



**Ludwig-Franzius-Institute**  
for Hydraulic, Estuarine and  
Coastal Engineering



Leibniz  
Universität  
Hannover

A. Hildebrandt<sup>1</sup>

J. Landmann<sup>1</sup>

E. Hacker<sup>2</sup>

H. Günter<sup>3</sup>

# BioSchWelle

## Erprobung der Wellendämpfung durch „lebende Inseln“ zur Erhöhung der Artenvielfalt in Gewässern

Januar 2020

Endbericht



DBU-Projekt-Az.:33496/01

Projektlaufzeit:05.04.2017 – 04.10.2019

Projektpartner:1 Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover

2 Institut für Umweltpolitik, Leibniz Universität Hannover

3 Fakultät Landbau/Umwelt/Chemie (LUC), Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden



# Projektkennblatt

der

## Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	<b>33496/01</b>	Referat	Fördersumme	<b>124.990€</b>
----	-----------------	---------	-------------	-----------------

<b>Antragstitel</b>	<b>BioSchWelle – Erprobung der Wellendämpfung durch „lebende Inseln“ zur Erhöhung der Artenvielfalt in Gewässern</b>
---------------------	--

<b>Stichworte</b>	Lebende Inseln, ökologische Durchgangbarkeit, Welleninteraktion, Natur- und Modellversuche
-------------------	--

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>24 Monate</b>	<b>05.04.2017</b>	<b>04.10.2019</b>	-

Zwischenberichte	1 (05/2018)
------------------	-------------

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Arndt Hildebrandt	Tel +495117622582
	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität	Fax +495117624002
	Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen	<b>Projektleitung</b> Arndt Hildebrandt
	Nienburger Straße 4, 30167 Hannover	<b>Bearbeiter</b> Jannis Landmann

<b>Kooperationspartner</b>	Institut für Umweltplanung (IUP) Herrenhäuser Str. 2 30419 Hannover Plan T – Planungsgruppe Landschaft und Umwelt Radebeul (GIS Analyse von Standorten) Wichernstraße 1b, 01445 Radebeul Giessereitechnik Kühn (Lieferung der Gabione) Buscheritz 1, 02633 Göda
----------------------------	--

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Im Rahmen des Forschungsprojektes „BioSchWelle“ wird die Wellendämpfung durch Schilfgabione erprobt und zusätzlich der Beitrag der Inseln zur Erhöhung der Artenvielfalt in Gewässern bestimmt. Schwimmende Vegetationsstrukturen bieten in dem Zusammenhang großes Potential für technisch-biologische Lösungen auf Grund z.B. der Schutzwirkung an Uferböschungen, an denen sich mehr Vegetation ausbilden kann. Ferner bieten sie „Trittsteine“ für Pflanzen und Tiere zur Erhöhung der ökologischen Durchgängigkeit an Wasserstraßen.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Methodisch wird die Wirkung der lebenden Insel anhand von Feldversuchen im Mittellandkanal und mittels Modellversuchen im Großen Wellenkanal des Forschungszentrums Küste untersucht und bewertet. Hierfür wird die Technik zur Initiierung von selbstschwimmenden Vegetationsbeständen u.a. produktionstechnisch (Materialien und mögliche Serienfertigung) und insbesondere für die Gebrauchstauglichkeit optimiert. Bei der Herstellung und Initiierung der Vegetationsstrukturen kommen hauptsächlich organische und verrottbare Materialien in Kombination mit lebenden heimischen Pflanzarten zum Einsatz. Auf diese Weise können sie als lange Linienelemente auf großen Streckenabschnitten in Kanälen und erheblich veränderten Gewässern eingesetzt werden. Im ersten Projektjahr wurden die Gabione produziert, bepflanzt und in einem Gewächshaus im Wasserbecken mit Umwälzung durch Pumpen gehalten, um eine möglichst lange Vegetationsperiode zu erzielen. Weiterhin wurden im ersten Projektjahr am Mittellandkanal Schiffspassagen erfasst und die Wellensysteme gemessen und analysiert, um die Generierung von Modellrandbedingungen im Großen Wellenkanal realitätsnah durchzuführen. Im zweiten Projektjahr wurden die Modelltests im Großen Wellenkanal durchgeführt. Dabei wurden akustische sowie kapazitative Wellenpegel, Motion-Tracking-Equipment, Inertiale Messeinheiten (engl. Inertial Measurement Unit) sowie Kameras eingesetzt. Durch die Tests konnte das Potential zur Wellendämpfung durch die lebenden Inseln quantifiziert werden.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Zu Beginn des ersten Projektjahr wurden die einzelnen Gabionen erfolgreich mit Bewuchs versehen. Der Aufwuchs der Schilfgabione im selben Jahr war ein projektkritisches Element, da trotz schneller Produktion der Gabionskörbe mit dem Start der Projektlaufzeit die verbleibende Vegetationsperiode 2017 in der freien Natur nur noch sehr kurz war. Nach abwägen diverser Optionen konnte die Variante mit einem künstlichen Wasserbecken im Gewächshaus als wertvolle Maßnahme zur Verlängerung der Vegetationsperiode durchgeführt werden. Durch den Einsatz des Gewächshauses konnte die Vegetationsperiode entscheidend verlängert werden, wodurch die Gabionen ab Juni 2018 bereit für die Versuche im MLK und im GWK waren. Ein erstes Ergebnis des Projektes ist, dass das Anwachsen der Gabionen ein bis zwei Vegetationsperioden erfordert. Im zweiten Projektjahr konnten die Versuche erfolgreich durchgeführt werden und die wellendämpfende Wirkung der schwimmenden Inseln nachgewiesen werden. Genauer konnte nachgewiesen werden, dass schwimmende Inseln mit einer Breite von drei bis vier Metern eine wellendämpfende Wirkung bei Wellen mit Perioden kleiner 2,25 Sekunden aufweisen. Die dafür verantwortlichen Prozesse wie Reflektion und Transmission sind genauer untersucht worden. Außerdem konnte durch eine Bewegungsanalyse der einzelnen Gabione ein Zusammenhang zwischen Bewegung und wellendämpfendem Verhalten erkannt werden. Es ist festzuhalten, dass eine dauerhafte Schwimmstabilität unter Schiffswellen mit der momentanen Ausführung nicht zu garantieren ist. Dennoch haben die involvierten Institute, bestehend aus dem „Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen“, dem „Institut für Umweltplanung“ der Leibniz Universität Hannover und der „Fakultät Landbau/Umwelt/Chemie“ der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, großes Interesse daran, die „schwimmenden Inseln“ weiterzuentwickeln. Der nächste Entwicklungsschritt soll darauf abzielen eine dauerhafte Auftriebsleistung zu gewährleisten. Dazu soll bestimmt werden wieviel Gas unter welcher Welle aus den Gabionen verdrängt wird. Die Gabione sollten dazu mit gezielt belüftbaren Kammern ausgestattet werden, wo unter Welleneinfluss das Gasvolumen bestimmt wird. Diese indirekte Messung des Luft- und Gasgehaltes kann auch verwendet werden, um z.B. eine direkte Messung bzw. ein zu entwickelndes Messgerät zu prüfen. Der Versuchsaufbau sieht vor, dass die Gabione nach unten abgespannt werden und mit Kraftmessern ausgestattet sind. So kann nach jeder Welle die Differenz des Auftriebs gegenüber dem Ausgangszustand gemessen werden und damit das ausgetriebene Gas bestimmt werden. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend soll eine technische Lösung entwickelt werden, damit das für den Auftrieb relevante Gas auch unter Welleneinfluss gebunden bleibt.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Teilerkenntnisse aus dem Projekt wurden im Laufe der Projektlaufzeit auf internationalen Fachkonferenzen vorgestellt:

- Günther, H.; Potentials and application of floating blue-green infrastructures for rainwater management in urban areas. X Conference AEIP-APENA-EFIB-ECOMED Soil and Water Bioengineering, 21.-23. Madrid 2018
- Günther, H.; Living islands – initiation of natural floating wetlands for lake shore development. SWS annual meeting. 29.05-01-06.2018 Denver Colorado.

Darüber hinaus sind nach Abschluss der Forschungsprojektes Veröffentlichungen bezüglich der Versuchs- und Analysemethoden im „Ecological Engineering - The Journal of Ecosystem Restoration“ (Elsevier) geplant. Außerdem sollen die Ergebnisse der Modellversuche, bei Zusage, auf der Woche der Umwelt 2020 im Park vom Schloss Bellevue vorgestellt werden.

## **Fazit**

Nach zwei Vegetationsperioden wurden Naturmessungen im Mittellandkanal und Modelltests im Großen Wellenkanal, einem hydraulischen Labor, durchgeführt. Die Haupteckdaten aus diesen Tests sowie den Vegetationsperioden sind, dass das Anwachsen der Gabionen ein bis zwei Vegetationsperioden erfordert und eine dauerhafte Schwimmstabilität unter Schiffswellen mit der momentanen Ausführung nicht zu garantieren ist. Dies liegt an dem erhöhten Gasaustrag unter hoher Wellenlast. Dennoch lässt sich feststellen, dass die schwimmenden Inseln mit einer Breite von 3 – 4 m eine deutliche wellendämpfende Wirkung bei Wellen mit Perioden  $T \leq 2,25$  s aufweisen.

# INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	II
TABELLENVERZEICHNIS.....	V
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	VI
1 ZUSAMMENFASSUNG.....	3
2 ANLASS UND ZIELSETZUNG .....	4
3 WISSENSCHAFTLICHER HINTERGRUND.....	6
3.1 Schwimmende Vegetationsgesellschaften.....	6
3.1 Schiffsinduzierte Wellen und Wellendämpfung.....	9
4 AUFBAU UND WACHSTUM DER GABIONEN.....	12
4.1 Aufbau der Gabionen.....	12
4.2 Anwachsen der Gabionen.....	14
5 VERSUCHE IM MITTELLANDKANAL .....	18
5.1 Versuchsaufbau.....	19
5.2 Methodik zur Bildbearbeitung .....	20
5.3 Messwertaufbereitung .....	22
5.4 Ergebnisse.....	25
6 VERSUCHE IM GROBEN WELLENKANAL .....	28
6.1 Versuchsaufbau.....	28
6.2 Auswertemethodik .....	34
6.2.1 Reflektion .....	34
6.2.2 Transmission .....	36
6.2.3 Positionsstabilität der Gabionen .....	38
6.3 Ergebnisse.....	39
6.3.1 Transmission .....	39
6.3.2 Reflektion .....	42
6.3.3 Dissipation.....	44
6.3.4 Positionsstabilität der Gabionen .....	45
7 DISKUSSION .....	48
8 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT.....	51
9 FAZIT UND AUSBLICK.....	52
LITERATURVERZEICHNIS.....	54

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anordnung schwimmender Vegetationselemente als Linienelement und vereinzelt als ökologische Stützstellen an einem Kanalufer zwecks Wellenschutz und als Trittssteinelement zur Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit .....	5
Abbildung 2: schwimmende Verlandungsabfolge mesotropher und oligotropher Gewässer (links) und eutropher Gewässer (rechts) (Günther, 2013).....	6
Abbildung 3: Progressive Sukzession an einem Stillgewässer mit einem Schwingmoor. Frei im Wasser schwimmende Gesellschaften ermöglichen eine horizontale Ausdehnung auf den See. Mit dem Schwingmoor wächst ein schwimmender Torfkörper heran. Aus der schwimmenden Matte sedimentiert organische Substanz (Sinktorf), aus der sich auf dem Gewässergrund eine Muddenschicht entwickelt (Günther 2013 nach Kratz & DeWitt 1986, verändert).....	8
Abbildung 4: Auftrieb einer ca. 50–60 cm starken schwimmenden Typhamatte in kg m <sup>2</sup> (Günther, 2013). .....	9
Abbildung 5: Der gemessene Wasserspiegel über die Zeit an einem festen Ortspunkt für zwei unterschiedliche Fahrtzustände stellt das Wellensystem des vorbeifahrenden Schiffes dar (BAW, 2010) .....	10
Abbildung 6: Die Quer- und Schrägwellen lösen sich in einem Winkel $\alpha_K$ von etwa 19.47 Grad vom Schiff ab. Durch eine Überlagerung beider Wellen am Bug und Heck ergibt sich jeweils eine Interferenzlinie (BAW, 2010).....	11
Abbildung 7: Funktions- und Wirkungsschema „Lebender Inseln“ (Günther, 2014) (links) sowie bepflanzte Gabionenkörper nach circa einem halben Jahr Wachstum (rechts). .....	12
Abbildung 8: Schilfgabionen nach der vollständigen Wassersättigung.....	13
Abbildung 9: Entwicklung des Auftriebs der bepflanzten Schilfrohrgabione. Im Ausgangszustand besitzen die Halme der Gabione einen hohen Auftrieb und der Körper taucht nur zu einem geringen Teil in das Wasser ein (links). Wenn die Halme Wasser aufnehmen, verlieren sie ihren Auftrieb und das gesamte Gabionenvolumen sinkt nach ca. 2 Vegetationsperioden in das Wasser. Der Auftrieb wird dann sowohl von den lebenden Pflanzenteilen als auch durch das sich entwickelnde Sumpfgas geleistet (Mitte). Natürliche Schwinggrasen erhalten ihren Auftrieb ausschließlich durch das Sumpfgas, während die lebenden Pflanzenteile nur noch eine untergeordnete Rolle spielen (rechts).....	14
Abbildung 10: Bepflanzte Schilfgabione im trockenen Zustand.....	15
Abbildung 11: Gewichtsverlust der Gabionen (15cm und 25cm varianten) nach dem Herausheben aus dem Wasser.....	16
Abbildung 12: Schilfgabionen im eingelagerten, voll-bewachsenem Zustand im August 2019.....	17
Abbildung 13: Übersichtskarte sowie Satellitenbild des Gabione-Standortes und Aufnahmen der Wendestelle .....	18
Abbildung 14: „Lebende Insel“ bestehend aus mehreren, verbundenen Gabionen während des Einbaus im Mittellandkanal.....	19

Abbildung 15: Messstelle 1 & 2 mit und ohne vorgelagerten Gabionen im Wendebecken bei Kanalkilometer 155 (links) und einzelne Messstelle mit Aluminiumprofil mit Messlatte und Kamerasystem .....	20
Abbildung 16: Extrahiertes RGB-Bild aus Original-Video (a), Graustufenbild (b) und Extended-Maxima-Transformation in ein Schwarz-Weiß-Bild der extrahierten Pegellatte unter Welleneinfluss (c). Nullpegelbestimmung über Pixelinformationen (d) mit roter Linie markiert (d).....	21
Abbildung 17: Die Darstellung der drei unterschiedlichen Frequenzbereiche stellt die unterschiedliche Wellentypen und ihre Überlagerung dar. Die Sekundärwellen werden durch den Bug (1) und das Heck (2) aufgezeichnet. Zusätzliche treten Wellengruppen mit größerer Frequenz auf. Ihre Generierung kann nicht eindeutig erklärt werden.....	23
Abbildung 18: Die Primärwelle wird durch einen Low-Butter Filter 1.Ordnung und einem Zero-Phase Filter dargestellt.....	24
Abbildung 19: Die Heckwellenhöhe wird nach (BAW, 2010) ermittelt. Die Überlagerung von Primär- und Sekundärwelle wurde dabei wie die Primärwelle herausgefiltert.....	25
Abbildung 20: Sekundärwellen einer Motorschiffes über die Zeit (fps) welche die wellendämpfende Wirkung der schwimmenden Inseln andeuten.....	26
Abbildung 21: Darstellung des Großen Wellenkanals in Draufsicht und in Seitenansicht mit der Wellenmaschine auf der linken Seite (1) und dem dissipativen Strand auf der rechten Seite (3).....	28
Abbildung 22: Maßstäbliche Draufsicht des Versuchsaufbaus mit Gewichtsankern (Grün), Bojen (Blau), Vertäuungsleinen (Gelb) und Expanderseil (rot).....	29
Abbildung 23: Gabione mit XPS-Platte (links) und Detailansicht der mit Kontermuttern und Gewindestab gesicherten XPS-Platte (rechts). Die bis zur Oberfläche vorstehenden Gewindestangen dienen zur Montage von passiven Markierungen für das Motion-Tracking-System.....	29
Abbildung 24: Reiterbojen die mit flexiblen Expanderseilen (gelb) mit der „schwimmenden Inseln“ verbunden sind sowie Halteseile (orange) (links); Ansicht eines Schwergewichtfundamentes mit Ankerseil aus Stahl und Kettengliedern bis zur Reiterboje (rechts).....	30
Abbildung 25: Messsensorik mit sieben Ultraschallsensoren, vier Motion Tracking Kameras (MTCs), zwei Inertiale Messsensoren (IMUs), zwei Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) und zwei Kameras installiert.....	30
Abbildung 26: Gruppe von vier kapazitative Wellenpegeln am Rand des GWK (links); Vier Ultraschallsensoren an Aluminiumprofilen vor dem Versuchsaufbau (rechts).....	32
Abbildung 27: Kalibriertes Volumen der Motion-Tracking Kameras (links) mit einzelnen Gabionen (bunt); Dargestellte Kamerawinkel um kalibriertes Volumen (rechts).....	32
Abbildung 28: Versuchsaufbau in einer perspektivischen Ansicht mit Teil des Motion-Tracking Kamerasystem oben-links im Bild und blauen Fenderbojen sichtbar im Wasser.....	33
Abbildung 29: Übersicht über die Messgeräte sowie die angeschlossenen Messcomputer (links); Übersicht über das Auslösen („Triggern“) der einzelnen Systeme.....	34

