspülung der Bauwerke nach B<sub>B</sub>

Abbildung 79a-b: Ausspülung der Bauwerke nach L<sub>B</sub> und B<sub>B</sub>

Auch die Analyse des Zusammenhangs zwischen Wurzelhöhe und Bauwerksausspülung zeigt nur geringe Einflüsse (vgl. Abbildung 80a). Die Ausspülungsrate sinkt mit zunehmender Wurzelhöhe auf 20 %, Buhnen mit Wurzelhöhen von 0,51 – 1,00 m sind durchschnittlich am stärksten ausgespült (46,1 %, davon sind rund 35 % stark ausgespült)

Abbildung 80b zufolge weisen Buhnen mit höheren Köpfen geringe Ausspülungen auf. Während 47,5 % der Bauwerke der Klasse 0,00 – 0,40 m Ausspülungen aufweisen, sind es in der Klasse mit Kopfhöhen über 1,20 m nur 12 %. Auch die Stärke der Ausspülung nimmt mit zunehmender Kopfhöhe ab.





Grundsätzlich hat die Bauwerksgeometrie auf Basis dieser Datenerhebung nur geringen Einfluss auf die Ausspülung der Buhnen. Nur die Bauwerkslängen zeigen einen signifikanten Zusammenhang zu ausgespülten Bauwerksteilen – durch die größere Angriffsfläche steigt die Wahrscheinlichkeit einer Ausspülung linear an. Dementgegen steht die Analyse des Zusammenhangs zwischen Ausspülung und Kopfhöhe, demnach ein höheres Bauwerk weniger ausgespült wird.

Abschließend wird zu diesem Schadensmechanismus untersucht, ob die Ausspülung der Bauwerke auch von deren Alter abhängig ist. Hierfür wird in Abbildung 81 die Ausspülungsintensität nach Bauwerksalter aufgeschlüsselt. Es ist ersichtlich, dass es keinen linearen Zusammenhang zwischen Ausspülung und Alter gibt. Junge Buhnen (0 – 40 Jahre) weisen einen hohen Anteil an starken Ausspülungen auf, während bei älteren Buhnen dieser Wert geringer ist. Auffällig ist zudem, dass bei Buhnen im Alter von 61 – 80 Jahren die Tendenz zur Ausspülung im Vergleich zu den anderen Altersklassen geringer ist (48,7 %). Für ganz alte Buhnen (über 80 Jahre) steigt der Grad der Ausspülung jedoch wieder stark an – 63,6 % der Bauwerke sind ausgespült.



Ausspülung nach Alter der Bauwerke

Alter der Bauwerke

Abbildung 81: Ausspülung nach Alter der Bauwerke

#### 5.2.2.4 Unterspülung der Bauwerke

Unterspülung von Bauwerken entsteht häufig durch eine Ausbreitung des Kolkes unter die Buhne. Bei flexiblen Bautypen – wie zum Beispiel Steinbuhnen – geben die Bauwerksteile nach und rutschen in den Kolk. Auf diese Weise kommt es bei flexiblen Bauformen nur in seltenen Fällen zu einer Unterspülung (vgl. Abbildung 82). Ausnahmen bilden einige wenige Fälle (1,8 % bei den Steinspornen), die beispielsweise aus einem einzelnen großen Wasserbaustein errichtet wurden, welcher mit der Wurzel noch im Ufer verankert ist, aber der Kopf unterspült wurde (vgl. Abbildung 83).

Am stärksten sind unflexible, betonierte Bauformen durch eine Unterspülung gefährdet. Zwar ist die Fallzahl der Betonbuhnen mit n=6 sehr gering, jedoch weisen fünf der sechs (83,3 %) untersuchten Bauwerke eine Unterspülung auf. Das lässt auf eine starke Tendenz zur Unterspülung bei Betonbuhnen schließen. Auch bei 6,9 % der Wurfschlachten wurde eine Unterspülung erhoben, dies lässt sich ebenfalls durch die unflexible und teilweise vermörtelte Bauform erklären.

Auch Stammbuhnen sind durch ihre Fixierung an Stahlpiloten grundsätzlich ein unflexibler Bautyp, jedoch ist auch hier die geringe Fallzahl zu beachten. Zudem waren die Buhnenfelder der Stammbuhnen im Untersuchungsgebiet stark mit grobem Geschiebe verlandet, was wiederum einer Unterspülung entgegen wirkt.



Unterspülung nach Bautyp

Abbildung 82: Unterspülung der Bauwerke nach Bautyp



Abbildung 83: Unterspültes Bauwerk bestehend aus einem großen Wasserbaustein an der Wangauer Ache - Blickrichtung flussabwärts

Weitere Analysen in Zusammenhang mit anderen Parametern werden in dieser Untersuchung der Unterspülung nicht angeführt, da die Gesamtfallzahl von unterspülten Bauwerken so gering ist (n=9), dass weder Aussagekraft noch Vergleichbarkeit in ausreichendem Maß gegeben sind.

#### 5.2.3 Auswirkungen auf die Flussmorphologie

Folgender Abschnitt untersucht die möglichen Auswirkungen von Buhnen und deren unterschiedlichen Bauweisen auf die Flussmorphologie. Dabei werden die Sedimentstruktur rund um die Bauwerke, die Verlandungsflächen, welche durch die Buhnen verursacht wurden, die Eintiefungen ins Flussbett sowie die Ufererosionen analysiert.

#### 5.2.3.1 Sedimentstruktur

Während die Flusssohle in schnell fließenden Wildbächen meistens hauptsächlich durch grobes Material (> 20 cm) gebildet wird, kann es im Strömungsbereich um Buhnen häufig zu zusätzlicher Anlagerung von Feinmaterial kommen. Für diese Analysen wurden die unterschiedlichen, in den Untersuchungsgebieten vorgefundenen Sedimentstrukturen in Klassen unterteilt. Aufschluss über die Korngrößen in den einzelnen Klassen gibt Tabelle 31:

Feinmaterial	< 0,063 mm bis 2 cm	
Mittleres Material	2 cm bis 20 cm	
Grobes Material	20 cm bis > 40 cm	
Tabelle 31. Korngrößenverteilung der Einteilung der Sedimentstrukturen		

Tabelle 31: Korngroßenverteilung der Einteilung der Sedimentstrukturen

Abbildung 84 stellt die Sedimentstrukturen im Bereich der untersuchten Buhnen mithilfe eines Kreisdiagrammes dar. Rund drei Viertel der erhobenen Standorte (74,6 %) weisen eine diverse Sedimentstruktur – das bedeutet Material von < 0,063 mm bis > 40 cm – auf. Nur Feinmaterial (< 0,063 mm – 2 cm) wurde in 0,6% der Fälle vorgefunden. An den restlichen Standorten wurden unterschiedliche Sedimentmischungen aufgenommen: 7,2 % mittlere und grobe Strukturen (2 cm bis > 40 cm), 1,7 % feine und grobe Strukturen (< 0,063 mm bis 2 cm und 20 cm bis > 40 cm) sowie 16,0 % feine und mittlere Strukturen (< 0,063 mm bis 20 cm).



Sedimentstruktur (n=181)

Abbildung 84: Sedimentstruktur im Bereich der Buhnen

Wird die Sedimentstruktur nach der Lage des Bauwerks an der Fließstrecke (gerade Fließstrecke, Prallufer, Gleitufer) analysiert (Abbildung 85), zeigt sich, dass sich feineres Sediment vermehrt an geraden Fließstrecken ablagert (35,7 % feine und mittlere, 14,3 % feine und grobe Korngrößen) und diverse Strukturen an diesen Abschnitten in weniger Fällen erhoben wurden (50 %). Im Gegensatz dazu liegt der Prozentsatz an untersuchten Bauwerksstandorten mit diversen Sedimentstrukturen an Gleitufern bei 87,5 %. Zusätzlich lagert sich an Gleitufern auch vermehrt gröberes Material ab (12,5 % mittlere und grobe Strukturen). An Prallufern finden sich sowohl eine Mehrheit an diversen Korngrößenmischungen (76,1 %) als auch Fälle mit nur feineren (15,7 %) oder nur gröberen Strukturen (7,5 %).



Sedimentstruktur nach Lage des Bauwerks an der Fließstrecke

Abbildung 85: Sedimentstruktur nach Lage des Bauwerks an der Fließstrecke

Aufgeschlüsselt nach Bautyp sind für die unterschiedlichen Buhnenarten nur geringe Differenzen in der Sedimentstruktur zu erkennen (vgl. Abbildung 86). Ausnahme bilden die Wurfschlachten, die eine Tendenz zur Anlagerung von feinerem Material aufweisen (48,28 % feine und mittlere Sedimentstrukturen – < 0,063 mm bis 20 cm). Im Vergleich zu den anderen Typen ist der Prozentsatz der Fälle mit diversen Strukturen – und somit an Sediment mit zusätzlich grobem Material – gering (48,28 %). Für die restlichen Bautypen liegt dieser Prozentsatz bei über 75 % – im Fall der Steinsporne – bei bis 100 % – im Fall der Stammbuhnen. Die Aussagekraft der Ergebnisse in Bezug auf die Stammbuhnen ist jedoch aufgrund der Fallzahl (n=6) und der Tatsache, dass alle sechs Bauwerke an demselben Flussabschnitt erhoben wurden, nur als gering zu bewerten.


Verteilung der Sedimentstrukturen nach Bautyp

Abbildung 86: Verteilung der Sedimentstrukturen nach Bautyp

Die Sedimentstruktur im Bereich um die Bauwerke wird zudem eindeutig von der Kopfhöhe beeinflusst. Abbildung 87 stellt diesen Zusammenhang dar und zeigt, dass Buhnen mit höheren Köpfen (> 0,81 m) dazu neigen, vermehrt feinere Sedimentstrukturen (0,81-1,20 m: 19 %; > 1,20 m: 40,0 %) anzulanden. Bei niedrigeren Köpfen (< 0,80 m) ist diese Tendenz weniger stark ausgeprägt – diese Bauwerke neigen eher dazu, zusätzlich auch gröberes Material anzulanden.



#### Sedimentstruktur nach H<sub>BK</sub>

Abbildung 87: Sedimentstruktur nach H<sub>BK</sub>

Wenn die unterschiedlichen Sedimentstrukturen im Bereich der Bauwerke nach Untersuchungsgebiet dargestellt werden (vgl. Abbildung 88), wird ersichtlich, dass es vor allem in den Gebieten Grünaubach (25,35 % feine und mittlere, 2,82 % feine und grobe Strukturen) und Weißenbach (50 % feine und mittlere, 5 % feine Strukturen) zu einer Häufung von feineren Korngrößen kommt. Die Gebiete Rettenbach (6,25 %), Schindlbach (9,38 %) und Wangauer Ache (11,9 %) weisen hingegen einen höheren Prozentsatz an Sedimentstrukturen mit gröberen Korngrößen auf. Bis auf das Gebiet Weißenbach sind jedoch diverse Sedimentstrukturen um die Bauwerke vorherrschend.