Abbildung 30: Darstellung einer beispielhaften Zeitreihe einer Ultraschallsonde. Vergleich zwischen den Rohdaten und um das Offset bereinigten und gefilterten Daten. ....	35
Abbildung 31: Darstellung der Analyse bezüglich der relevanten Wellenereignisse. Nur Wellen ohne Reflexionsbeeinflussung werden genutzt.....	36
Abbildung 32: Initiale und transmittierte Wellen über die Zeit dargestellt .....	37
Abbildung 33: Einzelner Frame einer 300 s langen Messung mit roten, unidentifizierten Markern und Störsignalen (links) und identifizierte grüne Marker neben den Störsignalen (rechts). ....	38
Abbildung 34: Aus Trajektorien erzeugten starren Körper (bunt) sowie weiterhin vorhandene Störsignale (rot);.....	39
Abbildung 35: Darstellung des Transmissionskoeffizienten <b>CT</b> für Formation 1 und 2.....	40
Abbildung 36: Zusammengesetzte Darstellung aller Mediane und des interquartilen Abstandes bezüglich des Transmissionskoeffizienten über die Wellenzahl k. ....	41
Abbildung 37: Extrapolierte (oben) und parametrisierte (unten) Darstellung des Transmissionskoeffizienten über die Wellenzahl k in Abhängigkeit der Wellenhöhe H und Eintauchtiefe d. ....	42
Abbildung 38: Reflektionskoeffizienten <b>CR</b> der Gabionen über die Wellenzahl k dargestellt. ....	43
Abbildung 39: Extrapolierte Daten des Reflektionskoeffizienten <b>CR</b> bezüglich Wellenhöhe H und Eintauchtiefe über die Wellenzahl k dargestellt (oben); gleichen Daten nach Parametrisierung über lineare Koeffizienten (unten). ....	44
Abbildung 40: Überlagerte Darstellung des Transmissions- und Reflektionskoeffizienten (links) neben dem berechneten Dissipationskoeffizienten (rechts) .....	45
Abbildung 41: Bewegung der vorderen (grün), mittleren (gelb) und hinteren (blau) Gabione in x- und z- Richtung unter einer Welle mit einer Periode von 1,5 s. ....	46
Abbildung 42: Bewegung der vorderen (dunkelgrau), mittleren (dunkel) und hinteren (hellgrau) Gabione in x- und z- Richtung unter einer Welle mit einer Periode von 4,0 s.....	46
Abbildung 43: Bewegungsverhalten einer einzelnen Gabione unter verschiedenen Wellenperioden zwischen 1,5 s und 8,0 s.....	47
Abbildung 44: In Folge von zu hohem und zu häufigem Wellengang gesunkener Gabionenkörper im Mittellandkanal.....	49
Abbildung 45: Bewachsene, schwimmende Inseln im Großen Wellenkanal bei minimalem Wasserstand mit sichtbaren Verankerungsblöcken und Reiterbojen.....	50
Abbildung 46: Gabionen nach der dritten Vegetationsphase und nach den Tests im Mittellandkanal und Großen Wellenkanal im September 2019.....	53

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die maximale Wellenhöhen und –perioden für das primäre und sekundäre Wellensystem von Motorschiffen im beladenen und unbeladenen Zustand sowie von Sportbooten.....	26
---	----



## Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Dimension
$\frac{H}{d}$	Dimensionslose Wellenhöhe	[-]
$\frac{W}{L}$	Relative Länge	[-]
$\frac{d}{h}$	Relative Tiefe	[-]
$a$	Wellenamplitude	[m]
ADV	Acoustic Doppler Velocimeter	[-]
AIS	Automatic Identification System	[-]
B	Blau	[Pixel]
$C_{Diss}$	Dissipationskoeffizient	[-]
$C_R$	Reflektionskoeffizient	[-]
$C_T$	Transmissionskoeffizient	[-]
$d$	Tauchtiefe	[m]
$D$	Flachwassertiefe	[m]
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	[-]
$D_G$	Schwerpunkt der schwimmenden Struktur	[m]
$d_g$	Äquivalente Länge im globalen KOS	[Pixel]
$d_i$	Strecke auf der Pegellatte im skalierten KOS	[cm]
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	[-]
EU-WRRL	Europäische-Wasserrahmenrichtlinie	[-]
$f$	Wellenfrequenz	[1/s]
$f(t)$	Finite Sequenz	[-]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
G	Grün	[Pixel]
$G$	Höhe vom Wasserspiegel zum gleichen Bildrand	[cm]
$\gamma$	Spezifisches Gewicht	[ kg/m <sup>2</sup> *s <sup>2</sup> ]
$G_o$	Höhe zum Bildrand	[cm]
GWK	Großer Wellenkanal - Forschungszentrum Küste, Hannover	[-]
$H$	Wellenhöhe	[m]
$h$	Wassertiefe	[m]
$H$	Wasserspiegelhöhe	[cm]
$H_o$	Gesamthöhe von $P_0$ bis $P_1$	[cm]
$H_i$	Initiale Wellenhöhe	[m]
$H_s$	Charakteristische Wellenhöhe	[m]
$H_t$	Transmittierte Wellenhöhe	[m]



$I$	Zweites Trägheitsmoment	[kg*m <sup>2</sup> ]
$IMU$	Inertialer Messsensor	[-]
$k$	Wellenzahl	[1/m]
$k_m$	Steifigkeit des Ankersystems	[N*mm <sup>2</sup> ]
$KOS$	Koordinatensystem	[cm],[Pixel]
$M$	Masse der schwimmenden Struktur	[kg]
$MLK$	Mittellandkanal	[-]
$MTC$	Motion-Tracking Kamera	[-]
$P_o$	Pegellattennullpunkt	[cm]
$P_1$	Gemeinsamer Punkt zweier KOS	[cm]
$p_1, p_2, p_3, p_4$	Anpassungskoeffizienten	[-]
$R$	Rot	[Pixel]
$T$	Wellenperiode	[s]
$XPS$	Extrudierter Polystyrol-Hartschaum	[-]
$Y$	Luminanz	[cd/m <sup>2</sup> ]
$\Delta h$	Referenzhöhe	[cm]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$a_i$	Signalvarianz der initialen Oberflächenauslenkung.	[-]
$a_r$	Signalvarianz der reflektierten Oberflächenauslenkung	[-]
$c_w$	Wellengeschwindigkeit	[m/s]
$v_{krit}$	Kritische Wellengeschwindigkeit	[m/s]
$v_s$	Schiffsgeschwindigkeit	[m/s]
$\alpha_K$	Kelvin-Winkel	[°]
$\varepsilon$	Umrechnungsfaktor	[-]



## 1 Zusammenfassung

Folgender Endbericht fasst die Arbeiten die im Rahmen des DBU-Projektes „33496/01 – BioSchWelle – Erprobung der Wellendämpfung durch „lebende Inseln“ zur Erhöhung der Artenvielfalt in Gewässern“ erfolgt sind zusammen. Kernziel war die Untersuchung von schwimmenden Vegetationsstrukturen bestehend aus 1 m x 1 m großen Schilfgabionen. Diese bieten großes Potential für technisch-biologische Lösungen zur Überbrückung von zuvor ökologisch undurchlässigen Gewässerabschnitten und zur Dämpfung von auf die Ufer einwirkenden Wellen.

Im Bericht wird kurz die Wirkungsweise der Schilfgabionen, bzw. die allgemeine Wirkungsweise von schwimmenden Vegetationsgesellschaften, dargestellt. In diesem Zusammenhang wird die Produktion und Bepflanzung der Gabionen mit Schilfrohr, der Transport zu einem winterfesten Lager mit Nasseinlagerung, sowie das Verhalten über mehrere Wachstumsperioden hinweg beschrieben.

Der Hauptteil des Berichts fokussiert sich auf die wellendämpfende Wirkung der Gabionen. Deswegen werden Schiffswellen, deren Ausbreitung und Verhalten als Einwirkung auf die Gabionen erläutert. Durchgeführte Versuche zur Bestimmung der Schiffswelleneinwirkung am Mittellandkanal werden beschrieben, die die Randbedingungen für die anschließenden Laborversuche definieren. Dabei wird das eingesetzte Verfahren zur kontaktlosen Messung der Höhe von Schiffswellen kurz dargestellt. Versuche im Großen Wellenkanal des Forschungszentrums Küste werden beschrieben und die verschiedenen Auswertemethoden zur Ermittlung der Transmission, Reflektion und Dissipation durch die Gabionen vorgestellt. Ausgehend von diesen Versuchen werden die Ergebnisse, hinsichtlich der wellendämpfenden Wirkung dargestellt. Dabei werden Vergleiche zu weiteren schwimmenden Wellenbrechen gezogen. Als im Projektverlauf erarbeitete Ergebnisse kann festgehalten werden:

- Versuche im Mittellandkanal unter Realbedingungen hinsichtlich der zu erwartenden Einwirkungen durch Schiffswellen und dem Verhalten von durchwachsenen Schilfgabionen wurden durchgeführt. Dabei konnten maßgebliche Wellenhöhen von 60,0 cm aufgezeichnet werden. Darüber hinaus konnte das grundlegende Funktionsprinzip der Gabionen unter Realbedingungen nachgewiesen werden.
- Umfassende Versuche unter Laborbedingungen wurden im Großen Wellenkanal hinsichtlich Bewegungsverhalten und wellendämpfender Wirkung von durchwachsenen Schilfgabionen durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei Wellen mit einer Periode unter 2,5 s eine signifikante Reduzierung der Wellenhöhe erzielt wurde, d.h. bei kurzen Wellen ist eine wellendämpfende Wirkung der „lebenden Inseln“ nachgewiesen

Auf Grundlage dieser Ergebnisse erfolgt eine Diskussion des Gesamtprojektes hinsichtlich der Einsatzpotentiale der Gabionen sowie möglicher limitierender Faktoren.



## 2 Anlass und Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „BioSchWelle“, welches durch die „Deutsche Bundesstiftung Umwelt“ gefördert wurde, konnte die Wellendämpfung durch die Schilfgabione erprobt und zusätzlich der Beitrag der Inseln zur Erhöhung der Artenvielfalt in Gewässern bestimmt werden. Standortgerechte und leitbildkonforme Vegetationsstrukturen an Gewässern sind für die Zielerreichung der Umweltqualitätsziele der EU-WRRL sowohl für die biologischen Komponenten als Nahrungs- und Habitatstruktur als auch für chemisch-physikalische Wasserqualitätsparameter von hoher Bedeutung (Hering, 2015). Das erschienene DWA Merkblatt „Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Binnengewässern“ behandelt dazu ökologische Aufwertungen bei gleichzeitiger Gewährleistung der Uferstabilität. Dieses Merkblatt wurde durch die Arbeitsgruppe „Alternative Ufersicherungen“ verfasst wurde (DWA 2016). Schwimmende Vegetationsstrukturen bieten in dem Zusammenhang großes Potential für technisch-biologische Lösungen auf Grund folgender Eigenschaften:

- Schwimmende Vegetationsstrukturen werden eingesetzt, um Gewässerbereiche mit naturnahen Röhrichtbeständen auszustatten, die ansonsten von Vegetation nicht erschlossen werden können, um sowohl naturnahe Habitatstrukturen zu entwickeln (Burgess u. Hirons 1992; Leschisin et al. 1992) als auch Verbesserungen der Wasserqualität zu bewirken (Li et al. 2010).
- In regelmäßigen Abständen platzierte Gabionen können als „Trittsteine“ oder Stützstellen zur Überbrückung von zuvor ökologisch undurchlässigen Gewässerabschnitten eingesetzt werden. Der Einsatz von punktuellen lebenden Inseln kann daher einen wichtigen Beitrag zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit insbesondere entlang von Kanälen bzw. stark frequentierten Wasserstraßen mit verbauten Ufern leisten.
- Gleichzeitig dämpfen schwimmende Strukturen die auf die Ufer einwirkenden Wellen und damit deren Belastung auf die Uferbereiche (Jiang et al. 2013), deren Wirkung in Abhängigkeit der Anzahl und Ausgestaltung der Gabione untersucht wird.
- Die dadurch entzogene Wellenenergie führt zu einer geringeren Umströmung und zu einer kleineren Auflaufhöhe der Wellen an der bewachsenen Uferböschung (Elbisy, 2015).

Ziel des Projektes ist die Weiterentwicklung einer Technik zur Initiierung von selbstschwimmenden Vegetationsbeständen für den Einsatz zur Wellendämpfung von Schiffswellen an den Ufern von z.B. Wasserstraßen oder an staugeregelten Fließgewässern. Die Wellenbelastung z.B. durch Schiffe oder Motorboote stellt an den Ufern dieser Gewässer eine der Hauptbelastungen für die Flora und Fauna dar (Gabel et al. 2008; Schleuter et al. 2006; Sundermeier et al. 2008). Bei der Herstellung und Initiierung der Vegetationsstrukturen kommen hauptsächlich organische und verrottbare Materialien in Kombination mit lebenden heimischen Pflanzarten zum Einsatz, die sich an natürlichen Vorbildern wie Schwinggrasen oder Schwingröhrichten in den Verlandungszonen von Stillgewässern orientieren. Auf diese Weise können sie als lange Linienelemente auf großen Streckenabschnitten in Kanälen und erheblich veränderten Gewässern eingesetzt werden, ohne dabei künstliche Materialien in die ökologisch wertvollen Gewässer einzutragen, die dem eigentlichen Gedanken einer umweltentlastenden Maßnahme widersprechen würden. Im Gegensatz zu Windwellen besitzen Schiffswellen abweichende charakteristische Eigenschaften, an der naturnahen Vegetationsbestände nicht angepasst sind, z.B. längere Perioden und größere Wellenhöhen. Zur Entwicklung naturnaher Vegetationsbe-

stände sind daher systematische Untersuchungen zur lokalen und bedarfsgerechten Auslegung der „lebenden Inseln“ unter dem Einfluss von Schiffswellen erforderlich.

Dabei sind zwei maßgebliche Wirkungen das übergeordnete Ziel der systematischen Untersuchungen und der Entwicklung der Gabionen. Die erste Wirkung ist die zuvor beschriebene Dämpfung der gewässerabhängigen Schiffswellen, die sowohl über variierende Längen- und Breitenabmessungen als auch mit Hilfe des Gewichts bzw. der Eintauchtiefe entwickelt werden kann. Der zweite entscheidende Parameter sind die Strömungsgeschwindigkeiten und der Wasseraustausch in den Gabionenkörpern sowie im Nahfeld. Die entwickelten Bauformen müssen im Inneren der Gabione trotz der einlaufenden Schiffswellen naturnahe und standortspezifische Umweltbedingungen für die Besiedlung, das Wachstum und den Schutz der Habitatstruktur ermöglichen. Bei den Untersuchungen sollen die Entwicklungsstadien dieser naturnahen Technik genauer betrachtet werden. Eine perspektivische Darstellung der Gabionen ist in Abbildung 1 gegeben.