Verteilung der Sedimentstrukturen nach Untersuchungsgebiet

Abbildung 88: Verteilung der Sedimentstrukturen nach Untersuchungsgebiet

Abbildung 89 stellt die Sedimentstruktur aufgeschlüsselt nach Gefälleklassen dar. Alle unterschiedlichen Steigungen zeigen eine vermehrte Anlandung von diversen Sedimentstrukturen, zudem ist aber auch erkennbar, dass Bauwerke an Flussabschnitten mit stärkerem Gefälle dazu neigen, vermehrt feineres Material anzulanden. Während bei einem Gefälle von 3,01-6,00 % bei 84,5 % der Fälle diverses, bei 3,4 % mittleres und grobes und bei 12,1 % der Fälle feines und mittleres Sediment erhoben wurden, sind es bei einem Gefälle von 12,01-15,00 % nur noch 69,2 % diverse, dafür aber 30,8 % feine und mittlere Strukturen. Das bedeutet die Diversität des Substrates sinkt mit steigendem Gefälle stetig – kleinere Korngrößen sind an den Bauwerken vorherrschend. Die Klasse > 15 % bildet in dieser Analyse eine Ausnahme, hier muss aber die geringe Fallzahl (n=6) berücksichtigt werden.



Sedimentstruktur nach Gefälle

Abbildung 89: Sedimentstruktur nach Gefälle

#### 5.2.3.2 Verlandungsfläche

Insgesamt wurde an 75 (31,07%) der 181 untersuchten Bauwerke eine Verlandungsfläche vorgefunden, davon befanden sich rund 90% im Unterwasser der Buhne. Abbildung 90 stellt die Verteilung der erhobenen Verlandungsflächen auf die unterschiedlichen Bautypen dar. Durchlässige Buhnenarten wie Steinbuhnen und –sporne weisen im Unterwasser weniger Verlandungen auf (35,5% beziehungsweise 38,5%). Im Vergleich dazu wurde bei rund 50% der untersuchten Wurfschlachten und Stammbuhnen eine Verlandung erfasst, während es bei Betonbuhnen – aufgrund ihrer undurchlässigen Bauform und dem dadurch entstandenem Schutz vor Strömung flussabwärts – über 66% waren.



Verlandungsflächen nach Bautyp



Der Zusammenhang zwischen Verlandungsflächen und Buhnengeometrie ist bei von Umgebungsparametern losgelöster Analyse wieder kritisch zu bewerten. Die Korrelationstabellen und Streudiagramme diesbezüglich sind Anhang 11.2.2 zu entnehmen. Kurz zusammengefasst haben basierend auf diesen Auswertungen vor allem die Buhnenlänge und die Höhe der Wurzel starken Einfluss auf die Bildung von Verlandungsfläche in der Zirkulationszone des Bauwerks.

Nachfolgend werden die Verlandungsflächen sowie der prozentuelle Anteil der Verlandungsfläche am Buhnenfeld mit unterschiedlichen Verhältnissen der einzelnen Maße in Zusammenhang gebracht.

Abbildung 91a-c setzt die Verlandungsfläche in Beziehung zu den geometrischen Verhältnissen FB/L<sub>B</sub> (a), FB/H<sub>BW</sub> (b) und L<sub>B</sub>/B<sub>B</sub> (c). In den ersten beiden Fällen ist ein negativer, linearer Zusammenhang zu erkennen. Das bedeutet, je länger das Bauwerk beziehungsweise je höher dessen Wurzel im Verhältnis zur Flussbreite, desto größer ist der verlandete Bereich flussabwärts vom Bauwerk. Am stärksten ist der – in diesem Fall positive – Zusammenhang jedoch zu dem Verhältnis L<sub>B</sub>/B<sub>B</sub> gegeben. Daraus lässt sich schließen, im Verhältnis zur Länge weniger breite Bauwerke begünstigen größere Verlandungsflächen.

Diese Aussagen werden zusätzlich durch die Korrelationswerte zwischen AV und den Verhältnissen unterstützt (Tabelle 32).

		FB/L <sub>B</sub>	FB/H <sub>BW</sub>	L <sub>B</sub> /B <sub>B</sub>
	r	241	230	.425
Av	р	.037	.047	.000

Tabelle 32: Korrelationswerte von Av und FB/L<sub>B</sub>, FB/H<sub>BW</sub>, L<sub>B</sub>/B<sub>B</sub>



Abbildung 92a-c stellt den prozentuellen Anteil der Verlandungsfläche  $A_V$  an der Fläche des Buhnenfeldes  $A_B$  in Abhängigkeit zu den Verhältnissen  $A_a/L_B$  (a),  $A_a/H_{BW}$  (b) und  $L_B/B_B$  (c) dar. Anhand von Darstellung a) ist zu erkennen, dass im Fall des Verhältnisses  $A_a/L_B$  ein negativer, linearer Zusammenhang besteht. Das bedeutet je höher die Verhältniszahl ist, je kürzer die Buhne in Relation zum Bauwerksabstand, desto geringer ist der Anteil der verlandeten Fläche im Buhnenfeld.

Auch in Abbildung 92b wird ein negativer, linearer Zusammenhang zwischen dem prozentuellen Anteil A<sub>V</sub> an A<sub>B</sub> und dem Verhältnis A<sub>a</sub>/H<sub>BW</sub> deutlich. Demnach steigt dieser Anteil, wenn die Wurzelhöhe im Verhältnis zum Bauwerksabstand größer wird, das bedeutet bei kleineren Verhältniszahlen (A<sub>a</sub>/H<sub>BW</sub> < 25).

Die dritte Darstellung (c) in Abbildung 92 hingegen bildet eine positive, lineare Beziehung von prozentueller Verlandungsfläche und  $L_B/B_B$  ab. Daraus wird ersichtlich (wie bereits mithilfe von Abbildung 91c dargestellt), dass schmälere Bauwerke – im Verhältnis zur Länge gesehen – auch in Hinblick auf den prozentuellen Anteil der Verlandungsfläche am Buhnenfeld eine Tendenz zur vermehrten Sedimentablagerung und Verlandungsbildung aufweisen.

Tabelle 33 visualisiert die den vorangegangenen Auswertungen zugehörigen Korrelationswerte.

		$A_a/L_B$	A <sub>a</sub> /H <sub>BW</sub>	L <sub>B</sub> /B <sub>B</sub>
Anteil A <sub>v</sub>	r	341	335	.323
an A <sub>B</sub>	р	.012	.013	.017



Tabelle 33: Korrelationswerte von Anteil von A<sub>V</sub> an A<sub>B</sub> und A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub>, A<sub>a</sub>/H<sub>BW</sub> und L<sub>B</sub>/B<sub>B</sub>

#### 5.2.3.3 Eintiefungen des Flussbettes

Dieser Abschnitt untersucht die Auswirkungen unterschiedlicher baulicher Ausprägungen auf Eintiefungen des Flussbettes. Dafür werden die Parameter der Bauwerksgeometrie, das Verhältnis von Flussbreite zu Bauwerkslänge sowie die Abstände zwischen den Bauwerken in Buhnenfeldern und die Eintiefungen des Flussbettes (Lage der Eintiefungen relativ gesehen zur Lage der Bauwerke) zueinander in Beziehung gesetzt.

Bei den nachfolgenden Auswertungen müssen in allen Darstellungen (Abbildung 93a-d bis Abbildung 95a-b) die Fallzahlen der zwei unterschiedlichen Eintiefungsverortungen beachtet werden, da nur in 13 Fällen eine Eintiefung auf der dem Bauwerk gegenüberliegenden Seite  $E_{GU}$ erfasst wurden.

Grundsätzlich ist auch bei dieser Analyse die alleinige Betrachtung der Buhnengeometrie mit Vorsicht zu betrachten, da davon auszugehen ist, dass viele unterschiedliche Prozesse auf jenen der Eintiefung des Flussbettes einwirken. Trotzdem werden an dieser Stelle die zugehörigen Auswertungen aufgrund der teilweisen hohen Korrelationswerte zu den Eintiefungen der Flussmitte  $E_M$  erläutert.

Zwischen Buhnenlänge L<sub>B</sub> und Eintiefungen der Flussmitte E<sub>M</sub> (r = .569, p = .001) sind signifikante Zusammenhänge festzustellen. Die Aussage der Korrelationsergebnisse wird in Abbildung 93a durch die geringe Streuung und dem linearen Zusammenhang der Punktwolke unterstützt. Ähnliche Ergebnisse zeigt die Auswertung der Auswirkungen der Buhnenbreite B<sub>B</sub> auf Eintiefungen des Flussbettes (vgl. Abbildung 93a-b) – auch hier sind Zusammenhänge zu Eintiefungen der Flussmitte E<sub>M</sub> (r = .452, p = .011) vorhanden.

Hingegen zeigen die Korrelationen der Wurzelhöhe  $H_{BW}$  (r = .248, p = .179) und der Kopfhöhe  $H_{BK}$  (r = .103, p = .582) keinen signifikanten Zusammenhang. Die starke Streuung der Punktwolken in Abbildung 93c und d zeigen ebenfalls den geringen Zusammenhang zwischen den Variablen.





Zusammenfassend stellt die Buhnengeometrie einen beeinflussenden Faktor in Bezug auf die Eintiefungen des Flussbettes dar. Vor allem entlang der Streichlinie (Flussmitte) wird das Flussbett bei größer dimensionierten Bauwerken stärker erodiert.

Einen wichtigen Parameter in Bezug auf Flussbetteintiefungen stellt auch das Verhältnis von Flussbreite zu Bauwerkslänge FB/L<sub>B</sub> dar (vgl. Abbildung 94a-b). Je höher diese Verhältniszahl ist – je kürzer die Buhne relativ zur Flussbreite – desto geringer sind die Eintiefungen, und je niedriger die Verhältniszahl (je länger die Buhne relativ zur Flussbreite) desto stärker wird das Flussbett eingetieft. Eintiefungen der Flussmitte E<sub>M</sub> korrelieren signifikant mit dem Verhältnis Flussbreite zu Bauwerkslänge (r = -.508, p = .004), Eintiefungen des Flussbettes in der Nähe des dem Bauwerk gegenüberliegenden Ufers E<sub>GÜ</sub> jedoch sind nicht auf dieses Verhältnis zurückzuführen, da der p-Wert sehr hoch und somit die Signifikanz des Korrelationskoeffizienten nicht gegeben ist (r = -.412, p = .161).



b) Zusammenhang zwischen FB/L<sub>B</sub> und  $E_{G\ddot{U}}$  (n=13)



Abbildung 94a-b: Zusammenhang zwischen dem Verhältnis Flussbreite/Bauwerkslänge und Flussbetteintiefungen

Signifikant sind die Zusammenhänge zwischen dem Bauwerksabstand A<sub>a</sub> und den Eintiefungen im Bereich der Flussmitte  $E_M$  (r = .568, p = .003). Abbildung 95a stellt diese Einflüsse in Form eines Streudiagrammes dar und macht den generellen linearen Zusammenhang (größere Abstände bedingen stärkere Eintiefungen der Flussmitte) deutlich.

Auf Eintiefungen des Flussbettes in Ufernähe  $E_{GU}$  haben die Abstände zwischen den Buhnen nur sehr geringen bis gar keinen Einfluss (Abbildung 95b). Betrachtet man den Korrelationskoeffizienten die gegenüberliegende Flussseite betreffend, ist dieser zwar sehr hoch (r =. 471), jedoch zeigt der p-Wert p = .144 keine Signifikanz dieses Ergebnisses.



Abbildung 95a-b: Zusammenhang zwischen Aa und Eintiefungen des Flussbettes

Basierend auf einer Korrelation der Variablen kann kein Zusammenhang zwischen dem Gefälle des jeweiligen Flussabschnittes und Eintiefungen des Flussbettes festgestellt werden. Auch weitere Auswertungen bezüglich geometrischer Verhältnissen der unterschiedlichen Abmessungen (A<sub>a</sub>/L<sub>B</sub>, FB/H<sub>BW</sub>, FB/H<sub>BK</sub>, usw.) liefern keine signifikanten Ergebnisse.