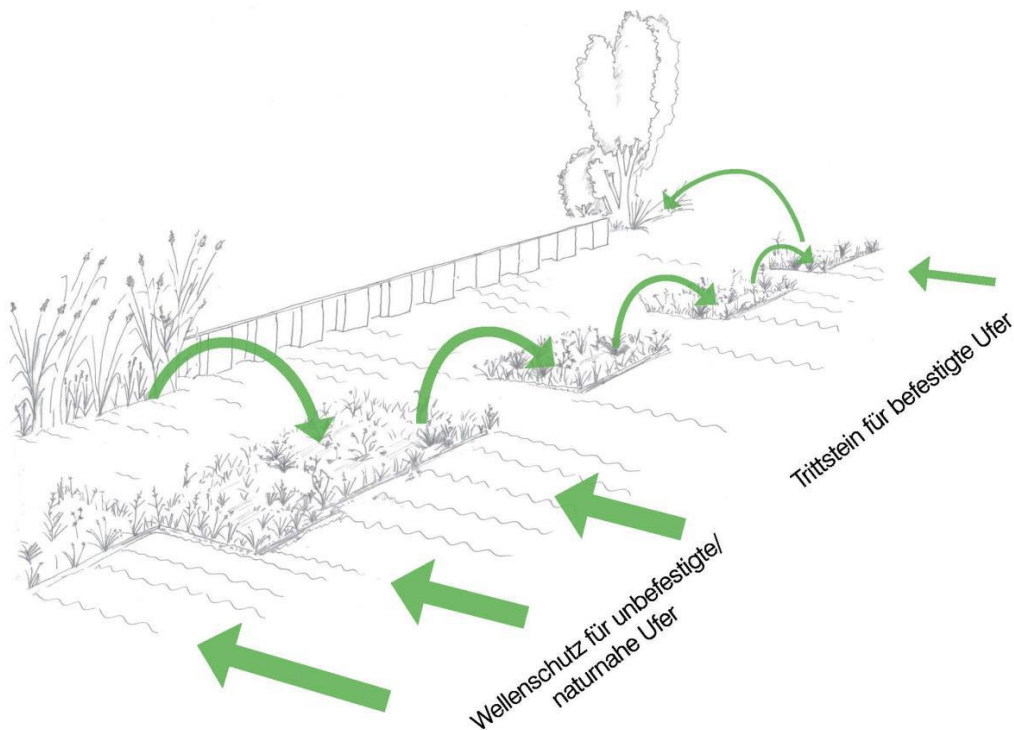


Abbildung 1: Anordnung schwimmender Vegetationselemente als Linienelement und vereinzelt als ökologische Stützstellen an einem Kanalufer zwecks Wellenschutz und als Trittssteinelement zur Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit

### 3 Wissenschaftlicher Hintergrund

Im folgenden Kapitel wird der wissenschaftliche Hintergrund bezüglich schwimmender Vegetationsgesellschaften als auch Wellendämpfung an Binnengewässern kurz erläutert.

#### 3.1 Schwimmende Vegetationsgesellschaften

Da das gesammelte Wissen über natürlich schwimmende Vegetationsgesellschaften die Gewinnung von hilfreichen Erkenntnissen über die Langzeitfunktion und den Einsatz von künstlich hergestellten schwimmenden Inseln ermöglichte (Headley & Tanner, 2006), sollen im Folgenden die Entstehung und die grundlegenden Eigenschaften schwimmender Vegetationsgesellschaften dargestellt werden. Schwimmende Vegetationsgesellschaften- bzw. bestände treten in der Natur während der progressiven Verlandung von Stillgewässern auf (Zimmerli, 1988; Succow & Joosten, 2001). Je nach Trophiegrad des Gewässers sind unterschiedliche Pflanzengesellschaften an der Entstehung der schwimmenden Sukzessionsstadien beteiligt. Sie werden daher entweder als Schwingrasen in oligotrophen, als Schwingried in mesotrophen oder als Schwingröhricht in eutrophen Gewässern bezeichnet. Demnach nennt Günther (2013) verschiedene Pflanzenverbände- und Gesellschaften, die bei den Verlandungsprozessen auftreten. So können bei eutropher Verlandung Stillwasserröhrichte (*Phragmition australis*), Großseggenriede (*Magnocaricion elatae*), Steifseggen-Riede (*Caricetum elatae*), Wasserschierlingsriede (*Cicuto-Caricetum-pseudocyperi*), schwimmende Sumpf-Calla Gesellschaften (*Callietum pallustris*) und Sumpf-Erlenwald mit langjähriger Segge (*Carici elongatae* - *Alnetum glutinosae*) auftreten. Bei meso- und oligotropher Verlandung treten hingegen mesotrophe Zwischenmoor-Gesellschaften (*Caricion-lasiocarpae*) und Schnabelried-Schlenken-Gesellschaften (*Rhynchosporion-albae*) auf. Die eutrophe Serie beginnt mit schwimmenden Röhricht- bzw. Seggengesellschaften und mündet in einen schwimmenden Erlenbruchwald. Die meso- und oligotrophen Serien beginnen mit schwimmenden torfmoosrasen und münden in schwimmenden basenarmen Niederoder Hochmoorgesellschaften. Dieser Prozess ist in Abbildung 2 dargestellt.

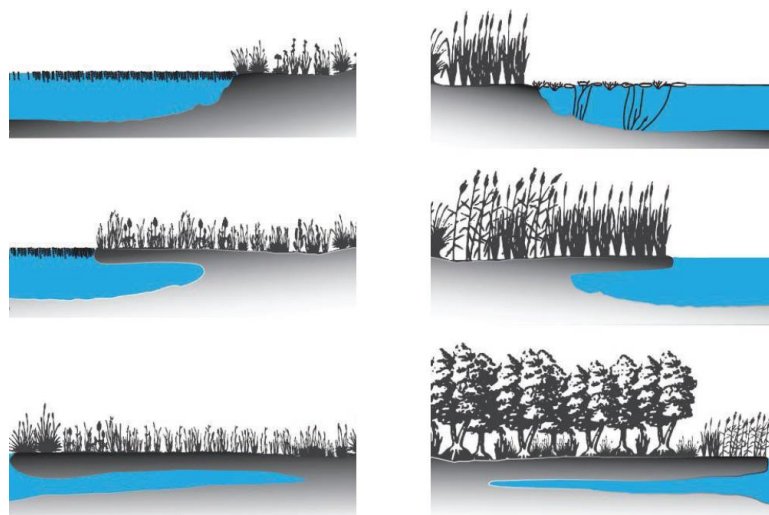


Abbildung 2: Schwimmende Verlandungsabfolge mesotropher und oligotropher Gewässer (links) und eutropher Gewässer (rechts) (Günther, 2013).



Untersuchungen von Ruthsatz (1996) zeigten zudem, dass sich die Trophieverhältnisse und insbesondere die Basenversorgung in Schwingrasen-Flächen mit zunehmendem Alter verschlechtern. Demnach werden mesotrophente und hygrophile Arten schrittweise von stärker Oligotrophenten und Wechselfeuchten ertragenden Arten zurückgedrängt. Gründe für diese zunehmende Nährstoffverarmung sind u.a. die Auswaschungseffekte mobiler Nährstoffe (z.B. K, Ca, Mg) durch Regenwasser und die Abhängigkeit der Basenversorgung von Wassereintrag in den Schwingrasenkörper. Demnach ist die Basenversorgung bei stagnierendem Wasser rückläufig. Zudem konnte festgestellt werden, dass der Rand des Schwingrasens eher mesotrophe- und das Zentrum stärker oligotrophe Verhältnisse aufweist (Ruthsatz, 1996). Aufgrund des großen Einflusses durch Regenwasser bzw. dem geringeren Grundwasser-Einflusses auf die Vegetation von Schwingrasen, werden diese auch als „Pseudohochmoore“ bezeichnet, die nasse Hochmoorgesellschaften mit einzelnen Mineralbodenwasserzeigern aufweisen (Kaule & Peringer, 2011). Die meisten an den verschiedenen Sukzessionsreihen beteiligten Gefäßpflanzen gehören zu den Süß- und Sauergräsern (*Gramineen*, *Cyperaceen*) und weisen ähnliche charakteristische Eigenschaften auf. Durch ihre langen unter- oder oberirdischen Ausläufer (*Polykormone*) erschließen die Arten vegetativ die schwimmenden Schichten (Günther, 2013). Um auf die freie Wasserfläche hinaus wachsen zu können, benötigen bzw. nutzen die eigentlich im Bodensubstrat verankert wachsenden Arten ein schwimmendes Gerüst aus lebenden oder toten Pflanzenteilen (Günther, 2013). Als lebende Gerüststruktur können die den Röhrichten vorgelagerten Zonen der Potamion- oder Hydrocharis-Gesellschaften dienen, die mit ihren Blättern an der Wasseroberfläche schwimmen, mit ihren Wurzeln aber am Gewässergrund verankert sind (Donselaar-Ten Bokkel Huinik, 1961; Zimmerli, 1988). Ebenso können die den Röhrichten zugehörigen Schwimmdecken aus *Equisetum fluviatile* als Gerüst dienen. In meso- und oligotrophen Gewässern übernehmen Torfmoosgesellschaften diese Funktion (Succow & Joosten, 2001). Unabhängig vom Nährstoffgehalt des Gewässers und den auftretenden Gesellschaften entstehen im Laufe der Zeit, aus der frei im Wasser schwimmenden Pflanzendecke, organische Matten mit Dicken von bis zu 50-60 cm, die allesamt ähnliche charakteristische Eigenschaften aufweisen: sie bestehen aus zwei Horizonten. Der obere, ca. 30 Zentimeter mächtige Horizont besteht aus gering zersetzter organischer Substanz mit einer intensiven Durchwurzelung durch die lebenden Pflanzen. Der darunter liegende Horizont besteht aus stärker zersetzter Substanz und wird weniger durch die Wurzeln als vielmehr durch das Fasernetz der vertorften Ausgangssubstanz zusammengehalten (Kratz & deWitt, 1986). Ein Teil des dabei entstehenden Torfes sinkt in den darunter befindlichen Wasserkörper ab (Sinktorfe) (Succow & Joosten, 2001). Dies ist in Abbildung 3 zu erkennen. Füllen die kontinuierlich absinkenden Sinktorfe den gesamten Wasserkörper auf, ist die schwimmende Verlandung beendet. Ein weiterer Grund für das Ende der Verlandung kann der sich senkende Wasserstand sein, der dazu führt, dass die schwimmende Gesellschaft in Kontakt mit dem Gewässergrund tritt (Succow & Joosten, 2001).

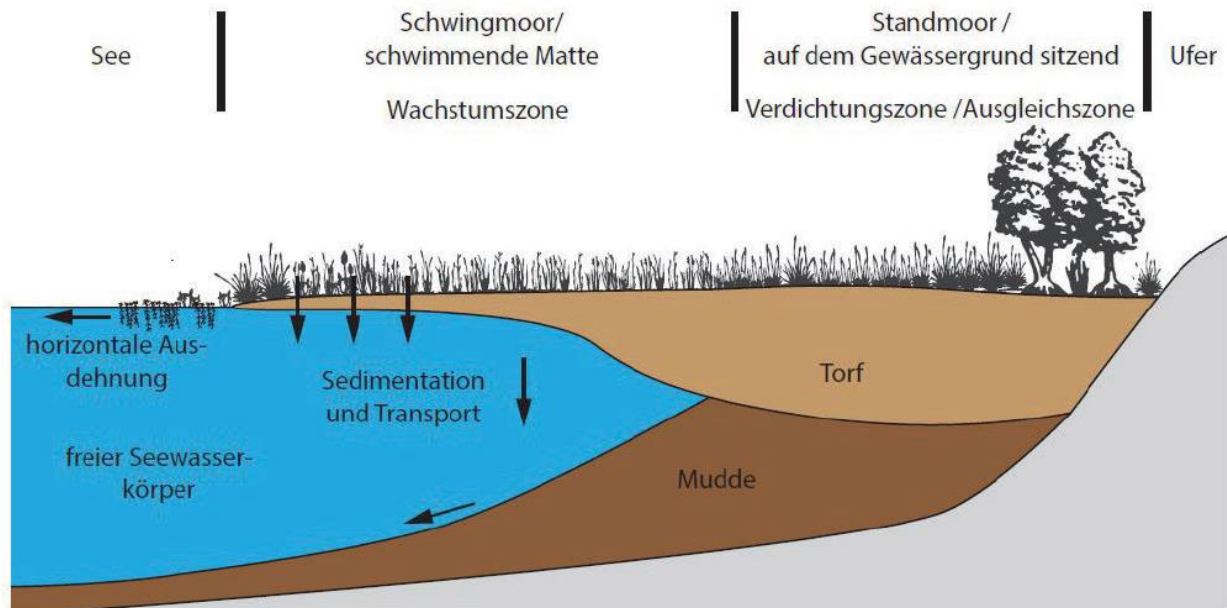


Abbildung 3: Progressive Sukzession an einem Stillgewässer mit einem Schwingmoor. Frei im Wasser schwimmende Gesellschaften ermöglichen eine horizontale Ausdehnung auf den See. Mit dem Schwingmoor wächst ein schwimmender Torfkörper heran. Aus der schwimmenden Matte sedimentiert organische Substanz (Sinktorf), aus der sich auf dem Gewässergrund eine Muddenschicht entwickelt (Günther 2013 nach Kratz & DeWitt 1986, verändert).

Der Auftrieb schwimmender Vegetationsgesellschaften wird durch zwei Faktoren begünstigt. Der 1. Faktor ist die lebende, mattenbildende Vegetation. Die Organe (Triebe, Wurzeln, Rhizome) mit denen die verschiedenen Pflanzenarten wie z.B. Typha vegetativ die schwimmenden Schichten erschließen besitzen ein ausgeprägtes Luftleitgewebe (*Aerenchymgewebe*), so dass sie eine geringere Dichte als Wasser aufweisen und dadurch schwimmfähig sind. Der 2. Faktor ist das sich während des anaeroben Stoffwechsels bildende Sumpfgas, welches sich in Form von Gasblasen in den Matten verfängt (Hogg & Wein, 1988a). Das Sumpfgas ist vor allem für ältere Matten als Hauptauftriebsfaktor identifiziert worden (Hogg & Wein, 1988b). Demnach besitzt eine ca. 50 cm dicke Typhamatte ca. 40,2 l Gasvolumen, bzw. ca. 40 Kg Auftrieb (Hogg & Wein, 1988a). Dies ist in Abbildung 4 nochmal verdeutlicht. Der Anteil des Gasvolumens beträgt ca. 90 % des Gesamtauftriebes und liegt damit weit über dem Auftrieb durch die Phytomasse bzw. des *Aerenchymgewebes* der Vegetation (Günther, 2013). Durch die Gasfüllung des Mattenkörpers und der lebenden Pflanzenteile ist die Dichte des bewegungsfähigen Torfkörpers kleiner als die Dichte von Wasser, so dass sich die Torfdecken vom Untergrund ablösen und großflächig aufschwimmen. Die aufschwimmende Vegetationsgesellschaft kann allen Schwankungen der Wasserstände folgen, wodurch sich annähernd konstante Wasserstandsbedingungen an der Oberfläche einstellen und ein längerfristiges Austrocknen verhindert wird. Durch Wasseraufstau oder Wellen- und Windbewegungen können die organischen Matten vom Ufer abreißen. Diese vom Ufer gelösten Teilstücke können über den See treiben und den Eindruck einer bewachsenen Insel erwecken (Günther, 2013).



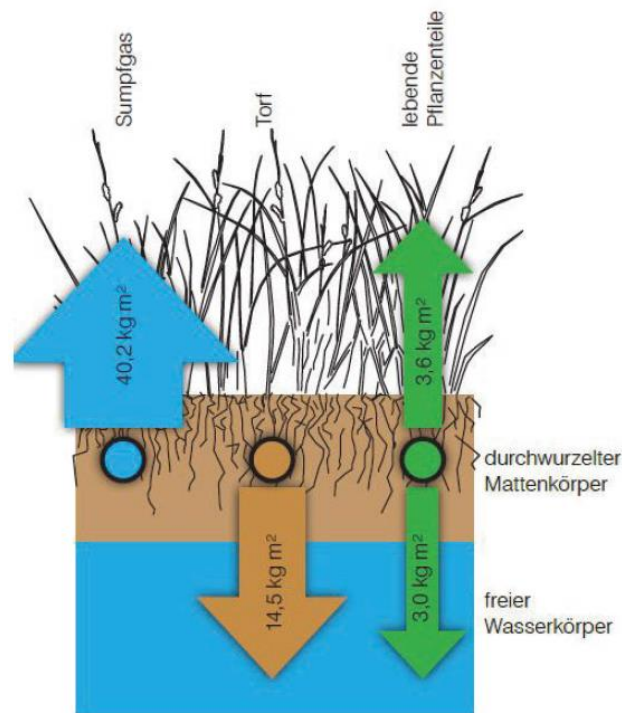


Abbildung 4: Auftrieb einer ca. 50–60 cm starken schwimmenden Typhamatte in kg m<sup>2</sup> (Günther, 2013).

### 3.1 Schiffsinduzierte Wellen und Wellendämpfung

Um die Wellendämpfung von schwimmenden Strukturen wissenschaftlich zu untersuchen ist ein Verständnis der einwirkenden, Wellen notwendig. Im Binnenbereich stellen schiffsinduzierten Wellen eine der Hauptbelastungen für die Uferbereiche dar. Auch Schleusungsvorgänge, Tideereignisse, starke Winde oder Hochwässer können zu Wasserwellen und entsprechenden Kräften führen, werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes jedoch als nicht maßgeblich behandelt. Die Ausprägung der schiffsinduzierten Wellen hängt dabei von unterschiedlichen Einflussparametern wie z.B. Schiffsgeschwindigkeit, Schiffstyp, Schiffsform, Gewässerquerschnitt, Uferabstand, Tiefgang, Abstand zur Gewässersohle oder Wellenausbreitungsrichtung ab. Die Fahrtzustände von Schiffen werden in Manöver- und Streckenfahrt unterteilt. Die Deckwerks- und Grundbelastungen durch Propulsionsstrahlen bei Wendemanövern oder Vertäuungsvorgängen (Manöverfahrt) werden nicht weiter berücksichtigt. Während der Streckenfahrt werden schiffsinduzierte Wellen und Strömungen erzeugt, die sich durch eine gegenseitige hydraulische Wechselwirkung der Wasseroberflächenauslenkungen auszeichnen. Die Streckenfahrt kann in Verdränger- und Gleitfahrt unterteilt werden. Bei der Verdrängerfahrt liegt die Schiffsgeschwindigkeit unter der kritischen Wellengeschwindigkeit ( $v_s < v_{krit}$ ), auch stationärer Zustand genannt. Die kritische Schiffsgeschwindigkeit ist dabei die Geschwindigkeit bei der das verdrängte Wasser nicht mehr vollständig im strömenden Zustand entgegen der Fahrtrichtung abgeführt werden kann. Durch die Bewegung des Schiffes kommt es zu einer Potentialänderung im Druckfeld der freien Oberfläche, sodass sich diese verformt. Durch die Wasserspiegeländerung wird ein Wellensystem von Primär- und Sekundärwellen erzeugt. Die erzeugte Wellenhöhe ist dabei besonders von der Fahrtgeschwindigkeit abhängig. Die Gleitfahrt tritt ein, sobald das verdrängte Wasser nicht mehr vollständig im strömenden Zustand entgegen der Fahrtrichtung abgeführt werden kann ( $v_s \geq v_{krit}$ ). Das Schiff beginnt auf seiner eige-

nen Bugwelle aufzufahren, sodass mehr Wasser unter dem Boot abgeführt werden kann. Der Absenk und das damit einhergehende Primärwellensystem verlieren somit an Bedeutung. In Abbildung 5 wird von links nach rechts die Wellenphasen eines vorbeifahrenden Schiffes gezeigt (BAW, 2010). Durch das Einfahren des Schiffes in ein Binnengewässer wird der Gewässerquerschnitt um den Schiffsquerschnitt reduziert. Dabei wird das Wasser zwischen dem Schiffskörper und dem Ufer aufgrund der Kontinuitätsbedingung beschleunigt. Diese Beschleunigung führt zu einem deutlich erkennbaren Wasserspiegelabsenk an den Seiten des Schiffes, da die Lageenergie infolge der steigenden kinetischen Energie reduziert werden muss (Gesing, 2010). Dieser Absenk ist in Abbildung 5 dargestellt. Die durch den Absenk hervorgerufene Rückströmung ist bis zu einer halben Schiffslänge Abstand zum Schiff signifikant. Zusätzlich wird das Wasser unterhalb des Schiffes beschleunigt, sodass sich eine Potentialänderung, sprich ein dynamischer Absenk, einstellt. Im Bereich der Staupunkte des Schiffes (Bug und Heck) bilden sich Wellenberge aus. Die Wellenberge sind fest an das Schiff gebunden und damit unabhängig von der Schiffsgeschwindigkeit (Abdel-Maksoud & Rieck, 1996). Die Länge des primären Wellensystems entspricht dem Abstand der beiden Wellenberge, also der Schiffslänge (Abdel-Maksoud & Rieck, 1996). Zusätzlich tritt eine Wasserspiegelanspannung, mit ungefähr einer Schiffslänge Vorlauf zum Schiff, auf (Gesing, 2010). Bei Annäherung an die kritische Schiffsgeschwindigkeit und Brechen der Heckquerwelle bildet sich ein Rollbrecher aus, der als mitlaufender Wechsellprung große Belastungen auf die Deckwerke ausüben kann (BAW, 2010). Zusätzlich begleitet eine Wiederauffüllungsströmung den Rollbrecher, welche die Absenkmulde neben und unter den Schiffen wiederauffüllt.

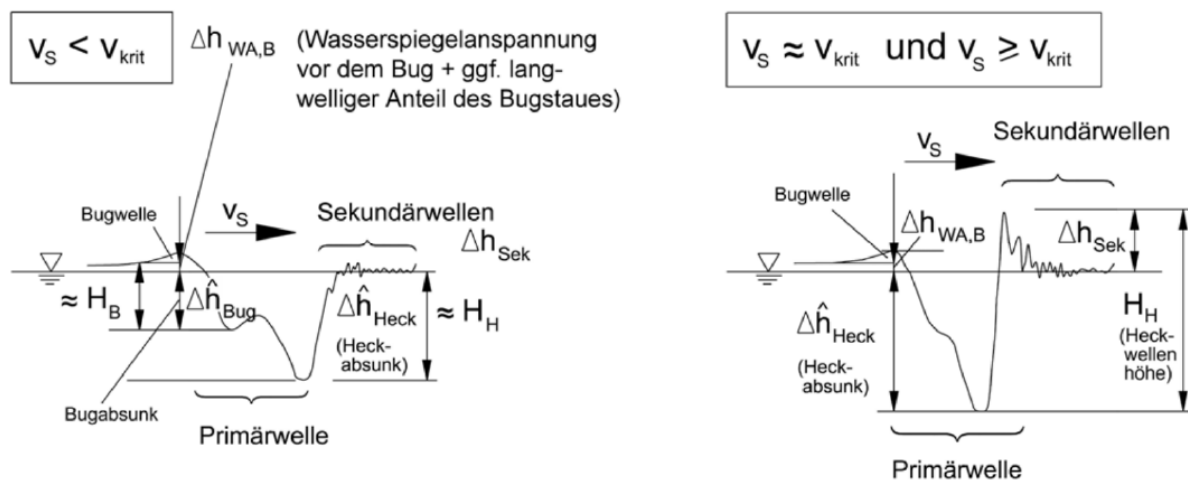


Abbildung 5: Der gemessene Wasserspiegel über die Zeit an einem festen Ortspunkt für zwei unterschiedliche Fahrtzustände stellt das Wellensystem des vorbeifahrenden Schiffes dar (BAW, 2010).

Es treten weitere kurzperiodische kontinuierliche Quer- und Schrägwellen auf, die sich aufgrund der Krümmungstendenz der strakenden Schiffshaut phasenverschoben von der Schiffshaut ablösen und sich entgegen der Fahrtrichtung ausbreiten (Abdel-Maksoud & Rieck, 1996). Das divergierende Sekundärwellensystem ist nicht an das Schiff gebunden. Die Querwellen lösen sich in einem Winkel von etwa  $9^\circ$  vom Schiff ab. Bei einer Überlagerung der Schräg und Querwellen, entsteht eine Hüllkurve (auch: Interferenzlinie). Diese hat zum Schiff stets einen konstanten Winkel  $\alpha_K$  von etwa  $19.47$  Grad, dem Kelvin Winkel [THOMSON, 1887]. Die Sekundärwellenhöhen auf der Interferenzlinie können mit den Sekundärwellen reiner Heckquerwellen verglichen werden. Der Ablösewinkel und die Interferenzlinien sind in Abbildung 6 dargestellt. Auf diesem

Hintergrund aufbauend wurden die Gabionen entwickelt und die Versuche im MLK, sowie im Großen Wellenkanal geplant. Die Schiffswellen wurden dabei als maßgebliche Einwirkung identifiziert, durch Messungen im MLK quantifiziert und in den Versuchen im GWK nachgebildet.

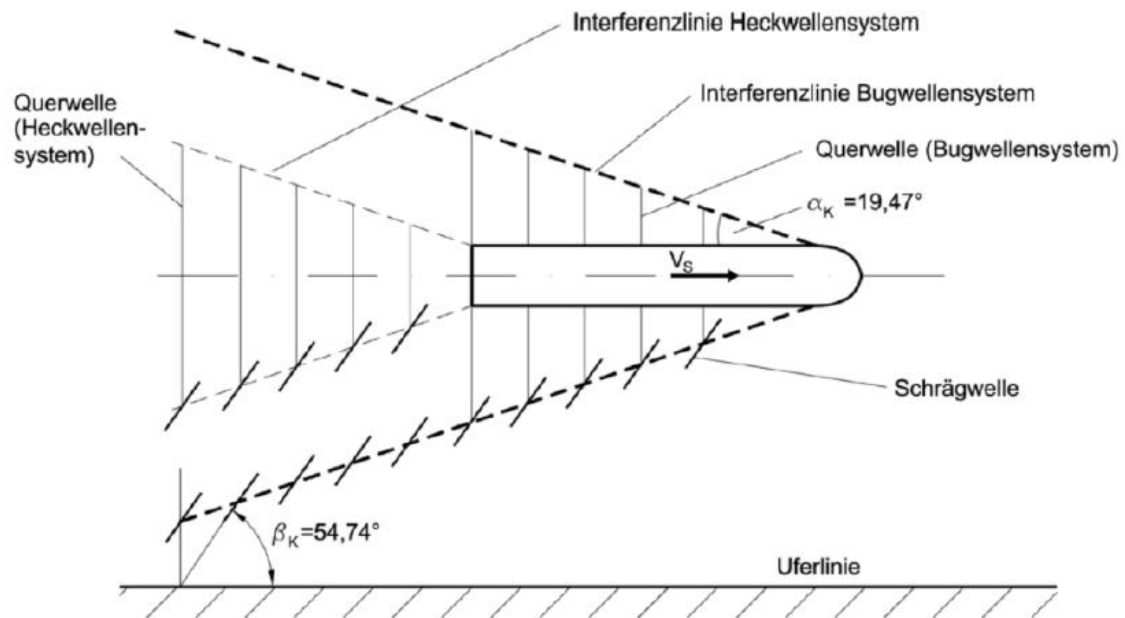


Abbildung 6: Die Quer- und Schrägwellen lösen sich in einem Winkel  $\alpha_K$  von etwa 19,47 Grad vom Schiff ab. Durch eine Überlagerung beider Wellen am Bug und Heck ergibt sich jeweils eine Interferenzlinie (BAW, 2010).

## 4 Aufbau und Wachstum der Gabionen

Die Gabionen oder „lebenden Inseln“ sind eine ingenieurbio­logische Bauform, mit der die Entwicklung schwimmender und naturnaher Vegetationsgesellschaften auf Gewässern initiiert werden kann. Die zugrunde liegende Technik der Schilfrohr­gabione orientiert sich an natürlichen Vorbildern wie Schwingrasen oder Schwingröhrichten die im Uferbereich von Stillgewässern im Verlauf der Gewässerverlandung auftreten (vgl. Kapitel 3.1). Dabei sollen natürliche Entwicklungsprozesse und Sukzessionsabfolgen mit Hilfe der biologischen und technischen Eigenschaften von Vegetation eingeleitet und gesteuert werden. Wichtig für diese Initiierung ist die Verwendung von ausschließlich organischen und verrott­baren Materialien. Demnach wird lebendes und totes Pflanzenmaterial in Kombination mit natürlichen, unbelebten Baustoffen wie Holz, Boden oder Naturfasergewebe bei der Herstellung „Lebender Inseln“ genutzt. Durch die Kombination von belebten und unbelebten Materialien werden insbesondere frühe, d.h. meist instabile Sukzessionsstadien schneller durchlaufen oder sogar vollständig übersprungen und spätere, d.h. meist stabile und sich erhaltende Zustände schneller erreicht. Die „Lebende Inseln“ mit der zugrunde liegenden Technik der Schilfrohr­gabione wurden in einem mesokosmischen Versuch entwickelt (Günther, 2013). Die Schilfrohrgabione besteht aus trockenen Halmen von Schilfrohr (*Phragmites australis*), Pfahlrohr (*Arundo donax*), Miscanthus (*Miscanthus spec.*), Rohrkolben (*Typha Spec.*), Teichbinse (*Schoenoplectus spec.*) oder Bambus (*Bambusoideae spp. spec.*). Weil die trockenen Halme zu Beginn von einem Drahtgeflecht zusammengehalten und zu einem organischen Körper gebunden werden, wird die Bauweise Gabione bzw. Schilfrohrgabione genannt. Langfristig wird die Gabione von Pflanzen durchwurzelt. So werden die lockeren Halmlagen dauerhaft gefestigt bzw. der elastische organische Körper verbunden. Dieses Funktionsschema ist in Abbildung 7 dargestellt.

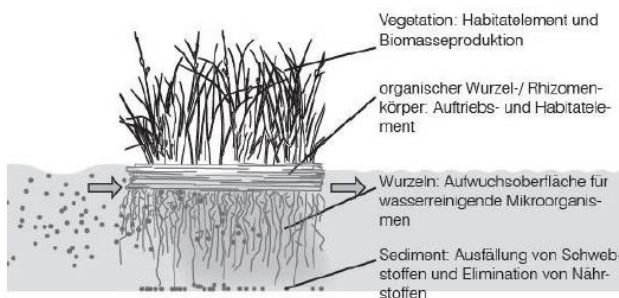
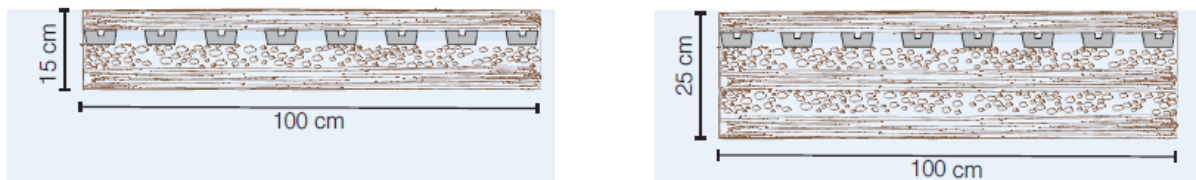


Abbildung 7: Funktions- und Wirkungsschema „Lebender Inseln“ (Günther, 2014) (links) sowie be­pflanzte Gabionenkörpers nach circa einem halben Jahr Wachstum (rechts).

### 4.1 Aufbau der Gabionen

Die Grundform des „lebenden Inseln“ ist ein 1,0 m x 1,0 m großes Viereck aus parallel zueinander ausgerich­ten Halmen. Um eine ausreichende Festigkeit der Gabione zu erlangen werden die Halme in unterschiedlichen Lagen kreuzweise zueinander angeordnet. Wie viele Lagen zum Einsatz kommen hängt von der Aufbau­stärke ab. Diese variierte bei den vorliegenden Versuchen zwischen 15 und 25 cm. Diese variierende Aufbau­stärke der Schilfrohrgabionen spiegelt die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der natürlichen Vorbilder wider. Mit Hilfe der Aufbau­stärke des Gabionenkörpers wird ein gegenüber Wellenbewegung empfindliches

Entwicklungsstadium, d.h. eine lockere Wurzel- und Rhizomschicht übersprungen und eine stabile Entwicklungsphase eingeleitet. Die in den Versuchen gewählten Aufbaustärken würden demnach einem zwischen 27 und 80 Jahren alten natürlichen schwimmenden Vegetationsbestand entsprechen. Die mittlere Dichte der organischen Füllung (*Miscanthus Halme*) liegt im trockenen Zustand bei  $0.16 \text{ g/cm}^3$ . Es ergibt sich ein Trockengewicht von 23.61 kg bzw. 39.95 kg in Abhängigkeit der Aufbauhöhe. Die initialen Eintauchtiefen der Gabione im trockenen Zustand liegen bei 2.36 cm, bzw. 3.93 cm. Im vollständig nassen Zustand erhöht sich die mittlere Dichte durch das aufgenommene Wasser auf  $1.06 \text{ g/cm}^3$ . Dadurch erhöhen sich die Gewichte der beiden Varianten auf 118.1 kg, bzw. 196.8 kg bei 80 % Wassersättigung. Die Eintauchtiefe ist dann mit der jeweiligen Höhe gleichzusetzen. Die Hälfte der Gabione ist zusätzlich mit PVC-Platten ausgestattet, die durch Gasspeicherung für zusätzlichen Auftrieb sorgen. Außerdem dienen die Platten als Platzhalter für Messungen im Inneren der Gabione. Hiermit kann je nach Gasentwicklung im Gewässer die Eintauchtiefe zusätzlich variieren. Abbildung 8 zeigt die beiden Varianten der Gabionen in einer perspektivischen Ansicht nach vollständiger Wassersättigung.