#### 5.2.3.4 Ufererosionen

Buhnen sollen das Ufer vor Erosionen schützen, jedoch können sie – bei falscher Dimensionierung – die Strömung auch so lenken, dass durch sie erst Erosion entsteht. Dieser Abschnitt untersucht, welche Bauwerksparameter Einfluss auf die Ufererosionen haben.

Betrachtet man die Gegenüberstellung von Buhnenlänge zur Ufererosion, an welchem auch das Bauwerk liegt (vgl. Abbildung 96a), ist eine eindeutige Tendenz zu vermehrten Erosionen bei längeren Bauwerken zu erkennen. Demnach wurde bei 57,7 % der Bauwerke mit einer Länge von 4,51-6,00 m und 57,1 % der Bauwerke mit einer Länge von 6,01-7,50 m eine Erosion desselben Ufers festgestellt. Bei der Klasse 4,51-6,00 m sind zudem 26,9 % der erfassten Ufer stark erodiert. Kurze Buhnen hingegen (1,51-3,00 m) haben eine geringere Tendenz das Ufer, in welchem sie verankert sind, zu erodieren, nur in 75 % der Fälle wurde eine Erosion erfasst.

Die Erosion des gegenüberliegenden Ufers hingegen hängt nur in geringem Maße direkt von der Länge der einzelnen Bauwerke ab (vgl. Abbildung 96b) – alle Klassen weisen sehr ähnliche Prozentwerte bezüglich der Ufererosion auf. In beiden Darstellungen jedoch müssen die Aussagen der Klassen 0,00-1,50 m und > 7,50 m aufgrund ihrer geringen Fallzahlen mit Vorsicht betrachtet werden, da sie deswegen nur in geringem Maße repräsentativ sind.



Abbildung 96a-b: Ufererosionen (Lage des Ufers relativ nach Bauwerkslage) nach LB

Da die Länge der Bauwerke allein in Bezug auf die Ufererosion nur wenig Aussagekraft hat, werden in Abbildung 97 die erfassten Erosionen in Hinsicht auf das Verhältnis von Flussbreite zu Buhnenlänge dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass vor allem niedrige Verhältniszahlen (0-3) vermehrt zu Erosionen desselben Ufers (Lage relativ zur Bauwerkslage) führen. Diese Aussage unterstützt das vorangegangene Ergebnis, dass längere Bauwerke eher dazu neigen, dasselbe Ufer zu erodieren. Sehr hohe Verhältniszahlen (> 6) weisen nur in wenigen Fällen eine Erosion desselben Ufers auf (12,5 %).

Im Vergleich sind die Erosionen des gegenüberliegenden Ufers schwächer ausgeprägt. Vor allem wenn die Bauwerke halb bis ein Fünftel so lang sind wie der Fluss breit (Verhältniszahl 2 – 5), kommt es dort häufig zu Erosionen. Sehr kurze Buhnen haben nur wenig Einfluss auf das gegenüberliegende Ufer, nur rund 19 % der Fälle der Verhältnisklassen 5 – 6 und > 6 weisen Erosionen auf.



Abbildung 97a-b: Ufererosionen (Lage des Ufers relativ nach Bauwerkslage) nach FB/L<sub>B</sub>

Da auf Grundlage der Theorie in Bezug auf die Ufererosionen desselben Ufers vor allem die Ausrichtung der Bauwerke von Bedeutung ist, beschäftigt sich Abbildung 98 mit dieser Thematik. Es ist ersichtlich, dass deklinante Buhnen eine etwas stärkere Tendenz zur Erosion am selben Ufer aufweisen (42,3 %) wie die anderen beiden Ausrichtungsformen (inklinant 33,3 % und rechtwinklig 37,7 %). Die rechtwinklige Form hingegen hat einen größeren Prozentsatz (13,0 %) an starken Erosionen.



#### Ufererosionen desselben Ufers (relativ zur Bauwerkslage) nach Ausrichtung

Abbildung 98: Ufererosionen desselben Ufers (relativ zur Bauwerkslage) nach Bauwerksausrichtung

## 6 Diskussion

Dieses Kapitel befasst sich mit den Erkenntnissen dieser Arbeit und zeigt Probleme beziehungsweise Verbesserungsmöglichkeiten in der Methodik auf. Ziel dieser Arbeit ist die Bewertung der Einflüsse von unterschiedlichen Parametern auf den Zustand und die Dauerhaftigkeit der Buhnen. Hierfür wurde mittels Aufnahmebogen eine Zustandsbewertung in fünf unterschiedlichen Untersuchungsgebieten durchgeführt und die Daten statistisch ausgewertet. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Auswertung diskutiert und die Forschungsfragen unter Berücksichtigung der aufgestellten Hypothesen beantwortet.

#### 6.1 Untersuchungsgebiete

Die Differenzen in den einzelnen Untersuchungsgebieten sind nur bedingt von deren Eigenschaften abhängig. Unterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten können aus den unterschiedlichen Bauperioden (sehr frühe Phasen im Gebiet Grünaubach – ab 1907, am Rettenbach erst 2007) abgeleitet werden, welche die verschiedenen Zustände der Bauwerke bedingen. Diese Bauphasen erklären auch die Schadenscluster in den einzelnen Gebieten, da Bauwerke bzw. Buhnenfelder in einem Cluster meist zur selben Zeit errichtet und durch dieselben Prozesse beeinträchtigt wurden.

Ebenfalls wird ersichtlich, dass Schäden vom Gefälle des Gewässers beeinflusst werden. Steileres Gefälle erhöht die Schubspannung und somit auch die Beanspruchung der einzelnen Bauwerke. Auch die Abflussmenge (HQ100) kann den Bauwerkszustand beeinflussen, in diesem Fall steigt die Beanspruchung der Bauwerke mit größerem Abfluss. Bei diesem Ergebnis muss jedoch beachtet werden, dass der Wert der Abflussmenge für das gesamte Fließgewässer berechnet wurde und nicht für jeden einzelnen Aufnahmestandort.

Im Fall des Weißenbachs wirkt sich zusätzlich die starke Tendenz zur Umlagerung auf den Zustand der Buhnen aus. Die Bauwerke liegen in diesem Gebiet fast ausschließlich an starken Außenbögen mit nahegelegenen Wanderwegen oder Straßen und müssen großen Belastungen standhalten. In diesen Bereichen muss durch eine regelmäßige Kontrolle die Gebrauchstauglichkeit der Bauwerke festgestellt und diese - wenn notwendig - wieder hergestellt werden.

Werden die Ergebnisse mit den anfangs beschriebenen Charakteristika der einzelnen Untersuchungsgebiete (siehe Punkt 3.1 – Geologie – und Punkt 3.2 – Klima) in Kontext gesetzt, wird ersichtlich, dass die Geologie der Gebiete im Fall dieser Untersuchung nur geringen Einfluss auf den Bauwerkszustand ausübt. Denn obwohl sowohl der Grünaubach als auch dessen Quellfluss Schindlbach im Flysch liegen, unterscheiden sie deutlich sich in ihren Schadensausprägungen. Auch der Weißenbach und die Wangauer Ache, die sich beide in Gebieten quartärer Schotterablagerungen befinden, differieren stark in Bezug auf die Schadensindexwerte. Dasselbe Bild zeigt sich auch in Bezug auf die Tendenz zur Kolkbildung.

Die niedrigen Indexwerte der Wangauer Ache können sich aber auf die klimatische Lage zurückführen lassen. Als einziges der fünf Untersuchungsgebiete liegt dieser Fluss nicht in einer Tallage am Alpennordrand. Dies bedingt schwächere Stauregenfälle und schwächere Extremereignisse und somit auch geringere Belastungen der Bauwerke.

#### 6.2 Schadensmechanismen

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse in Bezug auf die unterschiedlichen Schadensmechanismen zusammengefasst und diskutiert.

#### 6.2.1 Materialschäden

Die einzelnen Materialschäden wurden mit Hilfe eines gewichteten Schadensindex für die aufgenommenen Bauwerke zusammengeführt und bewertet. Auf Basis dieses Index können die Schäden mit unterschiedlichen Parametern der Bauwerke, aber auch mit deren Wirkungsmechanismen, in Beziehung gesetzt werden. Aus diesen Analysen kann abgeleitet werden, dass Schäden am Baumaterial zwar in geringem Maße von der Dimensionierung der Buhnen und dem Verhältnis der Geometrie zu Flussbreite und Bauwerksabstand abhängen, jedoch viel eher mit dem Alter der Bauwerke, etwaigen Begleitumständen sowie Eintiefungen des Flussbettes in Verbindung stehen.

Auch die Lage im Buhnenfeld ist ausschlaggebend, denn obwohl die ersten Bauwerke im Feld geringere Schäden als erwartet aufweisen, sind oft davorliegende Bauwerke schon zerstört und abgetragen. Ein Erklärungsansatz ist, dass diese zerstörten Buhnen die gesamte Kraft des Stroms abgefangen und die nachfolgenden Bauwerke geschützt haben. Eine alternative Interpretation ist, dass die ersten Bauwerke der Buhnenfelder teilweise bereits vor der Außenkurve des Flusslaufes beginnen, und so die direkte Hauptströmung erst auf nachfolgende Bauwerke trifft (Abbildung 99).



Abbildung 99: Skizzierung des Lageeinflusses auf den Bauwerkszustand

#### 6.2.2 Kolkbildung

Die Kolkbildung hat einen großen Einfluss auf den Zustand einer Buhne, da durch eine ausgeprägte Kolkbildung die Einbindung des Bauwerks in die Flusssohle verloren geht. Im Zuge der Datenauswertung wurde darauf geachtet, welche Parameter Einfluss auf die Kolkbildung haben und wo dieser Kolk entlang der Buhne verortet ist.

Die Ausrichtung der Bauwerke ist dabei von großer Bedeutung. Trotz geringer Fallzahlen zeigt die Ausprägung der Variablen inklinanter Buhnen, dass diese Ausrichtung keine Kolke in Ufernähe forciert. Dies liegt vor allem an der Ablenkung der Strömung bei Überspülung des Bauwerks – das Wasser strömt vom Ufer weg (PRZEDWOJSKI et al., 1995). Deklinante Bauwerke hingegen weisen in vielen Fällen eine Kolkbildung im Bereich der Wurzel auf, die Strömung wird bei Überspülung Richtung Ufer gezogen, welches in Folge erodiert. Diese Turbulenzen in Ufernähe in Kombination mit jenen, die am Kopfende der Buhne entstehen, führen in vielen Fällen zu einer Kolkbildung entlang der gesamten Buhne. Dasselbe Ergebnis zeigt sich auch bei rechtwinklig ausgerichteten Bauwerken. Starke Turbulenzen bilden sich bei dieser Form zwar hauptsächlich in Kopfnähe, jedoch entstehen gerade in Folge von Überspülung bei Hochwasserereignissen Sohlerosionen entlang der gesamten Buhne.

Der Bautyp an sich hat im Gegensatz zur eigentlichen Bauwerksgeometrie kaum Einfluss auf die Kolkbildung. Die Ergebnisse zu den geometrischen Variablen und den Verhältnissen von Flussbreite und Bauwerksabstand zu ebendiesen Variablen lassen eine logische Schlussfolgerung zu: an größeren Bauwerken bilden sich größere Kolke. Dies bedingt einerseits natürlich die einfache Tatsache, dass sich an kurzen Buhnen kein Kolk bilden kann, der um vieles länger ist als das Bauwerk selbst. Andererseits sind vor allem lange Buhnen ein größeres Hindernis für die Strömung, wodurch sich stärkere Turbulenzen bilden, welche die Wahrscheinlichkeit für eine ausgeprägte Kolkbildung erhöhen. Zudem wird durch im Verhältnis zur Flussbreite längere Bauwerke der Flussquerschnitt mehr eingeengt. Das bedeutet schnellere Fließgeschwindigkeiten, stärkere Wirbelbildung entlang der Buhne und vor allem am Kopf – dies führt wiederum zu

verstärkten Erosionen. Bezieht man die Bauwerkslänge hingegen auf den Abstand zwischen den Buhnen, wird ersichtlich, dass in diesem Fall im Verhältnis längere Bauwerke eine geringere Tendenz zur Kolkbildung aufweisen und vor allem der Wurzelbereich besser geschützt wird. Die von SUKHODOLOV et al. (2002) beschriebenen Strömungsverhältnisse bei unterschiedlichen Abstand-Längen-Verhältnissen (siehe Punkt 2.2 und Abbildung 13) dienen hier als Erklärungsansatz. Bei langen Bauwerken mit kurzen Abständen bilden sich zwei Wirbel, der Mixing Layer bleibt somit klein, geringer Strömungsaustausch findet statt (geringe Fließgeschwindigkeiten) und das Buhnenfeld bleibt dementsprechend ruhig. Aus diesem Grund ist bei kleineren Verhältniszahlen eine geringere Kolkbildung zu erwarten. Größere Verhältniszahlen (kurze Bauwerke im Verhältnis zum Abstand) hingegen bedingen einen Eintritt der Hauptströmung ins Buhnenfeld, die in Folge dort zu verstärkten Erosionen und Turbulenzen entlang der Bauwerke führen kann.

Wird das Verhältnis von Flussbreite zu Bauwerkskopf betrachtet, ist ersichtlich, dass kleine Verhältniszahlen mehr Kolkbildung hervorrufen als große Verhältniszahlen. Dies lässt sich durch die verstärkte Entwicklung von Turbulenzen durch größere Kopfhöhen und damit extremere Strömungsablenkungen erklären.

Generell ist eine Kolkbildung für das Bauwerk nicht nur negativ zu bewerten. Vor allem der ökologische Wert ist nicht außer Acht zu lassen, da die ruhigeren, tieferen Mulden im Schutz der Bauwerke ausgezeichnete Lebensräume und Ruheplätze für verschiedene Fischarten darstellen. Jedoch sollten Bauwerksformen, die zu extremeren Kolkbildungen neigen, vermieden werden, da Folgeschäden (Bruch, Kippen, Unterspülung des Bauwerks oder Ufererosion) die Buhne und deren Schutzfunktion stark beeinträchtigen können.

Durch die fortschreitende Ausbreitung eines Kolkes, welcher zuerst die Unterkante des Bauwerks freilegt und in Folge dieses unterwandert, kann es zur Unterspülung des gesamten Bauwerkes kommen. Unterspülte Bauwerke werden aufgrund der fehlenden Einbindung in die Sohle auf Dauer stärkere Schäden wie Kippen oder Bruch davon tragen. Dieser Schadensmechanismus lässt sich eindeutig mit den verwendeten Materialien in Verbindung bringen. Betonierte, unflexible Bautypen sind stark gefährdet unterspült zu werden, während flexible Bauformen in solchen Fällen nachgeben und in den Kolk rutschen.

#### 6.2.3 Ausspülung

Die Ausspülung einzelner Bauwerksteile kann in vielen Fällen einen Funktionsverlust nach sich führen. Diese Gefahr besteht vor allem bei flexiblen Steinbauwerken, da bei dieser Bauform nicht immer alle Steine in das Ufer oder in die Sohle des Flusses eingebunden werden können. Diese losen Bauteile können bei extremen Hochwasserereignissen leicht abgetragen werden. Unflexible Bautypen – wie Betonbuhnen - sind hingegen weniger gefährdet ausgespült zu werden. Auch die Wurfschlachten werden – aufgrund ihres schützenden Holzrahmens – nur in geringem Maß ausgespült.

#### 6.3 Auswirkungen auf die Flussmorphologie

Dieser Abschnitt diskutiert die wichtigsten Ergebnisse in Hinblick auf die Flussmorphologie und interpretiert diese.

#### 6.3.1 Sedimentstruktur

Die untersuchten Flüsse sind schnell fließende Wildbäche des Alpenvorlandes und ihr Sediment besteht hauptsächlich aus grobem Material. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung der erfassten Variablen zeigen eindeutig, dass sich durch die Strömungsveränderungen rund um die Buhnen und den Ruhebereich im Unterwasser der Buhnen eine diverse Sedimentstruktur anreichert.

Grundsätzlich liegt die Vermutung nahe, dass zwischen Sedimentstruktur und vor allem der Ablagerung von Feinmaterial und der Geologie der einzelnen Untersuchungsgebiete Zusammenhänge bestehen. Es zeigt sich, dass sich im Grünaubach, welcher in der Flyschzone liegt und daher einen größeren Anteil an Sandgesteinen aufweist, auch vermehrt Feinmaterial im Bereich der Buhnen sammelt. Am Schindlbach hingegen ist die Menge an feineren Sedimentstrukturen geringer, was sich einerseits durch höhere Fließgeschwindigkeiten des Quellflusses erklären lässt, andererseits wird er aus Karstkomplexen der des umgebenden Kalkgesteins gespeist, wodurch ein geringer Feinmaterialanteil entsteht. Durch die laufende Erosion wurde im Grünaubach bereits mehr feines Sediment angereichert. Am Weißenbach sind quartäre Ablagerungen vorherrschend, jedoch kommt es auch hier durch die starken Umlagerungstendenzen vermehrt zur Ablagerung von kleineren Korngrößen.

#### 6.3.2 Verlandungen

Verlandungen bieten neuen Lebensraum am Wasser und bieten zusätzliche Sedimentvielfalt. Vor allem wasserundurchlässige Bautypen – beispielsweise Betonbuhnen – stellen einen starken Schutz für die strömungsabgewandte Seite dar und führen zu starken Verlandungen. Durchlässige Bauwerke – wie Steinbuhnen tendieren in geringerem Ausmaß zu Verlandungen.

Die Buhnengeometrie hat insofern Einfluss auf die Verlandungsflächen an sich sowie auf den prozentuellen Anteil der Verlandungsfläche an der Fläche des Buhnenfeldes, als dass längere und höhere Bauwerke größeren Strömungsschutz bieten und somit eine Verlandung begünstigen. Ein Erklärungsansatz dieser Erkenntnis basiert wieder auf den Strömungsuntersuchungen (siehe Punkt 2.2 und Abbildung 13) von McCoy et al. (2008) und SUKHODOLOV et al. (2002). Demnach bilden längere Buhnen in Verbindung mit geringem Bauwerksabstand zwei Wirbel entlang der Bauwerke aus, wodurch ein verminderter Austausch des ufernahen Wirbels mit der Hauptströmung entsteht. Dadurch kommt es in diesem Bereich zu geringen Fließgeschwindigkeiten und vermehrten Sedimentablagerungen. Im Gegensatz dazu ist bei kürzeren Bauwerken und großen Bauwerksabständen der Vermischungsbereich zwischen Retentionszone und Hauptströmung größer, es findet mehr Austausch zwischen den beiden Strömungen statt. Dies bedingt eine geringere Verlandungstendenz.

#### 6.3.3 Eintiefungen des Flussbettes

Erosionen des Flussbettes entstehen vor allem entlang der Streichlinie des Bauwerks beziehungsweise des gesamten Buhnenfeldes. Durch die Einengung des Flussquerschnittes wird die Strömung schneller und erodiert mehr Sediment von der Sohle. Dabei ist vor allem das Verhältnis von Flussbreite zu Bauwerkslänge von Bedeutung, je länger die Buhnen und je mehr der Flussquerschnitt eingeengt wird, desto stärker wirkt sich dies auf das Flussbett aus und in Folge entstehen Eintiefungen der Sohle. Ist das Bauwerk kürzer als ein Viertel der Flussbreite, sinkt die Tendenz zu Eintiefungen des Flussbettes stetig.

#### 6.3.4 Ufererosionen

In einigen Fällen ist es schwierig zu erkennen, ob Ufererosionen erst entstanden sind, nachdem das Bauwerk errichtet wurde oder ob diese der ausschlaggebende Grund für die Errichtung waren. Aber es ist davon auszugehen, dass jene Uferseite, auf der das Bauwerk liegt, bereits vor der Errichtung erodiert war. Schwierig ist es herauszufinden, ob die Erosion weiter langsam voranschreitet oder durch das Bauwerk zum Erliegen kam. Eindeutig ist jedoch der Einfluss der Bauwerke auf die gengenüberliegende Uferseite. Hier ist vor allem das Verhältnis von Flussbreite zu Bauwerkslänge von Bedeutung. Es zeigt sich, dass bei einer Bauwerkslänge, die unter einem Fünftel der Flussbreite liegt, die Erosion des gegenüberliegenden Ufers stark vermindert ist. Bei längeren Bauwerken wird die Strömung bis ans andere Ufer gelenkt und greift dieses in Folge an. Demnach ist es empfehlenswert, wie auch theoretisch durch die Werke von JHA et al. (2000) und SHRESTA et al. (2012) unterstützt, die Buhnen nicht länger als ein Fünftel der Flussbreite zu bauen.

## 7 Conclusio

Bisherige Forschung in Bezug auf Buhnen wurde hauptsächlich an Bauwerken in Tieflandgewässern beziehungsweise mittels auf diese Rahmenbedingungen abgestimmter Modellversuche durchgeführt. Für den Einsatz von Buhnen und deren Auswirkungen in Wildbächen hingegen besteht ein Forschungsdefizit. Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung eines Instruments zur Zustandsbewertung von Wildbachbuhnen. Im Fokus des Aufnahmebogens steht die überblicksmäßige Erfassung unterschiedlicher Schadensmechanismen sowie der baulichen Parameter. Der Vorteil der präsentierten Herangehensweise liegt in der Flexibilität der Methode. So können unterschiedliche Bauwerkstypen und die damit zusammenhängenden Heterogenitäten in der Ausgestaltung berücksichtigt werden. Die einzelnen erfassten Variablen können in der aufbauenden Analyse für eine Kontextualisierung mit unterschiedlichen Schadensmechanismen und morphologischen Ausprägungen herangezogen werden.

In Rückblick auf die anfangs formulierten Forschungsfragen kann festgehalten werden, dass unterschiedliche Bauweisen in ihren Auswirkungen stark differieren können und die erwünschten sowie auch unerwünschten Wirkungen im Vorhinein bei der Dimensionierung und Planung abgewogen werden müssen. Im Lebenszyklus von Buhnen wirken sich je nach Abflussgeschehen und Lage im Gewässer unterschiedliche Einflüsse wie das Alter der Bauwerke, Hochwasserereignisse und Standortfaktoren der verschiedenen Untersuchungsgebiete auf die Funktionserfüllung aus.