**Abbildung 8: Schilfgabionen nach der vollständigen Wassersättigung**

Aufgrund der eingeschlossenen Luft innerhalb des trockenen Materials und der Internodien (der trockenen Halme), besitzt der Körper einen hohen Eigenauftrieb. Deshalb taucht der auf dem Wasser schwimmende Körper zu Beginn nur mit einem kleinen Teil seines Volumens in das Wasser ein. Gleichzeitig unterstützt die Schilfrohrgabione das Wachstum der Pflanzen auf dem Wasser, indem sie ihnen zu Beginn Auftrieb und Wurzelraum zur Verankerung bietet. Die eingetauchten Schilfrohrhalme nehmen Wasser auf und verlieren mit der Zeit ihren Auftrieb, so dass nach und nach ein immer größeres Volumen des Gabionenkörpers in das Wasser eintaucht. Dieser Prozess kann bis zu einer Vegetationsperiode, nachdem die Gabionen auf das Wasser gesetzt worden sind, andauern. Am Ende taucht nahezu das gesamte Gabionenvolumen in das Wasser ein. Die Schwimmfähigkeit bzw. den Auftrieb erlangt die Schilfrohrgabione durch die zwei Faktoren, die auch bei den in der Natur vorkommenden schwimmenden Vegetationsgesellschaften maßgeblich sind. Einerseits durch das Aerenchymgewebe (Luftleitgewebe) der lebenden Pflanzen, die den Gabionenkörper mit ihren Rhizomen und Wurzeln durchwachsen. Andererseits setzen durch den mikrobiellen Abbau der Schilfrohrhalme sauerstoffzehrende Prozesse ein, die innerhalb der Gabione anaerobe Bedingungen gewährleisten. Unter der Zehrung des im Wasser gelösten Sauerstoffs entsteht während des Abbaus der organischen Bestandteile Sumpfgas (z.B. Schwefelwasserstoff, Kohlenstoffdioxid oder Methan). Das Gas, insbesondere Methan, ist schwer wasserlöslich und verfängt sich in Form kleiner Bläschen im Wurzelgeflecht innerhalb der Schilfrohrgabione. Somit leistet das Gasvolumen schon in der zweiten Vegetationsperiode einen ähnlich hohen Beitrag zum Auftrieb wie das Aerenchymvolumen. Dieser Prozess ist in Abbildung 9 dargestellt.

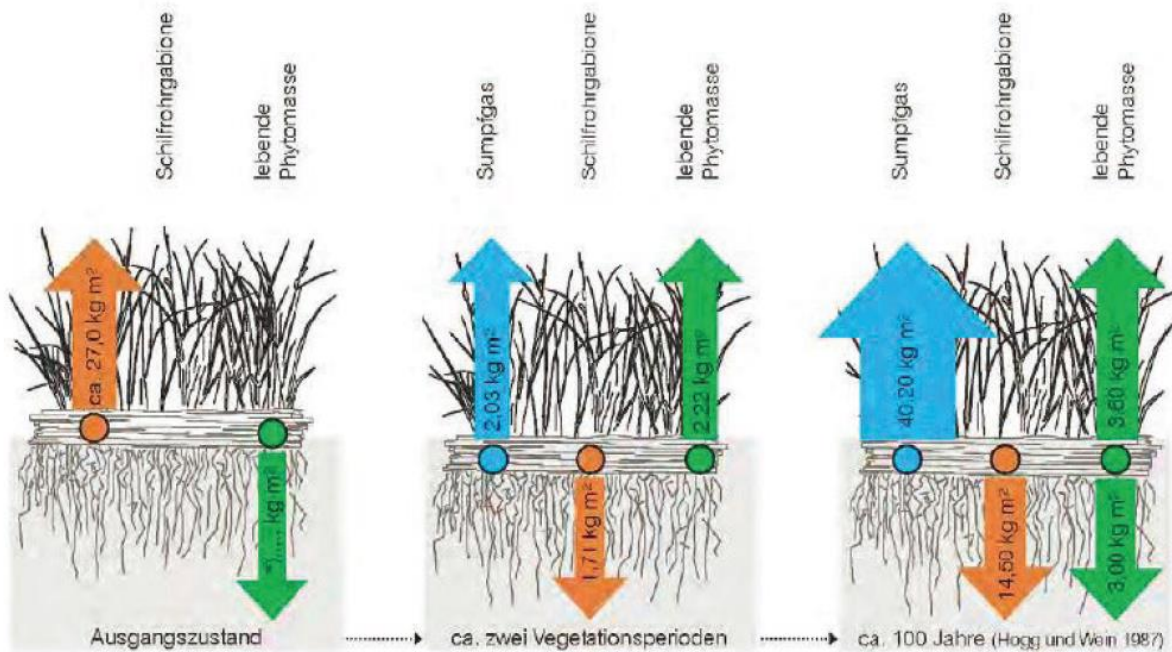


Abbildung 9: Entwicklung des Auftriebs der bepflanzen Schilfrohrgabione. Im Ausgangszustand besitzen die Halme der Gabione einen hohen Auftrieb und der Körper taucht nur zu einem geringen Teil in das Wasser ein (links). Wenn die Halme Wasser aufnehmen, verlieren sie ihren Auftrieb und das gesamte Gabionenvolumen sinkt nach ca. 2 Vegetationsperioden in das Wasser. Der Auftrieb wird dann sowohl von den lebenden Pflanzenteilen als auch durch das sich entwickelnde Sumpfgas geleistet (Mitte). Natürliche Schwinggrasen erhalten ihren Auftrieb ausschließlich durch das Sumpfgas, während die lebenden Pflanzenteile nur noch eine untergeordnete Rolle spielen (rechts)

#### 4.2 Anwachsen der Gabionen

Die trockenen Gabionen wurden im August 2017 mithilfe einer Schablone bepflanzt. Dazu wurden in einem Raster mit Abständen von  $\pm 20$  cm gebündelte Schilfrohrpflanzen (*Phragmites australis*) in die Gabione eingesetzt. Diese Pflanze ist in großen Teilen der Welt heimisch und eine wichtige Klärpflanze. Besonders ihre wasserreinigenden Eigenschaften sind hervorzuheben. So sind *Phragmites australis* von Mikroorganismen besiedelt, die in das umgebende Wasser antibakterielle Stoffe abgeben. Beim Durchfließen des Schilfrohrs wird das Wasser von Krankheitserregern befreit und es kommt zu einer Reinigung des durchfließenden Wassers. Dieses Schilfrohr stellt einen wichtigen Bestandteil bei der in der Rekultivierung von Naturschutzgebieten und öffentlichen Anlagen dar. Voll ausgewachsen zeichnet sich die Pflanze durch einen hohen, aufrechten Wuchs aus. Die Blätter des Schilfrohrs sind 1 bis 4 cm breit und haben eine blaugrüne Färbung. Das Blattwerk ist lanzettlich, schmal und zugespitzt. In den Monaten August und September erscheinen gelbbraune Blütenähren. Abbildung 10 zeigt eine bepflanzen Gabione im trockenen Zustand mit den weiterhin einzupflanzenden Schilfrohrpflanzen im Hintergrund.



Abbildung 10: Bepflanzte Schilfgabione im trockenen Zustand

Die Schilfröhrpflanzen sind über die Projektdauer und die damit verbundenen Vegetationsperiode 2018 und 2019 angewachsen und haben den Gabionenkörper komplett durchwachsen. Die bepflanzten Gabionen wurden im September 2017 in einem Gewächshaus der Leibniz Universität Hannover am Campus Herrenhausen nass eingelagert. Dazu wurde ein 6,5 m x 6,5 m großes Becken errichtet und mithilfe einer Plane vollständig abgedichtet. Das Becken hat eine Wassertiefe von >30 cm. Über eine Zeitschaltuhr wurde das Wasser mit zwei Stabpumpen stündlich umgewälzt. Dies sorgt für eine ausreichende Sauerstoffversorgung und minimiert Algenbildung sowie ein „kippen“ des Wassers im Lagerbecken. Vorort wurden kontinuierliche Überprüfungen bezüglich Schädlingsbefall der Pflanzen, sowie Sauerstoffsättigung und PH-Wertes des Wassers durchgeführt. Die meisten Internodien der Gabione hatten zu Beginn der Vegetationsperiode 2018 Wasser aufgenommen und haben ihren initialen Auftrieb, im Verlauf der Anwuchsphase fast vollständig verloren. Im Mai 2018 wurden die Gabione zum endgültigen Teststandort nach Hannover Marienwerder transportiert. Das Ludwig-Franzius-Institut verfügt an diesem Standort über insgesamt knapp 16.800 m<sup>2</sup> überdachte Versuchsflächen (240 m x 60 m) und 24.000 m<sup>2</sup> nicht überdachte Außenflächen. Auf diesen Außenflächen findet die Lagerung der Gabione weiterhin im nassen Zustand statt. Beim Transport wurden die einzelnen Gabionen auf Kanthölzer gelegt um die Auflagefläche zu minimieren und somit ein Beschädigen der Wurzeln zu vermeiden. Das Lagerbecken wird wie im Gewächshaus auch in Marienwerder wieder errichtet. Hier wurden im Juli 2018 und 2019 Vegetationsaufnahmen durchgeführt. Im Rahmen der Vegetationsaufnahmen wurden die Wuchshöhe und die Halmanzahl der Schilfröhrhalme und der Deckungsgrad ermittelt sowie die weiteren auftretenden Arten kartiert.

Die durchschnittliche Wuchshöhe betrug 62,5 cm (2018) bzw. 80,0 cm (2019). Die Halmdichte betrug 136,9 Stk. (2018) bzw. 253,5 Stk. (2019) und trug zu einem Deckungsgrad von 41,9 % (2018) bzw. 57,5 % (2019) bei. Die Schilfpflanzen befanden sich somit während des Versuches in der Anwuchsphase und hatten daher noch nicht einen Zustand ausgewachsener Vegetationsbestände erreicht.

Unterschiede zwischen den Aufbauvarianten 15 und 25 cm Aufbau waren nicht zu verzeichnen. Auswirkungen auf die Vegetationsentwicklung waren aber durch die eingebauten Kunststoffplatten im Gabionenkörper zu erkennen. Die Varianten mit Kunststoffplatten zeigten einen um 31% (2018) bzw. 51% (2019) reduzierte

Halmdichte, eine um 11% (2018) bzw. 16% (2019) verringerte Wuchshöhe sowie eine um 45% (2018) bzw. 71% (2019) geringere Deckung.

Neben den eingesetzten Schilfpflanzen wurden weitere Pflanzen kartiert, welche teilweise aus der Umgebung der Wasserbecken eingeflogen sind bzw. mit den Schilfbällen eingetragen worden sind. Aussagen zur Entwicklung dieser Arten in Bezug auf das Schilf bzw. der Schilfentwicklung auf diese Arten ist nur in über den Projektzeitraum weiterführenden Untersuchungen möglich. Folgende Arten wurden kartiert: *Epolobium hirsutum*, *Agrostis stolonifera*, *Poa trivialis*, *Holcus lanatus*, *Bidens spec.*, *Lemna minor*.

Im August 2018 wurden Gewichtsmessungen der einzelnen Gabionen mit Hilfe einer Kranwage durchgeführt, um den Wassergehalt der Gabionen und den Wasserverlust nach dem Abtropfen zu ermitteln. Dazu wurden die Gabionen aus dem Wasser gehoben und das Gewicht in 10 Minutenintervallen bis zur Gewichtskonstanz gemessen. Die Gabionen wogen im Mittel (n=8) 78,5 kg (15cm) bzw. 122,25 kg (25cm) im abgetropften Zustand. Während des Abtropfens haben Sie über einen Zeitraum von ca. 100 Minuten ca. 20 Liter/ 27,3% (15 cm) bzw. 12,6 Liter/ 12,7% (25cm) verloren. Die durchwachsenen Gabionenkörper halten somit 73% (15cm) bzw. 87% (25cm) ihres Wasservolumens innerhalb ihres Körpers aus lebender und abgestorbener Biomasse.

Torfkörper sind in der Lage bis zu 95% und mehr Wasser fest zu binden (immobiles Wasser) und auf diese Weise einen Wasseraustausch mit dem die Insel umgebenden Wasserkörper zu verhindern. Die mobilen Wasseranteile in den Gabionenkörpern können durch Welleneinwirkung und Bewegung der Gabionen ausgetauscht werden, so dass in den Körper ständig sauerstoffreiches Wasser eintritt. Auf diese Weise können sich nicht die für den dauerhaften Auftrieb erforderlichen anaeroben Bedingungen einstellen.

Der Wasseranteil je Trockengewicht beträgt 2,9 Liter/ kg Trockengewicht (15 cm) bzw. 2,81 Liter/ kg Trockengewicht (25 cm). Die eingesetzten Kunststoffplatten zeigten somit keine Auswirkungen auf den Wassergehalt, weil diese an den jeweils tiefsten Stellen zur Bepflanzung durchbohrt worden sind und in diesen Teilen somit kein Wasser zurückgehalten werden konnte.

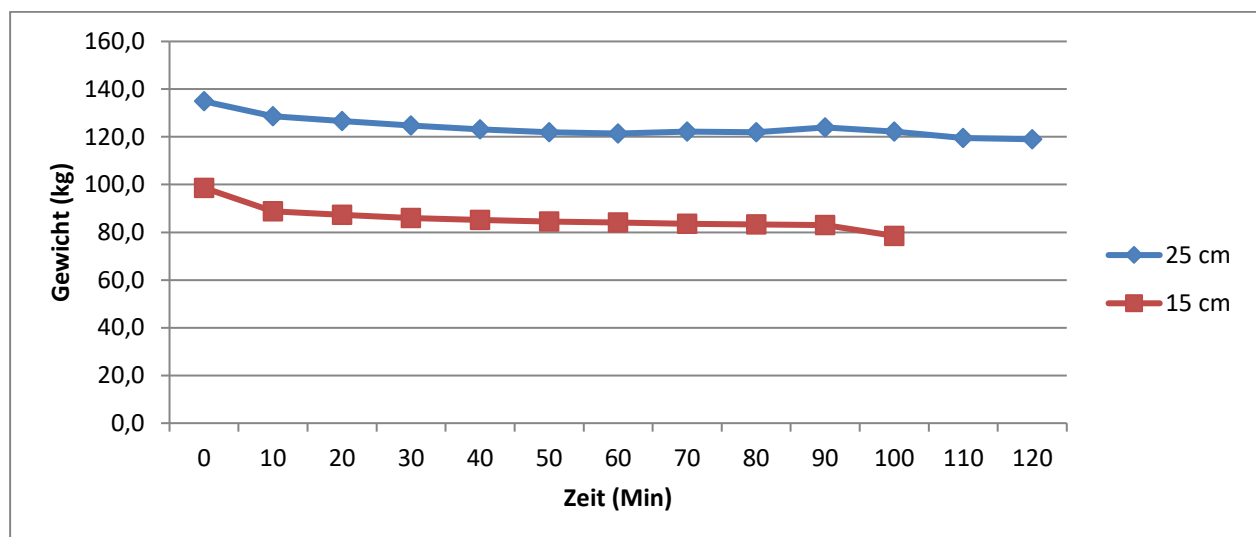


Abbildung 11: Gewichtsverlust der Gabionen (15cm und 25cm varianten) nach dem Herausheben aus dem Wasser





Abbildung 12 zeigt die Schilfgabione im eingelagerten Zustand am Ende der natürlichen Vegetationsperiode 2019 im maximal bewachsenen Zustand.



Abbildung 12: Schilfgabionen im eingelagerten, voll-bewachsenem Zustand im August 2019

## 5 Versuche im Mittellandkanal

Zwischen dem 23.07.2018 und dem 24.08.2018 wurden bis zu sechs Schilfgabionen im Mittellandkanal (MLK) unter überwachten Realbedingungen getestet. Hauptziel der Versuche war die Einsatzfähigkeit in stark befahrenen Binnengewässern zu überprüfen und die auftretenden Wellen zu quantifizieren. Dazu wurden bei Kanalkilometer 155 des MLK in einer Wendestelle auf der nördlichen Kanalseite die Auswirkungen von Schiffswellen auf die Gabionen untersucht. Der MLK ist ein Stehgewässer, das über Schleusen mit weiteren Kanälen und Flüssen verbunden ist, sodass die Wellen, die hauptsächlich erzeugt werden, von Schiffen bedingt sind. Die Fahrrinntiefe beträgt ca. 4 m. Durch die Befestigung am äußeren Rand der Wendestelle befinden sich die Gabionen ca. 100 m von der Fahrrinne entfernt. Die Wendestelle selbst besitzt die Form eines Trapezes und misst an den zur Fahrrinne parallelen Seiten 160 bzw. 60 m und ist 60 m lang. Die schräg verlaufenden Seiten sind geböscht und bepflanzt, die äußere Seite mit einer Spundwand versehen. Der Standort wurde ausgewählt, da er nicht in der direkten Schifffahrtsroute liegt und außerdem nur eine kurze Distanz vom Standort Marienwerder entfernt ist. Nach ordentlicher Anmeldung des Messvorhabens und Absperrung des Wendbeckens durch den der WSA zugehörigen Außenbezirks Lohnde konnten Messungen ohne Beeinträchtigungen für die Schifffahrt, durchgeführt werden. Der Messstandort ist in Abbildung 13 dargestellt.



Abbildung 13: Übersichtskarte sowie Satellitenbild des Gabione-Standortes und Aufnahmen der Wendestelle

## 5.1 Versuchsaufbau

Acht Gabionen wurden vom Standort Marienwerder auf Kanthölzern gelagert zur Wendestelle gebracht. Dort erfolgte der Einbau über die Böschung der Westseite. Die einzelnen Gabionen wurden über eine Holzrutsche ins Wasser gebracht, wobei auf eine geringe Auflagefläche und damit verbunden eine geringe Beschädigung des Wurzelwerks geachtet wurde. Nachfolgend wurden jeweils vier Gabionen zu quadratischen Feldern mit 2 m Kantenlänge verbunden. Karabiner und Spannseile wurden als minimalinvasive Befestigungsmöglichkeit genutzt. Die Gabionen wurden an ihren vier Eckpunkten an der am Ufer verlaufenden Spundwand beziehungsweise an einem dahinter verlaufenden Seil, das als Halteseil für Signalbojen diente, befestigt. Damit konnten die Inseln circa 2 m vor der Spundwand positionsstabil über die Versuchslaufzeit. Damit konnte eine positionstechnische Stabilität der Gabionen gewährleistet werden. Eine erste Insel während des Einbaus ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Wassertiefe an dieser Stelle ist weitaus geringer als die Fahrrinntiefe und beträgt ca. 2 m. Die ersten Schiffsdurchfahrten konnte das System ohne Ausfälle überstehen. Nachdem Schiffswellen das gespeicherte Sumpfgas aus den Gabionen ausgetrieben hatten wurden Probleme bezüglich der dauerhaften Schwimmfähigkeit ersichtlich. Aus diesem Grund wurden Fenderbojen an den Gabionen angebracht um als zusätzlichen Auftriebskörpern den Auftrieb trotz Wellenbelastung zu gewährleisten.



Abbildung 14: „Lebende Insel“ bestehend aus mehreren, verbundenen Gabionen während des Einbaus im Mittel-landkanal

Um die Wellendämpfung quantifizieren zu können wurden am Versuchsort die Wellenhöhen bei Schiffspassage sowohl mit als auch ohne davor platzierten Gabionen mit Kameras aufgenommen. Es wurde mit zwei Kameras „GoPro Hero 4“ mit einer Auflösung von 1920 x 1080 Px sowie einer Aufnahme rate von 30 Hz der Wellenauflauf passierender Schiffe dokumentiert. Der Messaufbau setzt sich aus Aluminiumprofilen zusammen, die über Schraubverbindungen kombiniert werden. Die Kamera ist, wie in Abbildung 15 dargestellt, parallel zur Pegellatte montiert und auf eine an der Spundwand platzierten 2 m langen Messlatte fokussiert.

Um den Neigungswinkel der Kameraaufnahmen zu minimieren, wird die Kamera auf minimaler Höhe über den erwarteten Wellenhöhen installiert. Die Messlatte ist auch an den Aluminiumprofilen fixiert. Zusammen wurde der Messaufbau in zweifacher Ausführung über Klemmen an Aufstiegseinrichtungen zur Seite des Wendebeckens befestigt. Das von den Kameras aufgenommene Bild zeigt die Messlatte, die Spundwand und die Wasserspiegellage. Diese erlauben eine berührungslose Analyse des Wasserstandes, wie im Folgenden dargestellt. Diese Analyse findet für jede Schiffspassage statt, um eine möglichst große Datengrundlage zu erhalten. Zusätzlich wurde ein Distometer waagrecht und in unmittelbarer Nähe zum Messstand auf der Uferstruktur positioniert. AIS-Schiffsdaten werden über ein Smartphone Applikation ausgelesen. Hiermit können sowohl Datum und Uhrzeit der Aufnahme, Schiffstyp und -name, die Schiffsdimensionen Länge, Breite und Tiefgang in Metern, die Geschwindigkeit in Knoten und etwaige Besonderheiten festgehalten werden. In Abbildung 15 ist der komplette Messeinbau mit Fender-verstärkten Gabionen sowie eine Aufnahme eines einzelnen Messstandes zu sehen.



Abbildung 15: Messstelle 1 & 2 mit und ohne vorgelagerten Gabionen im Wendebecken bei Kanalkilometer 155 (links) und einzelne Messstelle mit Aluminiumprofil mit Messlatte und Kamerasystem

## 5.2 Methodik zur Bildbearbeitung

Die kontaktlose Wasserstandsmessung mittels Fotoauswertung findet besondere Anwendung zur Kontrolle von Wassertanks und Fließgewässern. So werden Flusspegel als visuell-automatisierte Methoden zur Wasserstandsmessung eingesetzt. Hierbei werden die Wasserstände in Flüssen aufgezeichnet, sodass frühzeitige Hochwasserwarnungen ausgegeben, vollständige hydrologische Datenbanken angelegt und Schiffbarkeit überprüft werden können. Die visuelle Messung bietet dabei mehrere Vorteile gegenüber anderen Messmethoden wie Schwimmern, Druckdosen, Radarwellen oder Ultraschallsonden. So sind der geringere Einsatz von Messtechnik und damit verbunden die geringeren Kosten, der geringer Materialverschleiß/-bedarf, die geringe Datenaufarbeitungszeit, die geringe Störanfälligkeit der Messgeräte die Tatsache das keine zyklische Kalibrierung notwendig ist sowie das eine Fehlerüberprüfung mittels Video möglich ist zu nennen. Herausforderungen werden an die Methoden gestellt wenn sich Störkörper an Wasseroberfläche befinden, schlechte Witterungsbedingungen oder schlechte Lichtverhältnisse herrschen, bei starker Staubentwicklung, sowie bei Vibrationen. Außerdem sind große Speicherkapazitäten auf Grund der Datenmengen notwendig.

Die Datenbearbeitung ist an der Vorgehensweise von Yang et al. (2014) orientiert und wird im nachfolgenden für eine einzelne Kamera erläutert. Es werden die einzelnen Bilder aus dem Video extrahiert und bei

minimaler Pegelschiefstellung gedreht. Anschließend wird der Bereich der Pegellatte ausgeschnitten. Auf ein *Noise Signal Filtering* wird verzichtet, da dies nur bei Aufnahmen mit geringer Pixelanzahl nötig ist. In einer darauffolgenden Graustufenentransformation werden die Farbkomponenten *RGB* (*R* (Rot), *G* (Grün) und *B* (Blau)) in graustufige Pixel mit einer Helligkeit zwischen 0 bis 255 umgewandelt. Dabei steht die 0 für schwarz und die 255 für weiß. Die Transformation kann über eine einfache oder eine gewichtete Mittelung der drei Farbanteile erfolgen. In dieser Arbeit wird mithilfe des Softwareprogramms MATLAB ein gewichtetes Mittel als Leuchtdichte (anders: Luminanz, *Y*) des YIQ Modell, hier nicht weiter ausgeführt, abgebildet.

$$Y = 0.2989 \cdot R + 0.5870 \cdot G + 0.1140 \cdot B \quad (1)$$

Die Pixel der graugestuften Pegelbilder werden mithilfe eines morphologischen Algorithmus in ein Maximum (1) oder Nichtmaximum (0) transformiert. Dabei sind regionale Maxima, Werte die einen konstanten höheren Helligkeitswert als ihre acht Nachbarn aufweisen. Über einen nicht negativen Skalar kann ein Grenzwert für die Helligkeit eines potentiellen Maximums eingestellt werden. Dieser Schritt wird als *Extended Maxima Transformation* bezeichnet. Nachdem das Pegelbild in Binärzahlen abgebildet ist, werden sämtliche Nichtmaxima pro Bilder-zeile aufaddiert und als Histogramm dargestellt. Sobald zwei Zeilen untereinander die maximale Anzahl an Nichtmaxima erfüllen, ist davon auszugehen, dass die obere Zeile den Wasserstand darstellt. Abbildung 16 fasst die Bildbearbeitungsschritte zusammen. Zunächst wird der Pegel aus der Originalaufnahme geschnitten. Bei Schiefstellung der Pegellatte wird diese minimiert (1). Anschließend wird der Ausschnitt in Graustufen und dann in eine binäre Zahlenabfolge transformiert (2, 3). Die horizontale Auswertung der Nichtmaxima gibt abschließend an, auf welcher Höhe des Bildes der Wasserspiegel anzusetzen ist.

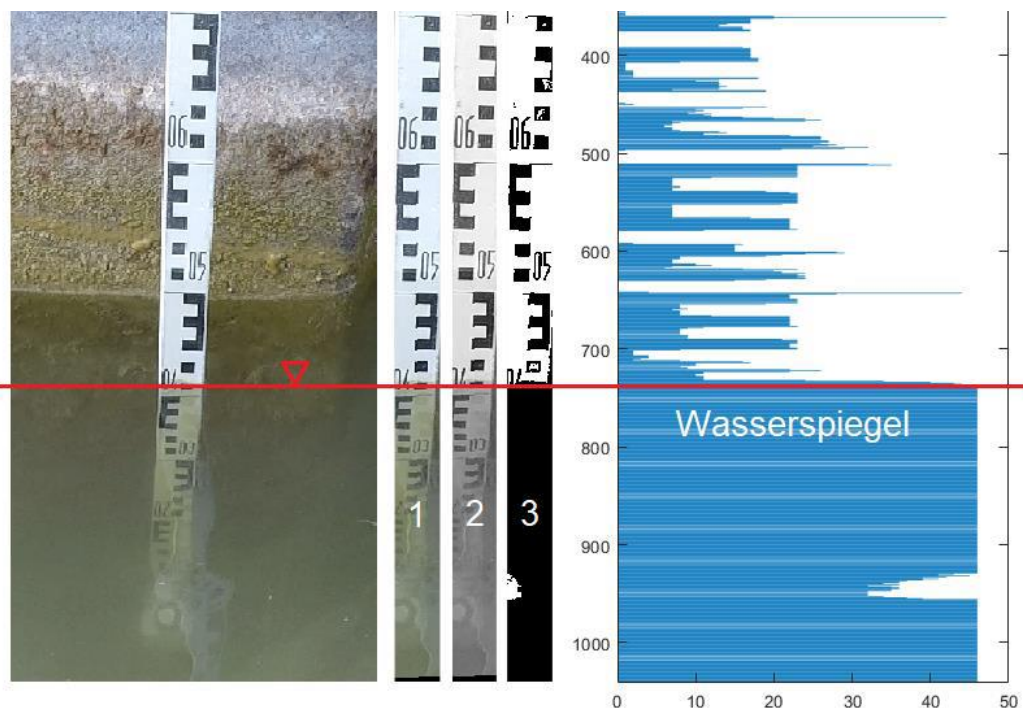


Abbildung 16: Extrahiertes RGB-Bild aus Original-Video (a), Graustufenbild (b) und Extended-Maxima-Transformation in ein Schwarz-Weiß-Bild der extrahierten Pegellatte unter Welleneinfluss (c). Nullpegelbestimmung über Pixelinformationen (d) mit roter Linie markiert (d)



Für die Pegelmessung werden in der Regel zwei Koordinatensysteme (KOS) angenommen. Ein globales KOS [Pixel] für das Bild und ein skaliertes KOS [cm] für die Pegellatte. An einem gemeinsamen Punkt ( $P_1$ ) der beiden KOS wird die Höhe zum Bildrand berechnet ( $G_0$ ). Die Differenz zwischen  $G_0$  und der Höhe vom Wasserspiegel zum gleichen Bildrand ( $G$ ) ergibt die Referenz-höhe ( $\Delta h$ ). Definiert man sich nun eine Gesamthöhe ( $H_0$ ) von einem definierten Pegellattennull-punkt ( $P_0$ ) bis zum Punkt  $P_1$  und zieht  $\Delta h$  ab, erhält man die Wasserspiegelhöhe  $H$  bezogen auf den Pegellattennullpunkt (Takagi et al., 1998). Hier ist jedoch nicht die Wasserspiegelhöhe auf einen Pegellattennullpunkt zu ermitteln, sondern die Auslenkung des Ruhewasserspiegels, sprich der Wellenamplitude  $a$ . Die Berechnung wird verkürzt, indem der gemeinsame Punkt ( $P_1$ ) genau auf den Ruhewasserspiegel gelegt wird:

$$a = \varepsilon \cdot (G_0 - G) \quad (2)$$

Die Abstände des globalen KOS werden über einen Umrechnungsfaktor  $\varepsilon$  in das skalierte KOS transformiert. Hierfür wird eine möglichst große Länge der Pegellatte ( $> 40$  cm) ausgewertet, um die Genauigkeit der Mittelung zu erhöhen (Takagi et al., 1998):

$$\varepsilon = d_l/d_g \quad (3)$$

Dabei ist  $d_l$  die Strecke auf der Pegellatte im skalierten KOS [cm] und  $d_g$  die äquivalente Länge im globalen KOS [Pixel] auf dieser Strecke. Für die Amplitudenberechnung gilt es abschließend den Ruhewasserspiegel zu ermitteln. Dies geschieht über eine Kalibrierungsmessung, die bei ruhigem Wasser täglich durchgeführt wurde. Kleinere Ungenauigkeiten während der Amplitudenberechnung können nicht verhindert werden, da die Kamera häufig aufgeladen werden muss, und sich damit unausweichlich die Position der Kamera verändert. Somit existieren zwar das globale und skalierte Koordinatensystem, der Abstand bei-der KOS und die damit einhergehende Lage des gemeinsamen Punktes ( $P_1$ ) (hier: Ruhewasserspiegel) ändert sich folglich minimal. Die Abweichung der beiden KOS kann durch entsprechende Nachjustierung der Kamera nach jedem Ladevorgang minimiert werden. Die Nachjustierung wird durch eine Livebildübertragung auf ein Smartphone optimiert.

### 5.3 Messwertaufbereitung

Nachfolgend wird die Messwertaufbereitung, d.h. die Methodik vom Rohwellenschrieb bis zur Bestimmung der Wellenhöhen dargestellt. Stellt man die Wellenhöhe über die Zeit dar, wird einen Wellenschrieb generiert. Zur Ermittlung der signifikanten Frequenzen innerhalb dieses Wellenschriebs wird für jedes Schiff eine Spektralanalyse durchgeführt. Bei Betrachtung des Energiedichtespektrums sind für die Schiffe drei Peaks erkennbar. Filtert man die drei Frequenzbereiche aus dem Wellenschrieb, kann der Peak bei  $\sim 0.4\text{--}0.6$  hz den Sekundärwellen zugeordnet werden. Der Peak für  $\sim 0.1\text{--}0.2$  hz beschreibt das Primärwellensystem. Der Peak für  $\sim 0.8\text{--}1.1$  hz kann nicht eindeutig zugeordnet werden. Die drei Bereiche können für fast alle aufgezeichneten Wellenschriebe bestimmt werden. Bei Betrachtung der Sekundärwellen in Abbildung 17 ist ersichtlich, dass der Schiffsbug die erste Wellengruppe generiert. Für einen Ablösewinkel der Bugwellen von  $19.47^\circ$  und einem Ablösepunkt am Hauptspantende des Schiffes werden die Bugwellen und die primäre Heckwelle bei einem Messabstand zum Schiff von ca.  $\sim 26$  m zum gleichen Zeitpunkt aufgezeichnet. Dies ist in Abbildung 17 zum Zeitpunkt 105 s ersichtlich. Dieser Zusammenhang kann durch eine einfache trigonometrische Funktion ermittelt werden. Die hintere Wellengruppe stellt die Sekundärwellen des Hecks dar. Die vermeintlichen Reflexionen treten ca. 10 s nach den eigentlichen Sekundärwellen auf. Mit einer Überschlagsrechnung für

die Wellengeschwindigkeit  $cw = \sqrt{gd}$  mit  $d$  als Flachwassertiefe ergibt sich eine Wellengeschwindigkeit von  $6 \text{ m/s}$  (Abdel-Maksoud & Rieck, 1996). Es handelt sich hierbei nicht um reflektierte Wellenanteile. Eine mögliche Erklärung sind ungebundene superharmonische Wellen, die sich aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten zu neuen Wellengruppen modellieren. Dieser Vermutung wird nicht weiter ausgeführt, bietet jedoch Potential für weitere Untersuchungen in der Zukunft.