Dennoch wirken Buhnen auch häufig in schadhaftem Zustand. Niedrige Schadensindexwerte und eine Vielzahl an nicht auffindbaren Bauwerken lassen jedoch darauf schließen, dass die kritische Schwelle zwischen Funktionserfüllung und vollständiger Zerstörung der Buhnen eng bemessen ist. Um eine Überschreitung dieser Schwelle und somit den Verlust eines gesamten Bauwerks zu verhindern, sind regelmäßige Kontrollen und laufendes Monitoring notwendig. Dadurch kann unerwünschten Auswirkungen rechtzeitig entgegen gewirkt werden. Die generierten Ergebnisse liefern einen Hinweis darauf, welchen Standorten besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss und welche Variablen in Modellversuchen validiert werden müssen. Es muss jedoch beachtet werden, dass der Schadensindex eine sehr generalisierte Darstellungsmethode des Zustandes eines Bauwerkes ist und keineswegs ein vollständiges Abbild der Realität wiedergibt. Vor allem die Gewichtung der einzelnen Schadensmechanismen muss für zukünftige Arbeiten genauer betrachtet, validiert und gegebenenfalls angepasst werden. Für die vorliegende Thesis stellt dieser Index eine ausreichende Möglichkeit dar, alle unterschiedlichen Bauwerke mithilfe eines Wertes in ihrem Zustand zu vergleichen und zu analysieren.

In der verwendeten Form liefert der Aufnahmebogen einen Überblick über die Schäden und das Umfeld der Bauwerke. Für eine realitätsnahe Abbildung der Schäden an Wildbachbauwerken und insbesondere einzelner Materialien muss der in dieser Arbeit verwendete Aufnahmebogen zusätzlich erweitert werden. Vor allem in Bezug auf die Schadensmechanismen besteht ein Handlungsspielraum für eine detailliertere Erhebung und Analyse. Je nach Fokus der Aufnahme können weitere Detailuntersuchungen eine Rolle spielen. Zielt das Kerninteresse beispielsweise auf den Baustoff Holz ab, so wäre eine genauere chemische Untersuchung der unterschiedlichen Bauteile notwendig.

Eine Genauigkeitssteigerung könnte zusätzlich durch eine größere Stichprobe in einer größeren Anzahl von unterschiedlichen Untersuchungsgebieten herbeigeführt werden. In Bezug auf die vorherrschenden Bedingungen und Prozesse sind die betrachteten Untersuchungsgebiete relativ homogen, Aufnahmen an Wildbächen mit abweichenden Eigenschaften bezüglich Abfluss und Einzugsgebietscharakteristika können zu zusätzlichen Ergebnissen führen. Gleiches gilt für die gezielte Berücksichtigung einzelner Variablen bei der Ermittlung der Stichprobe. So sind einige Ergebnisse der Arbeit auf Basis der geringen Fallzahl nicht als repräsentativ zu bewerten. Gezielte Untersuchungen unterrepräsentierter Ausführungen (beispielsweise deklinante und inklinante Bauwerke) können zu zusätzlichen Erkenntnissen führen.

Für eine weiterführende Forschung vor allem in Bezug auf die Bauwerksgeometrie und die Lage der Bauwerke zueinander sind Modellversuche und auch unterschiedliche Strömungsanalysen zum Beispiel mittels Farb-Tracing (im Modell, aber auch vor Ort in den Untersuchungsgebieten) empfehlenswert. Dabei kann zudem erhoben werden, wie und wo die Strömung auf die Bauwerke trifft und so Aussagen darüber getroffen werden, welche Schäden durch direkten Strömungseinfluss entstehen. Ansatzpunkte und Parameter für Modellversuche können aus dieser Arbeit extrahiert werden.

Zusätzlich ist ein laufendes Monitoring zu empfehlen, das den Einfluss unterschiedlicher Abflussverhältnisse auf die Strömungsmuster untersucht. Ein Bereich dieser Untersuchung kann sich darauf konzentrieren, unter welchen Abflussbedingungen bestimmte Strömungen auftreten, die in Folge zu Schäden an den Bauwerken führen. In Bezug auf die Sedimentstruktur ist weiterführend zu untersuchen, inwieweit sich das auf die Ablagerung von Feinmaterial auswirkt und ob die Erkenntnisse dieser Arbeit (steileres Gefälle bedingt vermehrte Feinmaterialablagerung) auch in ein Modell übertragen werden können. Besonderes Augenmerk in weiterführenden Untersuchungen sollte auf Hochwasserereignishäufigkeit und –intensität, generelles Abflussgeschehen sowie dem Einfluss der Geschiebefracht des Gewässers liegen, da diese Parameter in die vorliegende Arbeit nicht integriert wurden.

Folgende Hauptaussagen können basierend auf den Ergebnissen, den Interpretationen in der Diskussion und in Hinblick auf die Forschungsfragen formuliert werden:

- Die erfassten Standortfaktoren (beispielsweise Geologie oder Gefälle) der untersuchten Gebiete haben in ihren Ausprägungen nur geringe Auswirkungen auf den Bauwerkszustand.
- In Relation zur Flussbreite größer dimensionierte Bauwerke neigen aufgrund der Einengung des Fließquerschnitts zum einen verstärkt zu Kolkbildungen, zum anderen entstehen durch die Einengung Eintiefungen des Flussbettes, die in Folge zu einer stärkeren Beanspruchung des Bauwerks und zu stärkeren Schäden führen.
- Die Verwendung von flexiblen Bauweisen (Steinbuhnen) im Gegensatz zu unflexiblen, betonierte Bautypen – minimieren die Gefahr der Unterspülung, sind jedoch stärker von Ausspülung betroffen.
- Alle untersuchten Ausprägungen von Buhnen bedingen in ihrem Nah- und Wirkungsbereich eine diverse Sedimentstruktur.
- Größere Buhnenabmessungen in Relation zur Flussbreite als auch zum Bauwerksabstand bedingen größere Verlandungsflächen. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Buhnenlänge und die Höhe der Wurzel zu nennen. Sehr breite Bauwerke hingegen verringern die Tendenz zur Verlandung des Buhnenfeldes.

Die Ergebnisse der Untersuchung unterstützen die Annahme, dass Buhnen einen breiten Handlungsspielraum für ökologischen Flussbau bieten. Sie vereinen wirksamen Uferschutz und ökologische Aufwertung an Flussläufen, die von Menschen begradigt oder eingeschränkt wurden. Flussmorphologische Vielfalt und Strukturbildung können durch den Einsatz von Buhnen forciert werden. Zudem wird klar, dass kleine Veränderungen des Designs von wasserbaulichen Strukturen große Auswirkungen auf den Zustand der Bauwerke sowie auf die Flussmorphologie haben können. Die Erkenntnisse dieser Masterarbeit können der Optimierung eines zukünftigen Flussbaumanagements in Hinblick auf Hochwasserschutz und ökologischer Vielfalt dienen.

## 8 Literatur

- AHMED, H.; HASAN, M.; TANAKA, N. (2010): Analysis of flow around impermeable groynes on one side of symmetrival compound channel: An experimental study. Water Science and Engineering 3 (1), S. 56–66.
- ALAUDDIN, M.; TSUJIMOTO, T. (2012): Optimum configuration of groyens for stabilization of alluvial rivers with fine sediments. International Journal of Sediment Research 27 (2), S. 158–167.
- AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG, ABTEILUNG OBERFLÄCHENGEWÄSSERWIRTSCHAFT (2011): Potentialstudie Salzkammergut - Ökologischer Zustand und Verbesserungsmöglichkeiten an den Zuflüssen von Mondsee und Irrsee, Linz.
- BACHER, L.; BERGHALD, U.; FORTE, M. et al. (2007a): Raumeinheit Salzkammergut-Talungen. In: Amt der Oö. Landesregierung, Abteilung für Naturschutz: Natur und Landschaft / Leitbilder für Oberösterreich. Linz
- BACHER, L.; BERGHALD, U.; FORTE, M. et al. (2007b): Raumeinheit Salzkammergut-Voralpen. In: Amt der Oö. Landesregierung, Abteilung für Naturschutz: Natur und Landschaft / Leitbilder für Oberösterreich. Linz

BITTERLICH, W. (2000): Wangauer Ache - Wildbachaufnahmeblatt, Bad Ischl.

- ВITTERLICH, W. (2006): Grünaubach Wildbachaufnahmeblatt, Bad Ischl.
- BMLFUW (2015): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung Handbuch zur Durchführung einer Bauwerkskontrolle an Vegetationselementen. Projektbericht, Wien.
- BÜNING, H.; NAEVE, P.; ROLL, S. et al. (2000): Statistik interaktiv! Deskriptive Statistik, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer.
- CONSTANTINESCU, G.; SUKHODOLOV, A.; MCCOY, A. (2009): Mass exchange in a shallow channel flow with a series of groynes - LES study and comparison with laboratory and field experiments. Environmental Fluid Mechanics 9 (6), S. 587–615.
- COPELAND, R. (1983): Bank Protection Techniques Using Spur Dikes, Washington.
- DEHGHANI, A.; AZAMATHULLA, H.; HASHEMI NAJAFI, S. et al. (2013): Local scouring around L-head groynes. Journal of Hydrology 504, S. 125–131.

- EBERSTALLER-FLEISCHANDERL, D.; EBERSTALLER, J. (2014): Flussbau und Ökologie Flussbauliche Maßnahmen zur Erreichung des gewässerökologischen Zielzustandes, Wien.
- EICK, D.; THIEL, R. (2013): Key environmental variables affecting the ichthyofaunal composition of groyne fields in the middle Elbe River, Germany. Limnologica Ecology and Management of Inland Waters 43 (4), S. 297–307.
- EISENHAUER, N. (2002): Wasserbausteinklassen nach DIN EN 13383, Karslruhe.
- EMBLETON-HAMANN, C. (2007): Exogene Morphodynamik Karstmorphologie Glazialer Formenschatz - Küstenformen, Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung.
- ERCAN, A.; YOUNIS, B. (2009): Prediction of Bank Erosion in a Reach of the Sacramento River and its Mitigation with Groynes. Water Resources Management 23 (15), S. 3121–3147.
- FLORINETH, F. (2012): Pflanzen statt Beton Sichern und gestalten mit Pflanzen, Berlin u.a.: Patzer.
- FUCHS, K.; HACKER, W.; PINTERITS, S. (2007): Raumeinheit Attersee-Mondsee-Becken. In: Amt der Oö. Landesregierung, Abteilung für Naturschutz: Natur und Landschaft / Leitbilder für Oberösterreich. Linz
- GAMERITH, H.; HOCHRATHNER-STADLER, I.; HOCHRATHNER, P. et al. (2007): Raumeinheit Almtaler und Kirchdorfer Flyschberge. In: Amt der Oö. Landesregierung, Abteilung für Naturschutz: Natur und Landschaft / Leitbilder für Oberösterreich. Linz
- GASPERL, W. (1999): Rettenbach Wildbachaufnahmeblatt, Bad Ischl.
- HATZINGER, R.; HORNIK, K.; NAGEL, H. et al. (2014): R Einführung durch angewandte Statistik, Hallbergmoos.
- HENNING, M.; HENTSCHEL, B. (2013): Sedimentation and flow patterns induced by regular and modified groynes on the River Elbe, Germany. Ecohydrology 6 (4), S. 598–610.
- HIGHAM, J.; BREVIS, W.; KEYLOCK, C. et al. (2017): Using modal decompositions to explain the sudden expansion of the mixing layer in the wake of a groyne in a shallow flow. Advances in Water Resources 107, S. 451–459.
- HÜBL, J.; HOLUB, M.; CHIARI, M. et al. (2006): Auswirkungen des Versagens der Rettenbach-Klause auf die Stadt Bad Ischl bezüglich des Abflusses und des Geschiebehaushaltes, Wien.
- HÜBL, J.; PÜRSTINGER, C. (2003): WLS Report 92 Dokumentation und Grundlagenerhebung zur Aufarbeitung der Hochwasserereignisse vom August 2002 im Bereich der WLV-Gebietsbauleitung Salzkammergut, Wien.

- JANY, A.; GEITZ, P. (2013a): Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern Teil 2. Steckbriefe aus der Praxis, Karlsruhe.
- JANY, A.; GEITZ, P. (2013b): Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern Teil 3. Arbeitsblätter für die Baustelle, Karlsruhe.
- JHA, H.; JHA, S.; KARMACHARYA, B. (2000): Flood Control Measures Best Practices Report, Kathmandu.
- KANG, J.; YEO, H.; KIM, S. et al. (2011): Permeability effects of single groin on flow characteristics. Journal of Hydraulic Research 49 (6), S. 728–735.
- KEHE, S. (1984): Streambank Protection by Use of Spur Dikes. Master Thesis, Oregon State University, Corvallis.
- KILIAN, W.; MÜLLER, F.; STARLINGER, F. (1993): Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten, Wien.
- KLINGELMANN, P.; KEHE, S.; OWUSU, Y. (1984): Streambank erosion protextion and channel scour manipulation using rockfill dikes and gabions, Corvallis.
- KLUMP, C.; BAIRD, D. (1992): Recent Criteria for Design of Groins
- LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2010): Gewässerstrukturkartierung in Baden-Württemberg - Feinverfahren, Karlsruhe.
- LANGE, G.; LECHER, K. (1993): Gewässerregelung Gewässerpflege Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern, Hamburg, Berlin: Parey.
- McCoy, A.; Constantinescu, G.; Weber, L. (2007): A numerical investigation of coherent structures and mass exchange processes in channel flow with two lateral submerged groynes. Water Resources Research 43 (5), S. 941.
- McCoy, A.; CONSTANTINESCU, G.; WEBER, L. (2008): Numerical Investigation of Flow Hydrodynamics in a Channel with a Series of Groynes. Journal of Hydraulic Engineering 134 (2), S. 157–172.
- MENDE, M. (2012): Instream River Training Naturnaher Flussbau mit minimalem Materialeinsatz. Korrespondenz Wasserwirtschaft 5 (10), S. 537–543.
- NACHTNEBEL, H. (2003): Gewässerplanung und konstruktiver Wasserbau. Studienblätter, Wien.
- NACHTNEBEL, H.; MÜLLER, B.; NEUHOLD, C. et al. (2008): Wasserwirtschaftliche Entwicklung in Überflutungsgebieten, Wien.

- NAGL, H. (1983): Klima- und Wasserbilanzen Österreichs Versuch einer regionslen Gliederung mit besonderer Berücksichtigung des außeralpinen Raumes, Wien.
- OOSTING, A.; MARIN, S.; WU, S. et al. (2015): Hydraulics of repelling groyens and their application to the bow river after the june 2013 flood, Calgary.
- OUILLON, S.; DARTUS, D. (1997): Three-Dimensional Computation of Flow around Groyne. Journal of Hydraulic Engineering 123 (11), S. 962–970.
- PATT, H.; JÜRGING, P.; KRAUS, W. (2009): Naturnaher Wasserbau Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- PAVUZA, R.; TRAINDL, H. (1984): Zur Geologie des Hochsalmgebietes. In: Oberösterreichischer Musealverein: Jahrbuch des Oö. Musealvereins. Linz, S. 267–277.
- PETSCHKO, H.; BRENNING, A.; BELL, R. et al. (2014): Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study Lower Austria. Natural Hazards and Earth System Science 14 (1), S. 95–118.
- PIERER, H. (Hrsg.) (1862): Pierer's Universal-Lexikon der Vergangenheit und Gegenwart Neuestes encyclopädisches Wörterbuch der Wissenschaften, Künste und Gewerbe, Altenburg.
- PRAMOD, B.; RAVINDRA, A. (2012): Relation between Spur Spacing and Safety Margin of Protected Bank - A Field Verification. International Journal of Advancecd Engineering Research and Studies I (IV), S. 113–117.
- PRZEDWOJSKI, B. (1995): Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes. Journal of Hydraulic Research 33 (2), S. 257–273.
- PRZEDWOJSKI, B.; BLAZEJEWSKI, R.; PILARCZYK, K. (1995): River training techniques Fundamentals, techniques and applications, Rotterdam: Balkema.
- REнвоск, T. (1926): Das Flussbaulaboratorium der Technischen Hochschule in Karlsruhe, Berlin: VDI Verlag.
- ROHR, C. (2007): Extreme Naturereignisse im Ostalpenraum Naturerfahrungen im Spätmittelalter und am Beginn der Neuzeit, Köln, Weimar, Wien: Böhlau.
- ROSSOLL, A.; ARTNER, W.; ENGLMAIER, P. et al. (1992): Schutzwasserbau Gewässerbetreuung Ökologie - Grundlagen für wasserbauliche Maßnahmen an Fliessgewässern, Wien.
- SAFARZADEH, A.; SALEHI NEYSHABOURI, S.; ZARRATI, A. (2016): Experimental Investigation on 3D Turbulent Flow around Straight and T-Shaped Groynes in a Flat Bed Channel. Journal of Hydraulic Engineering 142 (8), 0401602/1-041602/15.

SALZKAMMERGUT TOURISMUS (2016): Das Salzkammergut. http://www.salzkammergut.at/detail/article/das-salzkammergut.html (28.9.2016).

- SAVIĆ, R.; ONDRAŠEK, G.; BEZDAN, A. et al. (2013): Fluvial depositon in groyne fields of the middle course of the danube river. Tehnički vjesnik 20 (6), S. 979–983.
- SCHADLER, J. (1959): Zur Geologie der Salzkammergutseen. Österreichs Fischerei 12 (5-6), S. 36–54.
- SCHÄFER, T. (2016): Methodenlehre und Statistik Einführung in die Datenerhebung, deskriptive Statistik und Inferenzstatistik, Wiesbaden: Springer-Verlag.
- SCHIECHTL, H.; STERN, R. (2002): Naturnaher Wasserbau Anleitung für ingenieurbiologische Bauweisen, Berlin: Ernst & Sohn.
- Schutzbauwerke der Wildbachverbauung Betrieb, Überwachung, Instandhaltung und Sanierung ONR 24803 (idF. v. 01.02.2008)
- SHRESTA, A.; GC, E.; ADHIKARY, R. et al. (2012): Resource Manual on Flash Flood Risk Management -Module 3: Structural Measures, Kathmandu.
- SINDELAR, C.; MENDE, M. (2009): Lenkbuhnen zur Strukturierung und Stabilisierung von Fließgewässern. WasserWirtschaft (1-2), S. 70–75.
- SOBHAN, S.; DAS, S. (1999): Spacing of Straight Spurs in Series. Jounal of Civil Engineering CE 27 (2), S. 175–181.
- STANGL, R.; EISL, J.; HOCHBICHLER, E. (2010): Evaluierung Flächenwirtschaftlicher Projekte an den Beispielen Bannwald Brentenkogel und Hallstätter Bannwald, Wien.
- SUDA, J. (2009): Zustandsbewertung von Schutzbauwerken der Wildbachverbauung. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- SUDA, J. (2012): Instandhaltung von Schutzbauwerken gegen alpine Naturgefahren, Wien, Mühlheim a. d. Ruhr: Verlag Guthmann-Peterson.
- SUDA, J.; STRAUSS, A.; RUDOLF-MIKLAU, F. et al. (2007): Betrieb, Überwachung, Instandhaltung und Sanierung von Schutzbauwerken: Normierung nach ONR 24803. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions und Steinschlagschutz 71 (155), S. 120–136.
- SUKHODOLOV, A. (2014): Hydrodynamics of groyne fields in a straight river reach Insight from field experiments. Journal of Hydraulic Research 52 (1), S. 105–120.
- SUKHODOLOV, A.; SUKHODOLOVA, T.; KRICK, J. (2016): Effects of vegetation on turbulent flow structure in groyne fields. Journal of Hydraulic Research 55 (1), S. 1–15.

- SUKHODOLOV, A.; UIJTTEWAAL, W.; ENGELHARDT, C. (2002): On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields. Earth Surface Processes and Landforms (27), S. 289–305.
- TERAGUCHI, H.; NAKAGAWA, H.; KAWAIKE, K. et al. (2011): Effects of hydraulic structures on river morphological processes. International Journal of Sediment Research 26 (3), S. 283–303.
- TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA (2004): Guide to bridge hydraulics, London: Thomas Telford.
- UIJTTEWAAL, W. (2005): Effects of Groyne Layout on the Flow in Groyne Fields Laboratory Experiments. Journal of Hydraulic Engineering 131 (9), S. 782–791.
- UIJTTEWAAL, W.; LEHMANN, D.; VAN MAZIJK, A. (2001): Exchange Processes between a River and Its Groyne Fields Model Experiments. Journal of Hydraulic Engineering 127 (11), S. 928–936.
- VAN HUSEN, D. (1981): Geologisch-sedimetologische Aspekte im Quartär von Österreich. Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft (74/75), S. 197–230.
- WEITBRECHT, V.; SOCOLOFSKY, S.; JIRKA, G. (2008): Experiments on Mass Exchange between Groin Fields and Main Stream in Rivers. Journal of Hydraulic Engineering 134 (2), S. 173–183.
- WLV OÖ-WEST (o.A.): Rettenbach, Bad Ischl.
- WLV OÖ-WEST (1936): Wangauer Ache Kollaudierungsoperat 1936, Bad Ischl.
- WLV OÖ-WEST (1978): Weißenbach Verbauungsprojekt 1978, Bad Ischl.
- WLV OÖ-WEST (1993): Wangauer Ache Einreichung für wasserrechtliches und naturschutzrechtliches Bewilligungsverfahren 1993, Bad Ischl.
- WLV OÖ-WEST (1996): Wangauer Ache Kollaudierungsoperat 1996, Bad Ischl.
- WLV OÖ-WEST (2000): Wangauer Ache Kollaudierungsoperat 2000, Bad Ischl.
- WLV OÖ-WEST (2005): Wangauer Ache Kollaudierungsoperat 2005, Bad Ischl.
- WLV OÖ-WEST (2009): Weißenbach Kollaudierungsoperat 2009, Bad Ischl.
- YEO, H.; KANG, J.; KIM, S. (2005): An Experimental Study on Tip Velocity and Downstream Recirculation Zone of Single Groynes of Permeabilitiy Change. Jounal of Civil Engineering 9 (1), S. 29–38.
- YOSSEF, M. (2002): The Effect of Groynes on Rivers Literature Review, Delft.
- YOSSEF, M.; VRIEND, H. de (2010): Sediment Exchange between a River and Its Groyne Fields -Mobile-Bed Experiment. Journal of Hydraulic Engineering 136 (9), S. 610–625.

- YOSSEF, M.; VRIEND, H. de (2011): Flow Details near River Groynes Experimental Investigation. Journal of Hydraulic Engineering 137 (5), S. 504–516.
- ZHANG, H.; NAKAGAWA, H. (2018): Validation of indigenous knowledge for disaster resilience against river flooding and bank erosion. In: : Science and Technology in Disaster Risk Reduction in Asia: Elsevier, S. 57–76.