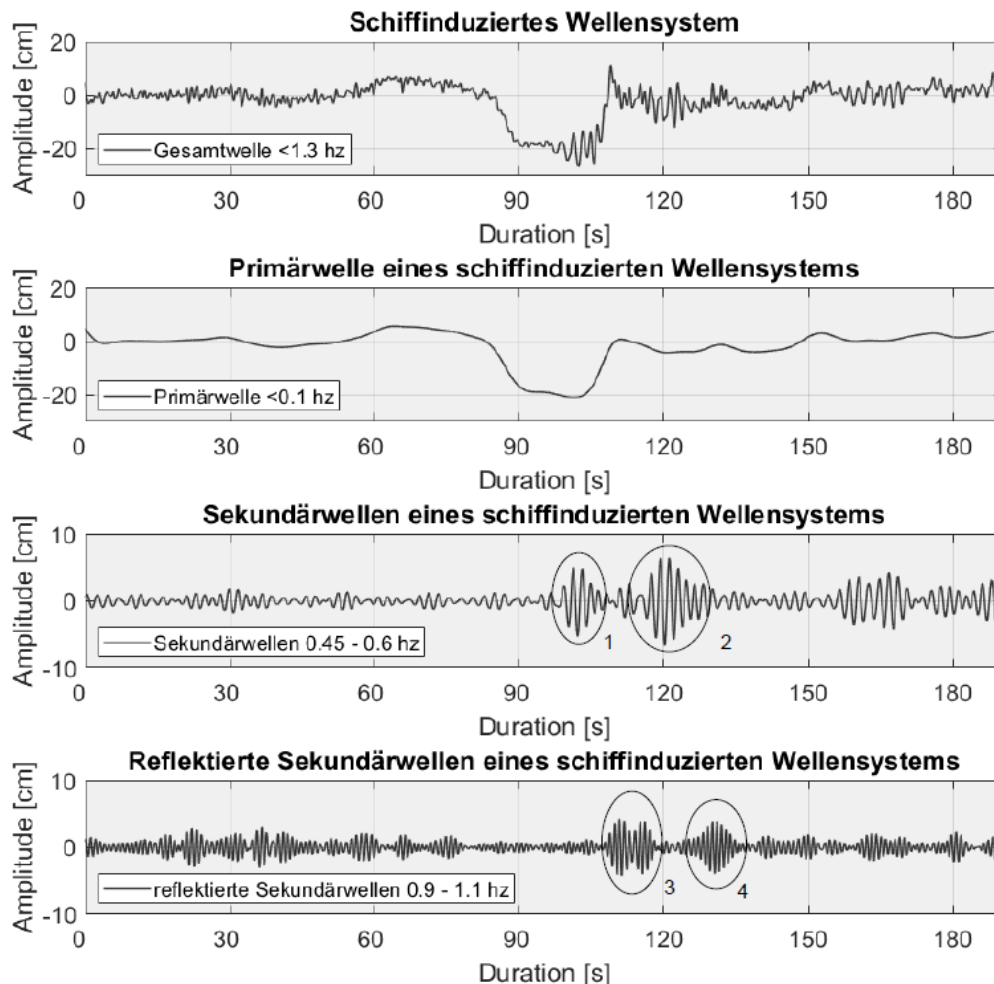


Abbildung 17: Die Darstellung der drei unterschiedlichen Frequenzbereiche stellt die unterschiedliche Wellentypen und ihre Überlagerung dar. Die Sekundärwellen werden durch den Bug (1) und das Heck (2) aufgezeichnet. Zusätzliche treten Wellengruppen mit größerer Frequenz auf. Ihre Generierung kann nicht eindeutig erklärt werden.

Es ist ein Low-Pass-Butterworth-Filter 1.Ordnung und ein Zero Phase Filter zur Darstellung der Primärwelle verwendet worden. Der Vorteil des Butterworth Filters ist, dass die Filterkurve horizontal verläuft und erst kurz vor der Grenzfrequenz abnimmt und somit die originalen Messdaten sehr gut widerspiegelt. Der Zero-Phase Filter durchläuft den Datensatz von vorne und anschließend von hinten, sodass der Phasenversatz nach der Filterung minimiert wird. Die Primärwelle wurde um ihre Abweichung zum Ruhewasserpegel versetzt, d.h. das Offset wurde bereinigt, wie in Abbildung 18 zu erkennen. Das Offset ist für die Auswertung der primären Wellenhöhen jedoch nicht relevant, da hierfür eine Differenz berechnet wird. Für die Sekun-

därwellen wird ein Band Pass Filter angewendet. Der Band Pass Filter ermöglicht es ein definiertes Band an Frequenzen aus dem Frequenzspektrum zu filtern. Die Bug- und Heckwellen des Sekundärsystems werden in der Auswertung als gemeinsame Sekundärwelle betrachtet.

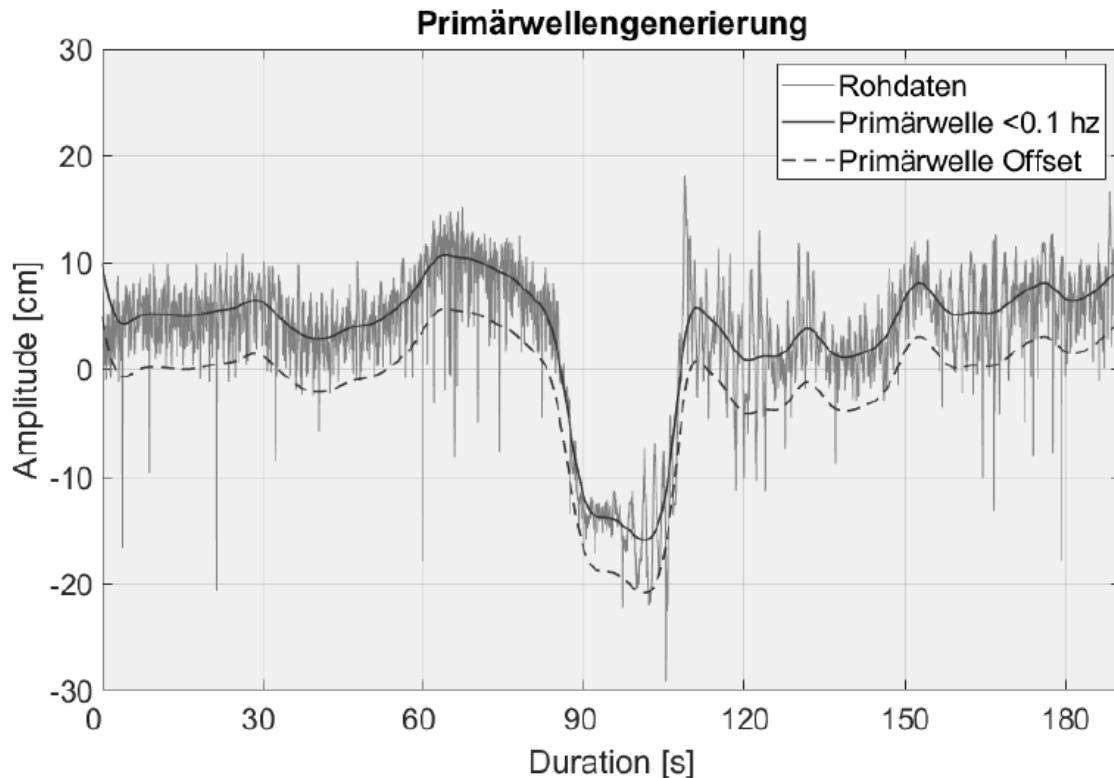


Abbildung 18: Die Primärwelle wird durch einen Low-Butter Filter 1.Ordnung und einem Zero-Phase Filter dargestellt.

Die primäre Heckwellenhöhe wird über eine Differenz bestimmt und orientiert sich dabei an der Heckwellenbestimmung nach der BAW (2010). Dies ist in Abbildung 19 ersichtlich. Um die Heckwellenhöhe zu bestimmen, wird ein Low-Pass-Butterworth-Filter 1.Ordnung angewendet mit einer Cut-off-frequency von 1.3 Hz angewandt. Hierdurch kann die Primär- und Sekundärwelle in einem Wellenschrieb überlagert dargestellt werden. Während der Filterung fällt auf, dass sich die Sekundär-Amplitudenhöhe abmindert, sobald sich der Bandbereich des Filters minimiert. Daraus ist ersichtlich, dass sich weitere Wellen mit ähnlicher Frequenz als Sekundärwellen superpositionieren. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, ist ein breiterer Bandbereich der Cut-off-frequency des Bandpass-Filters von 0.35 – 1.3 Hz für die Sekundärwellen gewählt worden, sodass die Gesamthöhe voll erfasst wird. Die maximale Wellenhöhe wird durch Zero-Down-Crossing bestimmt. Die so gewonnenen Daten sind für alle Schiffsdurchgänge aufgearbeitet worden um einen ersten Eindruck der Wellendämpfenden Wirkung der Schilfgabionen zu erlangen. Darüber hinaus konnten die ausgewerteten Wellenschriebe zur Bestimmung der Randbedingungen der Laborversuche im Großen Wellenkanal verwendet werden.



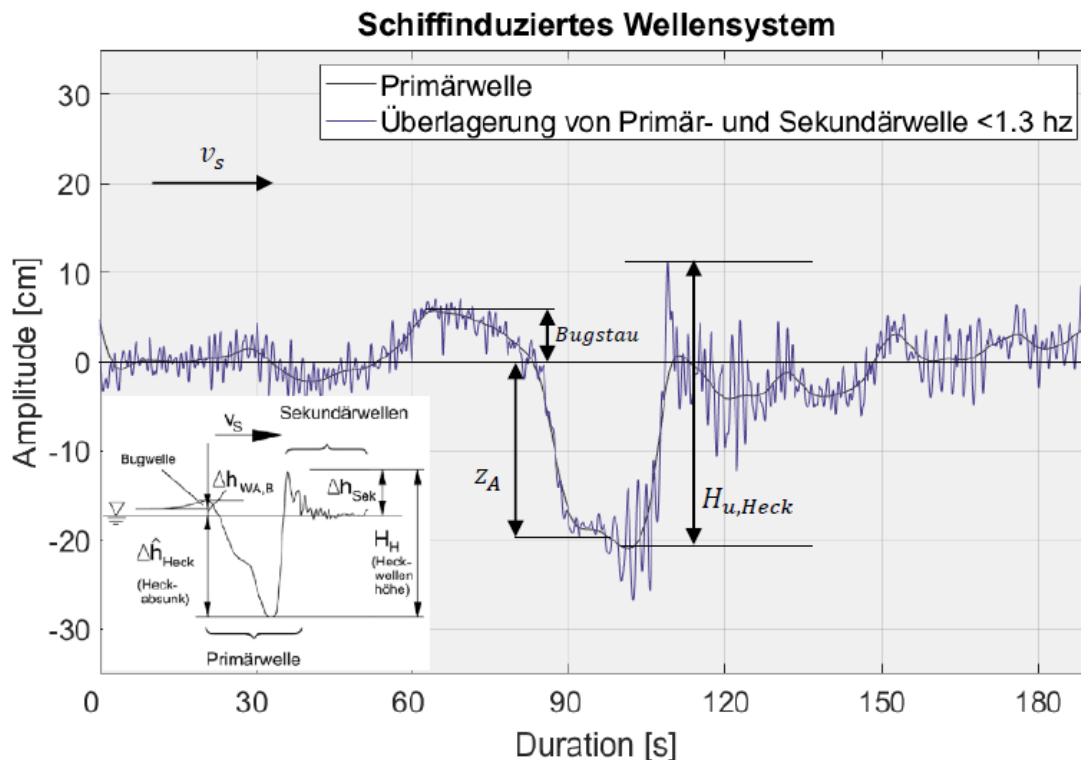


Abbildung 19: Die Heckwellenhöhe wird nach (BAW, 2010) ermittelt. Die Überlagerung von Primär- und Sekundärwelle wurde dabei wie die Primärwelle herausgefiltert

## 5.4 Ergebnisse

Während der Messreihe konnten insgesamt 74 Schiffsdurchfahrten beobachtet werden. Diese setzen sich aus verschiedenen Schiffstypen mit unterschiedlicher Beladung zusammen. Zusätzlich wurden auch Begegnungsfälle und Überholmanöver aufgenommen die z.T. für Extremereignisse verantwortlich sind. Mit dem in Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3 beschriebenen Verfahren wurden alle Schiffsdurchfahrten ausgewertet. Die größten Wasserspiegelauslenkungen treten dann auf wenn sich das primäre und sekundäre Wellensystem der Schiffe überlagern. Hier wurden maximale Wellenhöhen von 31,84 cm erfasst. Darüber hinaus konnten extreme sekundäre Wellenhöhen bei Sportbooten und im Begegnungsfall festgestellt werden. Hier wurden maximale Wellenhöhen von 23,3 cm, bzw. 42,2 cm erfasst. Stellt man die Wellenschriebe dieser Ereignisse dar, fällt auf, dass die Sportboote keinen signifikanten Absenk oder Wasserspiegelanspannung wie die klassischen Binnenschiffe aufweisen. Dafür entstehen deutlich größere Sekundärwellen, die sich mit der Annäherung an die kritische Schiffsgeschwindigkeit, und damit dem Zustand der Gleitfahrt, einstellen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden die maximal zu testenden Wellenhöhen für die Versuche im Großen Wellenkanal festgelegt. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Wellenhöhen und -perioden bezüglich der maximalen, primären sowie sekundären Wellen für Motorschiffe im beladenen und unbeladenen Zustand sowie für Sportboote zu finden. Primärwellen, wie z.B. in Abbildung 19, haben lange Periodendauern und können nicht durch schwimmende Wellenbrecher gedämpft werden. Aus diesem Grund sind lediglich die Sekundärwellen in die weitere Betrachtung mit eingeflossen.

Tabelle 1: Übersicht über die maximale Wellenhöhen und –perioden für das primäre und sekundäre Wellensystem von Motorschiffen im beladenen und unbeladenen Zustand sowie von Sportbooten.

Wellenhöhe [cm]	Motorschiff beladen	Motorschiff unbeladen	Sportboot
Primäres Wellensystem	31,84	11,78	-
Sekundäres Wellensystem	12,78	8,04	23,3

Wellenperiode [s]	Motorschiff beladen	Motorschiff unbeladen	Sportboot
Primäres Wellensystem	12,79	8,04	-
Sekundäres Wellensystem	1,56	1,71	1,9

Bezüglich der wellendämpfenden Wirkung der Gabionen konnte während der Naturmessungen kein einheitlich quantifizierbares Ergebnis erzielt werden. Dies ist zum einen auf die Witterung und vor allem der Sonnenstand zurückzuführen, welche eine große Rolle bei der Auswertung der aufgenommenen Videos spielen. Bei einigen Messungen wurde das Sonnenlicht stark von der Wasseroberfläche reflektiert so dass die Pegel-latte nicht mehr eindeutig für die Analyse zu erkennen war. Infolge dessen konnte nicht mehr eindeutig zwischen Reflektionen durch Sonnenlicht und den eigentlichen Schwarz-Weiß-Tönen unterschieden werden. Zum anderen war die Anzahl an eingesetzten Inseln im Verhältnis zu den auftretenden Wellenereignissen, verursacht durch die vorbeifahrenden Schiffe zu klein gewählt. So wurden die Inseln zum Teil überspült, was zu weiteren nicht auswertbaren Ergebnissen geführt hat. Dennoch ist die wellendämpfende Wirkung der Gabionen zu erkennen. In Abbildung 20 ist die Sekundärwelle eines Motorschiffes über die Zeit dargestellt. Dabei weisen die aufgenommenen Daten der Messstellen ohne davor gelagerte Gabionen leicht höhere Werte auf. Für die Sekundärwelle erkennt man eine leichte (ca. von 2500 bis 4500 Frames) bis sogar deutliche (ab ca. 5500 Frames) Dämpfung der ankommenden Wellen. Bei der Betrachtung muss der räumliche und zeitliche Versatz der Messreihen berücksichtigt werden.