# 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Längsschutz, links: Blocksteinschlichtung, rechts: Buhnenfeld (Eigene Darstellung,							
2017)							
Abbildung 2: Schema einer Steinbuhne (Eigene Darstellung, 2017)6							
Abbildung 3: Einbauwinkel (Florineth, 2012)8							
Abbildung 4: Unterschiedliche Ausführungen von Buhnenköpfen (Eigene Darstellung, 2017)9							
Abbildung 5: Steinbuhne, links: 3D-Schema, rechts: Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung,							
2017)10							
Abbildung 6: Steinsporn, links: 3D-Schema, rechts: Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung, 2017)							
Abbildung 7: Betonbuhne, links: 3D-Schema, rechts: Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung,							
2017)11							
Abbildung 8: Wurfschlacht, Blickrichtung flussaufwärts, links: 3D-Schema, rechts:							
Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung, 2017)12							
Abbildung 9: Stammbuhne, Blickrichtung flussaufwärts, links: 3D-Schema, rechts:							
Konstruktionsskizze (Eigene Darstellung, 2017)12							
Abbildung 10: Verortung der unterschiedlichen Strömungszonen (Eigene Darstellung, 2017, nach							
Ouillon & Dartus, 1997)							
Abbildung 11: Strömungsmuster, dargestellt durch schwimmende Kerzen - Fließrichtung von							
links nach rechts (Rенвоск, 1926)19							
Abbildung 12: Strömungsmuster in Buhnenfeldern mit steigendem Verhältnis zwischen							
Bauwerksabstand und -länge (Copeland, 1983)20							
Abbildung 13a-c: Wirbelbildung abhängig von A <sub>a</sub> /L <sub>B</sub> (Eigene Darstellung, 2017, nach SUKHODOLOV							
et al., 2002)							
Abbildung 14a-d: Ablagerungs- und Erosionsmuster für a) nicht überspülte Buhnen, b) überspülte							
Buhnen, c) geschlitzte, nicht überspülte Buhnen und d) geknickte, überspülte Buhnen (HENNING &							
Hentschel, 2013)23							
Abbildung 15: Isotachen-Darstellung eines geraden Flussabschnittes ohne (links) und mit							
Lenkbuhne (rechts) (Sindelar & Mende, 2009)26							
Abbildung 16: Lebenszyklus ingenieurbiologischer Systeme und deren Komponenten (RAUCH et							
al., 2014)							

Abbildung 17: Übersicht der Stufen der Instandhaltung von Schutzbauwerken (Suda et al.,	2007)
Abbildung 18: Übersichtskarte der Untersuchungsgebiete (Eigene Darstellung, 2017)	33
Abbildung 19: Geologische Karte der Untersuchungsgebiete (Eigene Darstellung, 2017)	35
Abbildung 20: Klimmadiagramme nach Walter/Lieth, links: Grünau, Mitte: Bad Ischl, r	echts:
Mondsee (Eigene Darstellung, 2017)	36
Abbildung 21: Grünaubach, Blickrichtung flussabwärts	37
Abbildung 22: Schindlbach, Blickrichtung flussaufwärts	39
Abbildung 23: Rettenbach, Blickrichtung flussaufwärts	40
Abbildung 24: Wangauer Ache, Blickrichtung flussaufwärts	42
Abbildung 25: Weißenbach, Blickrichtung flussaufwärts	44
Abbildung 26: Abmessungen, links: Buhnengeometrie, rechts: Abstände im Buhnenfeld	48
Abbildung 27: Bauwerkskartierung - Beispiel: Ausschnitt Grünaubach	53
Abbildung 28: Prozess zur Gefälle-Ermittlung	54
Abbildung 29: Darstellungsbeispiel eines Boxplots	56
Abbildung 30: Positiv korrelierte, negativ korrelierte und unkorrelierte Daten (Eigene Darste	llung,
2017 nach Schäfer, 2016)	56
Abbildung 31: Bauwerksausrichtungen im Untersuchungsgebiet	62
Abbildung 32: Steinbuhne am Grünaubach	63
Abbildung 33: Steinbuhne an der Wangauer Ache	63
Abbildung 34: Steinbuhne an der Wangauer Ache mit Stahlpilotensicherung - Blickric	htung
flussaufwärts	63
Abbildung 35: Bauwerksgeometrie Steinbuhnen	64
Abbildung 36: Steinsporn an der Wangauer Ache - Blickrichtung flussabwärts	64
Abbildung 37: Steinsporn an der Wangauer Ache - Blickrichtung flussaufwärts	64
Abbildung 38: Bauwerksgeometrie Steinsporne	65
Abbildung 39: Betonbuhne am Rettenbach - Blickrichtung flussaufwärts	66
Abbildung 40: Betonbuhne am Grünaubach - Verwendung als Wasserzugang	66
Abbildung 41: Bauwerksgeometrie Betonbuhnen	66
Abbildung 42: Wurfschlacht am Grünaubach - Blickrichtung flussabwärts	67
Abbildung 43: Betonierte Wurfschlacht am Schindlbach - Blickrichtung flussabwärts	67
Abbildung 44: Wurfschlacht am Grünaubach - Blickrichtung flussaufwärts	67
Abbildung 45: Bauwerksgeometrie Wurfschlacht	68
Abbildung 46: Buhnenfeld mit Stammbuhnen - Blickrichtung flussabwärts	68
Abbildung 47: Stammbuhne - Blickrichtung flussaufwärts	68

Abbildung 48: Bauwerksgeometrie Stammbuhnen	69
Abbildung 49: Kumulierte Bauwerksanzahl nach Baujahr und Untersuchungsstandorten	71
Abbildung 50: Verteilung der Bautypen in den Untersuchungsgebieten	72
Abbildung 51: Gefälle in den einzelnen Untersuchungsgebieten	73
Abbildung 52: Gesamtschadensindex nach Untersuchungsgebiet	74
Abbildung 53: Schadenscluster am Grünaubach - Abschnitt 1 (Fließrichtung von rechts nach link	<s)< td=""></s)<>
	75
Abbildung 54: Schadenscluster am Grünaubach - Abschnitt 2 (Fließrichtung von rechts nach link	<s)< td=""></s)<>
······	75
Abbildung 55: Schadenscluster an der Wangauer Ache (Fließrichtung von oben nach unten)	76
Abbildung 56: Schadenscluster am Weißenbach (Fließrichtung von rechts nach links)	76
Abbildung 57: Schadensindex nach Gefälle	77
Abbildung 58: Kolkbildung nach Untersuchungsgebieten	78
Abbildung 59: Ausspülung nach Untersuchungsgebieten	79
Abbildung 60: Verklausung nach Untersuchungsgebieten	80
Abbildung 61: Stark verklauste Buhne am Weißenbach - Blickrichtung flussabwärts	80
Abbildung 62: Schadensindex nach Bautyp	81
Abbildung 63: Schadensindex nach Bauwerksausrichtung	82
Abbildung 64: Zusammenhang zwischen $A_a/L_B$ und Schadensindex	83
Abbildung 65: Zusammenhang zwischen FB/L <sub>B</sub> und Schadensindex	83
Abbildung 66: Zusammenhang zwischen Bauwerksalter und Schadensindex	84
Abbildung 67a-b: Zusammenhang zwischen Schadensindex und Flussbetteintiefungen	85
Abbildung 68: Schadensintensität nach Bauwerkslage im Buhnenfeld	86
Abbildung 69: Kolkbildung nach Bautypen	87
Abbildung 70: Zusammenhang zwischen Bautyp und Verortung des Kolkes	88
Abbildung 71a-b: Kolkbildung nach Bauwerksausrichtung, links: Kolktiefe, rechts: Kolkverortu	ng
	89
Abbildung 72a-c: Zusammenhang zwischen A <sub>a</sub> /L <sub>B</sub> und Kolkgeometrie	89
Abbildung 73a-c: Zusammenhang zwischen FB/L <sub>B</sub> und Kolkgeometrie	90
Abbildung 74a-c: Zusammenhang zwischen FB/HBW und Kolkgeometrie	90
Abbildung 75a-b: Kolkverortung und -häufigkeit nach a) FB/L <sub>B</sub> und b) $A_a/L_B$	91
Abbildung 76a-b: Kolkverortung und -häufigkeit nach a) A <sub>a</sub> /B <sub>B</sub> und b) FB/H <sub>BK</sub>	92
Abbildung 77: Ausspülung der Bauwerke nach Bautyp	93
Abbildung 78: Ausspülung nach Materialien	94
Abbildung 79a-b: Ausspülung der Bauwerke nach $L_B$ und $B_B$	95

Abbildung 80a-b: Ausspülung der Bauwerke nach H <sub>BW</sub> und H <sub>BK</sub> 95
Abbildung 81: Ausspülung nach Alter der Bauwerke96
Abbildung 82: Unterspülung der Bauwerke nach Bautyp97
Abbildung 83: Unterspültes Bauwerk bestehend aus einem großen Wasserbaustein an der
Wangauer Ache - Blickrichtung flussabwärts98
Abbildung 84: Sedimentstruktur im Bereich der Buhnen
Abbildung 85: Sedimentstruktur nach Lage des Bauwerks an der Fließstrecke100
Abbildung 86: Verteilung der Sedimentstrukturen nach Bautyp101
Abbildung 87: Sedimentstruktur nach H <sub>BK</sub> 101
Abbildung 88: Verteilung der Sedimentstrukturen nach Untersuchungsgebiet102
Abbildung 89: Sedimentstruktur nach Gefälle103
Abbildung 90: Verlandungsflächen nach Bautyp104
Abbildung 91a-c: Zusammenhang zwischen A <sub>V</sub> [m <sup>2</sup> ] und a) FB/L <sub>B</sub> , b) FB/H <sub>BW</sub> und c) $L_B/B_B$ 105
Abbildung 92a-c: Zusammenhang zwischen prozentuellem Anteil von $A_v$ an $A_B$ und a) $A_a/L_B$ , b)
$A_a/H_{BW}$ und c) $L_B/_{BB}$
Abbildung 93a-d: Zusammenhänge zwischen Buhnengeometrie und E <sub>M</sub> 107
Abbildung 94a-b: Zusammenhang zwischen dem Verhältnis Flussbreite/Bauwerkslänge und
Flussbetteintiefungen
Abbildung 95a-b: Zusammenhang zwischen A <sub>a</sub> und Eintiefungen des Flussbettes108
Abbildung 96a-b: Ufererosionen (Lage des Ufers relativ nach Bauwerkslage) nach $L_B$ 109
Abbildung 97a-b: Ufererosionen (Lage des Ufers relativ nach Bauwerkslage) nach FB/L $_{\rm B}$ 110
Abbildung 98: Ufererosionen desselben Ufers (relativ zur Bauwerkslage) nach
Bauwerksausrichtung111
Abbildung 99: Skizzierung des Lageeinflusses auf den Bauwerkszustand114
Abbildung 100a-c: Zusammenhang zwischen $L_B$ und Kolkgeometrie136
Abbildung 101a-c: Zusammenhang zwischen $B_B$ und Kolkgeometrie136
Abbildung 102a-c: Zusammenhang zwischen H <sub>BW</sub> und Kolkgeometrie137
Abbildung 103a-c: Zusammenhang zwischen H <sub>BK</sub> und Kolkgeometrie137
Abbildung 104a-b: Kolkverortung und -häufigkeit nach $L_B$ und $B_B$
Abbildung 105a-b: Verortung des Kolkes nach H <sub>BW</sub> und H <sub>BK</sub> 138
Abbildung 106a-b: Zusammenhang zwischen $A_v$ und a) $L_B$ und b) $B_B$
Abbildung 107a-b: Zusammenhang zwischen Ayund a) Hawund b) Hay 139

# 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Literaturvergleich nach PRZEDWOJSKI et al. (1995, S. 336)	15
Tabelle 2: Ablagerungsmuster nach Suкноdolov et al. (2002; Eigene Darstellung, 2017)	22
Tabelle 3: Historische Hochwasserereignisse am Grünaubach (HÜBL & PÜRSTINGER, 2003)	38
Tabelle 4: Historische Hochwasserereignisse am Rettenbach (WLV OÖ-WEST, o.A.)	41
Tabelle 5: Historische Hochwasserereignisse an der Wangauer Ache (WLV OÖ-WEST, 199	3; 2005)
	43
Tabelle 6: Historische Hochwasserereignisse am Weißenbach (WLV OÖ-WEST, 1978; 2009)	44
Tabelle 7: Aufnahmebogen - 1. Allgemeines	45
Tabelle 8: Aufnahmebogen - 8. Fotodokumentation	46
Tabelle 9: Aufnahmebogen - 9. Subjektive Bewertung	46
Tabelle 10: Aufnahmebogen - 10. Skizzen	46
Tabelle 11: Aufnahmebogen - 2. Flussbezogene Angaben	46
Tabelle 12: Aufnahmebogen - 3. Bauwerksbezogene Angaben	47
Tabelle 13: Aufnahmebogen - 4. Geometrie	48
Tabelle 14: Aufnahmebogen - 5. Material	49
Tabelle 15: Aufnahmebogen - 6. Schäden - Kolkbildung	49
Tabelle 16: Aufnahmebogen - 6. Schäden - Verlust des Flankenwiderstandes	50
Tabelle 17: Aufnahmebogen - 6. Schäden - Bauwerksbewegungen	50
Tabelle 18: Aufnahmebogen - 6. Schäden - Materialschäden	51
Tabelle 19: Aufnahmebogen - 7. Flussmorphologische Wirkungen	52
Tabelle 20: Interpretation des Korrelationskoeffizienten r	57
Tabelle 21: Aufschlüsselung Aufnahmeparameter Beton	57
Tabelle 22: Aufschlüsselung Aufnahmeparameter Stein	58
Tabelle 23: Gewichtungen der unterschiedlichen Schadensmechanismen der ei	nzelnen
Materialien	58
Tabelle 24: Gewichtungstabelle der einzelnen Materialien in unterschiedlichen Ma	aterials-
Kombinationen	59
Tabelle 25: Schadensintensitätsskala	60
Tabelle 26: Häufigkeiten der einzelnen Bautypen	61
Tabelle 27: Häufigkeiten der unterschiedlichen Materialkombinationen	62
Tabelle 28: Korrelationswerte von A <sub>a</sub> /L <sub>B</sub> und Kolkgeometrie	89

Tabelle 29: Korrelationswerte von FB/L $_{\rm B}$ und Kolkgeometrie	90
Tabelle 30: Korrelationswerte von FB/H $_{\scriptscriptstyle BW}$ und Kolkgeometrie	90
Tabelle 31: Korngrößenverteilung der Einteilung der Sedimentstrukturen	98
Tabelle 32: Korrelationswerte von $A_v$ und FB/L <sub>B</sub> , FB/H <sub>BW</sub> , L <sub>B</sub> /B <sub>B</sub>	.104
Tabelle 33: Korrelationswerte von Anteil von $A_V$ an $A_B$ und $A_a/L_B$ , $A_a/H_{BW}$ und $L_B/B_B$	.105
Tabelle 34: Korrelationstabelle Buhnengeometrie - Kolkgeometrie	136
Tabelle 35: Korrelationstabelle Buhnengeometrie - Verlandungsfläche	.139

# 11 Anhang

### 11.1 Aufnahmebogen

1. Allgemeines	1. Allgemeines									
Gemeinde						Bez	irk			
Aufnahmedatu	um					Flus	sname			
Wetter						Einz	ugsgebiet			
2. Flussbezogene	2. Flussbezogene Angaben									
Flussbreite FB					Flus	stiefe				
Fließgeschwine	digkei	t								
3. Bauwerksbezogene Angaben										
Kollaudierung	sopera	at			Bau	ıjahr		Hektom	eter	
🗆 Buhnenfeld		A I.		.I	Г			1		
🗌 Einzel-Buhr	ne	Anzar	il der Bauwe	гке	L	_ geger	iuber 🗆	maandr	ierena 🗆	einutrig
Lage am Fluss		🗆 linl	ksufrig		] rec	htsufrig	🗆 Pi	rallufer		Gleitufer
Ausrichtung		🗆 ink	linant		] dek	dinant	🗆 re	echtwinkli	g	
				_					0	
Koordinaten			X	·				Ň	/	
_		🗆 Ste	einbuhne	Drei	ecksb	uhne	□ Steink	kastenbuł	ne 🗆 F	lechtwerksbuhne
Bautyp		🗆 Wi	urzelstock-Bเ	uhne	Г	Sonst	iges:			
4. Geometrie		-		-		_ 001100				
Länge L <sub>R</sub>						Höhe V	Vurzel H <sub>BM</sub>	,		
Breite B <sub>B</sub>						Höhe k	Copf H <sub>BK</sub>			
Abstand A <sub>a</sub>						Zur Buh	ne flussabw	värts		
Abstand A <sub>b</sub>			Zur Buhne flussaufwärts							
Abstand A <sub>c</sub>				Mäandrierend: zur gegenüberliegenden Buhne flussaufwärts						
Abstand A <sub>d</sub>						Mäandr	ierend: zur	gegenüber	liegenden Bu	uhne flussabwärts
5. Material									-	
Stein [	∃ Sch	otter/	′Kies 🗆 H	olz [	🗆 Ma	uerwer	< Pflan	zenarten		
🗆 Beton 🛛	∃ Stal	hl	□ P	flanzen						
6. Schäden										
Kolkbildung					_					
kein	🗌 fla	ch			□m	nittel			🗆 tief	
_	untere	e Einbi	ndung intakt		gerin	ge unter	e Einbindun	g	freiliegende	e Unterkante
Verortung	W	urzel	🗆 Mitte	🗆 Ко	pf	🗌 Unt	erspülung	□ flus	ssaufwärts	🗌 flussabwärts
Kolktiefe T <sub>K</sub>			K	olkbreite	e Β <sub>κ</sub>			Kolkl	änge L <sub>K</sub>	
Verlust des Flank	enwide	erstand	les					•		•
🗆 kein 🛛	Mech	anism	ius 1 Tiefener	osion, Ko	lkaust	breitung	🗆 Mec	hanismu	s 2 Seitenero	sion, Flankenabtrag
🗆 Mechanism	us 3 C	Dberflä	chenerosion,	Flankena	btrag	durch Ob	perflächenw	asser	☐ Vollständ	ige Umgehung
Bauwerksbewegu	ungen				0					<u> </u>
🗆 Kippen	<u> </u>		Zur Flussmitt	e		Gege	en Fließrich	ntung	🗆 In Flie	ßrichtung
$\square$ Bruch $\square$ V				Mitte			0			
		(ein		Geri	ng	 ησ Π Μi++		 Stark		
Verklausung 🗆 k		(ein		Geri	ng 🗆 Mi		Mittel	littel 🗌 Stark		
Materialschäden						<del>о</del>				
Material	Schar	dmec	hanismus		k	ein	gering	mittel	stark	Anmerkung
Material	Frosi	on/Ah	prasion							
Roton	Platte	anförr	nigo Ahnlatz	ungen						
Belon	Vonu	ittoru		ungen						
	verw	iller u	чб							

	Frost	sprengung/Risse	2						
	Bewu	ichs							
	Erosi	on/Abrasion							
	Verw	itterung/Vermor	schung						
	Verfo	rmung	-						
Holz	Pilzbe	ewuchs							
	Insek	ten							
	Nage	r							
	Bewu	ichs							
	Erosi	on/Abrasion							
	Verw	itterung							
Stein	Verfo	ormung							
	Risse								
	Bewu	ichs				□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □			
	Korro	osion							
Stahl	Verfo	ormung/Bruch							
	Vera	nkerungsschäde	n						
	Erosi	on/Abrasion							
	Verw	itterung							
Mauenwerk	Verfo	ormung							
Wauerwerk	Risse								
	Durc	hfeuchtung/-strö	mung						
	Bewu	ichs							
7. Flussmorphol	logische	Wirkungen							
Sedimentstru	ıktur	□ < 0,063 mm	□ 0,0	)63 – 2 mn	n	0,2 – 2 0	:m 🗆	] 2- 6,3 (	cm
		□ 6,3 – 20 cm	20	– 40 cm		<u> </u>			
Ufererosion		Rechtes Ufer		🗌 geri	ng		L	stark	
		Linkes Uler			ng			] stark	in cm
Fintiofungon		Flussmitte					L		in cm
Linderungen		Links			<u>ו</u> ר			] tief	in cm
Verlandung					•				
Verlandungss	stelle	🗆 Flussaufwär	ts		🗆 Flussal	bwärts			
Länge L <sub>V</sub> Breite		Breite B <sub>v</sub>			Fläche	e A <sub>v</sub>			
8. Fotodokumentation									
Fotonummern Von			Bis	5					
1. in Fließrichtung2. gegen Flie			ßrichtung		3. von	oben			
9. Subjektive Bewertung						• 11			
Gesamtzusta	nd			Fun	ktionserfü	ullung			
Bemerkung									
10. Skizzen									

- Querschnitt mit Bauwerken und Flusstiefen

- Grundriss der größeren Umgebung (flussauf-, flussabwärts und gegenüberliegende Buhnen)

#### 11.2 Korrelationstabellen und Diagramme

# 11.2.1 Zusammenhang zwischen Buhnengeometrie und Kolkgeometrie, -verortung und -häufigkeit

		L <sub>B</sub>	B <sub>B</sub>	H <sub>BW</sub>	Н <sub>вк</sub>
	Korrelation nach Pearson	.382**	.339**	.289**	.311**
Τĸ	Signifikanz (2- seitig)	.000	.002	.008	.005
	Ν	82	82	82	82
B <sub>K</sub>	Korrelation nach Pearson	.510**	.401**	.340**	.,229*
	Signifikanz (2- seitig)	.000	.000	.002	.039
	Ν	82	82	82	82
	Korrelation nach Pearson	.517**	.491**	.440**	.384**
Lĸ	Signifikanz (2- seitig)	.000	.000	.000	.000
	Ν	82	82	82	82

\*\*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 34: Korrelationstabelle Buhnengeometrie - Kolkgeometrie












Abbildung 103a-c: Zusammenhang zwischen H<sub>BK</sub> und Kolkgeometrie

a) Kolkverortung- und häufigkeit nach  $L_{\!\scriptscriptstyle B}$ 





Abbildung 104a-b: Kolkverortung und -häufigkeit nach  $L_{B}$  und  $B_{B}$ 



b) Kolkverortung und -häufigkeit nach  ${\rm H}_{\rm BK}$ 

Abbildung 105a-b: Verortung des Kolkes nach  $H_{BW}$  und  $H_{BK}$ 

## 11.2.2 Zusammenhang zwischen Buhnengeometrie und Verlandungsfläche

		L <sub>B</sub>	B <sub>B</sub>	Н <sub>вw</sub>	Н <sub>вк</sub>
Av	Korrelation nach Pearson	.528**	.080	.444**	.145
	Signifikanz (2- seitig)	.000	.494	.000	.214
	Ν	75	75	75	75
**. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.					

Tabelle 35: Korrelationstabelle Buhnengeometrie - Verlandungsfläche



Abbildung 106a-b: Zusammenhang zwischen  $A_V$  und a)  $L_B$  und b)  $B_B$ 





## Ehrenwörtliche Erklärung

"Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt wurde. Alle direkten und indirekten Quellen wurden als solche gekennzeichnet. Zudem wurde diese Arbeit noch keiner anderen Prüferin, keinem anderen Prüfer vorgelegt oder publiziert."

Datum, Ort

Unterschrift