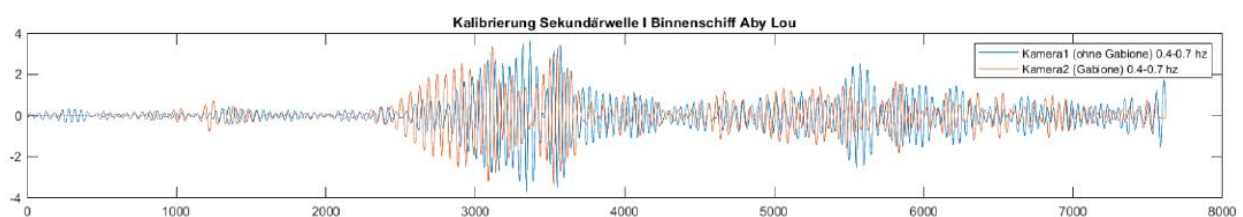


Abbildung 20: Sekundärwellen einer Motorschiffes über die Zeit (fps) welche die wellendämpfende Wirkung der schwimmenden Inseln andeuten.

Die biologischen Funktionen der Gabionen, hinsichtlich Beschattung des Wasserkörpers und Habitatfunktion, wurden im Rahmen der Versuche beobachtet. Allgemein können schwimmende Vegetationsstrukturen Wasservögeln als alternative Nistplätze dienen und eine hochwertige Alternative bieten wenn natürliche Standorte überflutet werden. So konnten Untersuchungen von Shealer et al. (2006) nachweisen, dass schwimmende Vegetationsstrukturen in Hochwasserjahren natürlichen Standorten vorgezogen wurden, da dort der Schlupferfolg und die Überlebensrate von Nestern signifikant höher ist. Aber auch andere Habitatstrukturen sind denkbar. So bietet der Wurzelraum sehr gute Nahrungsbedingungen für Fische sowohl für räuberische



Arten als auch Weidegänger. Bei den Versuchen im MLK wurde festgestellt, dass im Bereich um die Gabionen viele Fische anwesend waren. Darüber hinaus konnte ein Besatz der Inseln durch Reptilien wie Grasfrösche beobachtet werden. Auch konnte festgestellt werden, dass die trockenen Halme des Gabionenkörpers als Habitat für Insekten dienen. Insgesamt haben die Versuche im MLK bewiesen, dass schwimmende Vegetationsgesellschaften an großen Wasserstraßen eingesetzt werden können. Darüber hinaus lassen die Ergebnisse ein wellendämpfendes Verhalten der Gabionen erahnen, welches in Laborversuchen quantifiziert werden muss. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass ein Auftriebsverlust durch zu hohe und zu häufige Wellen einen dauerhaften Einsatz an Wasserstraßen in der momentanen Bauweise verhindert.

## 6 Versuche im Großen Wellenkanal

Die Laborversuche wurden vom 12.11.2018 bis zum 07.12.2018 im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste, einer gemeinsamen Einrichtung des Ludwig-Franzius-Instituts der Universität Hannover und des Leichtweiß Instituts der Technischen Universität Braunschweig, durchgeführt. Der GWK ist 307 m lang, 5 m breit und 7 m tief. Die hydraulisch angetriebene Maschinenwelle (900 kW) hat einen maximalen Hub von  $\pm 2,10$  m und kann Wellenhöhen bis 2,0 m erzeugen. Die erzeugten Wellen werden während der Ausbreitung entlang der Gerinne nicht abgemindert. Das Testfeld mit den Gabionen befindet sich zwischen den Kanalmetern 101.0 - 120.0. In Abbildung 21 eine Skizze des GWK, mit Wellenmaschine am linken Rand und dissipativen Strand am rechten Rand, dargestellt.

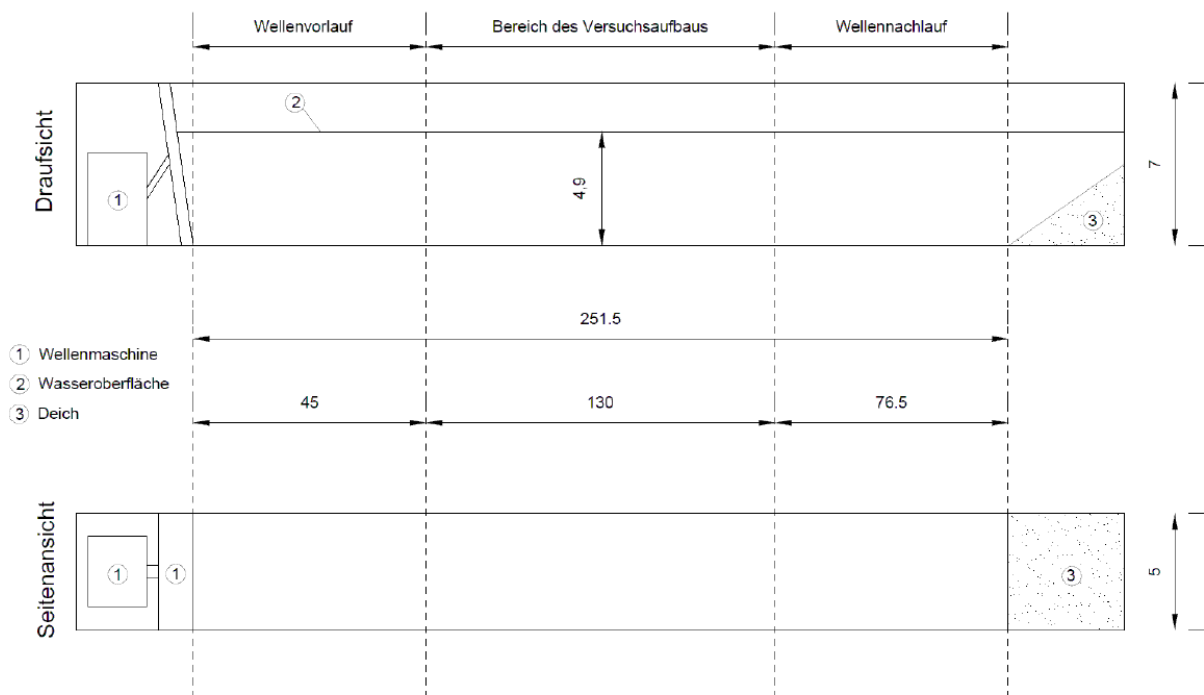


Abbildung 21: Darstellung des Großen Wellenkanals in Draufsicht und in Seitenansicht mit der Wellenmaschine auf der linken Seite (1) und dem dissipativen Strand auf der rechten Seite (3)

### 6.1 Versuchsaufbau

Das Dämpfungsverhalten einer einzelnen Gabione ist aufgrund der Größe des GWK nicht signifikant. Daher wurden zwölf Gabionen zu einer einzigen halbstarren Struktur oder „schwimmenden Insel“ verbunden. Die Verbindung erfolgte über elastische Expanderseile welche an jeder Gabione befestigt wurden. Diese Verbindung garantiert ungestörte Bewegungen für jeden einzelnen Gabione, lenkt alle Gabionen während und nach den Versuchen wieder in die Ausgangslage zurück. Die „schwimmende Insel“ bestand aus drei Reihen mit je vier Gabionen die in zwei Formationen orthogonal und parallel zur Wellenmaschine ausgerichtet wurden. Abbildung 22 ist eine Draufsicht des Versuchsaufbaus, mit Gewichtsankern (Grün), Bojen (Blau), Vertäuungsleinen (Gelb) und Expanderseil (rot), dargestellt. Wie die Versuche im MLK zeigten kann aufgrund

von unter Wellenangriff eingetragenem Sauerstoff und dem damit verbundenen Verlust von auftriebsrelevantem Sumpfgas keine dauerhafte Schwimmstabilität hergestellt werden. Um dies zu gewährleisten, wurden unter den Gabionen Platten aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum (XPS) befestigt. Die XPS-Platten haben eine Abmessung von 100 x 40 x 2 cm und eine Dichte von  $\sim 0,050 \text{ g/cm}^3$ . Das Material wurde gewählt, weil es robust, wasserabweisend und von geringer Dichte ist. Die physikalischen Eigenschaften der XPS-Platten ändern sich während der Versuche aufgrund des hydrophoben Verhaltens nicht. Die Maße des Materials wurden so gewählt, dass der Einfluss auf das hydrodynamische Verhalten des Gabionen minimal ist. Die XPS-Platten imitieren die natürlich auftretenden Sumpfgase unter der Struktur. Die Platte wurde mit Gewindestangen befestigt, die durch die Gabione geschoben und an vier Stellen gegengeschraubt wurden. Die Wurzelzone der Gabionen hat somit keinen weiteren Einfluss auf das Dämpfungsverhalten wird reduziert, da die XPS-Platten verdecken. Die angebrachte XPS-Platte unter einer Gabione ist in Abbildung 23 dargestellt

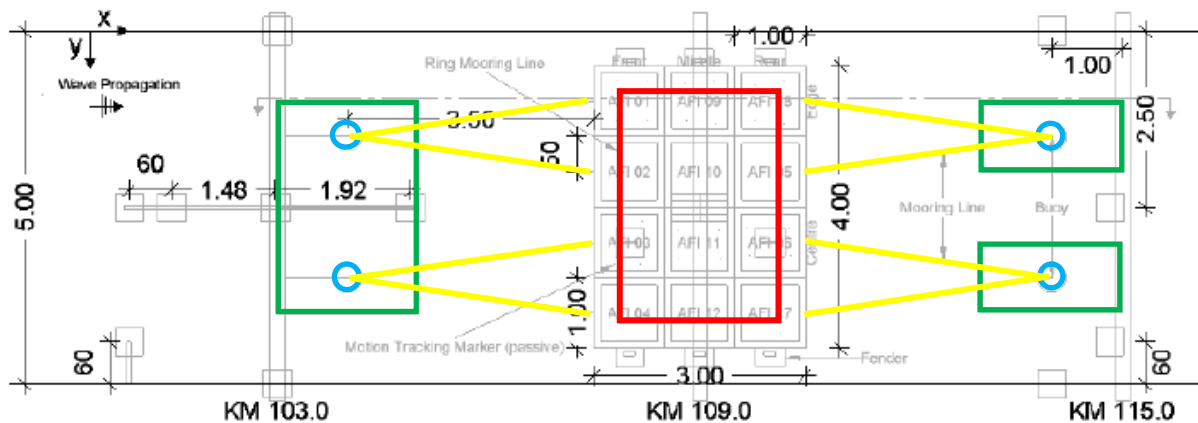


Abbildung 22: Maßstäbliche Draufsicht des Versuchsaufbaus mit Gewichtsan kern (Grün), Bojen (Blau), Vertäuungslinien (Gelb) und Expanderseil (rot).



Abbildung 23: Gabione mit XPS-Platte (links) und Detailansicht der mit Kontermutter und Gewindestab gesicherten XPS-Platte (rechts). Die bis zur Oberfläche vorstehenden Gewindestangen dienen zur Montage von passiven Markierungen für das Motion-Tracking-System.

Für die Gabionen wurde ein flexibles Verankerungssystem entworfen. Das Verankerungssystem ermöglicht eine größtenteils ungestörte Bewegung der Struktur während der Versuche. Von den Schwergewichtsankern welche, wie in Abbildung 22 in Grün dargestellt, vor und hinter der „schwimmenden Insel“ liegen laufen Stahlseile mit Ketten senkrecht hoch zu vier Reiterbojen. Von diesen Bojen wiederum laufen Expanderseile zur „schwimmenden Insel“. Die beiden Bojen vor der Struktur sind zusätzlich mit Halteseilen mit der darüber liegenden Querstange verbunden. Diese Verbindung strafft sich unter den Versuchen und wird aktiviert, wenn die Elastizität der Expanderseile in Wellenlaufrichtung überschritten wird. Dieses zusätzliche Verankerungssystem stellte sicher, dass die gesamte Struktur nicht unter die Ultraschallsensoren hinter der Struktur gedrückt wird. Durch die Kombination der steifen Drahtseile und Ketten in der Vertikalen (z-Richtung) und der elastischen Expanderseile in der Horizontalen (x-Richtung) wird der Einfluss des Verankerungssystems auf die Bewegung der Struktur minimiert. In Abbildung 24 ist das Verankerungssystem mit Reiterbojen dargestellt.



Abbildung 24: Reiterbojen die mit flexiblen Expanderseilen (gelb) mit der „schwimmenden Inseln“ verbunden sind sowie Halteseile (orange) (links); Ansicht eines Schwergewichtfundamentes mit Ankerseil aus Stahl und Kettengliedern bis zur Reiterboje (rechts).

Damit das Verhalten des BioSchWelle-Systems unter Wellenlast erfasst werden konnte, wurde der Versuchsaufbau mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Im Hauptprüffeld wurden sieben Ultraschallsensoren, vier Motion Tracking Kameras (MTCs), zwei Inertiale Messsensoren (IMUs), zwei Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) und zwei Kameras installiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 25 dargestellt.

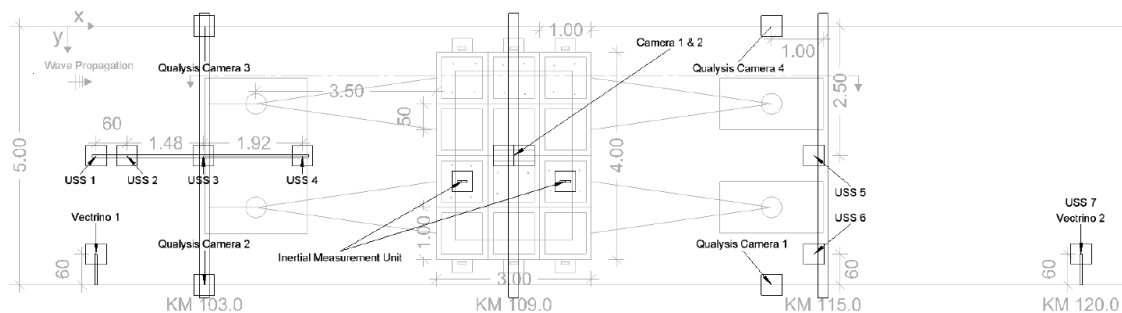


Abbildung 25: Messensorik mit sieben Ultraschallsensoren, vier Motion Tracking Kameras (MTCs), zwei Inertiale Messsensoren (IMUs), zwei Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) und zwei Kameras installiert.



Außerhalb des Hauptprüffeldes sind zehn kapazitative Wellenpegel installiert. Für die Versuche wurden die Daten der fest installierten, kapazitiven Wellenpegeln, auch Wellenharfengenannt, genutzt. Diese Sensoren bestehen aus zwei Elektroden, einen Messdraht und eine Erdungsplatte. Die elektrische Erdung erfolgt durch Aluminiumrohren. Ein eingetauchter isolierter Draht wirkt als Zylinderkondensator, dessen „Platte“ durch den Draht einerseits und das umgebende Wasser andererseits (mit der Isolierschicht als Abstand) gegeben ist. Die Eintauchtiefe ist hier proportional der Kapazität. Das bedeutet, dass die kapazitiven Wellenpegel den Spannungsabfall messen, der vergleichsweise zur Eintauchtiefe des Drahtes ist. Mit einer Änderung des Wasserstandes ändert sich auch die wirksame Plattengröße und damit die Kapazität. Das Messverfahren weist eine lineare Eichkurve (bei konstanter Isolierung) ohne Drifterscheinungen und geringere Störanfälligkeit gegen Temperaturänderungen und Verschmutzungen auf. Die Auflösung der Sensoren ist mit einem Fehler von unter 0,10 mm sehr genau. Um gesicherte Ergebnisse zu erzielen, wurden die Wellenpegel vor den Versuchen kalibriert. Zwei der Wellenpegel sind an der Wellenmaschine, sowie jeweils vier vor (bei Kanalmetern 50 – 60 m) und hinter (bei Kanalmetern 160 – 170 m) dem Hauptprüffeld mit den Gabionen angeordnet. Die vier Wellenpegel vor dem Hauptprüffeld werden zur Erfassung der ungestörten Wellen genutzt sowie zur Bestimmung der von den Gabionen aus reflektierten Wellen. Die vier Wellenpegel hinter dem Hauptprüffeld werden zur Erfassung der transmittierten, d.h. veränderten Wellen genutzt sowie zur Bestimmung der vom Strand aus reflektierten Wellen. Die Abstände von bis zu 50 m zum Hauptprüffeld wurden so gewählt das keine 2D-Effekte (z.B. Wirbelablösung, Seitenströmungen) die reflektierten und übertragenen Wellen während der Versuche beeinflussen. Zusätzlich wurden zur Messung der freien Oberflächenwasserhöhe sieben Ultraschallsensoren USS 20130 mit dem entsprechenden Verstärker ULS 40-D (General Acoustics, 24106 Kiel, Deutschland) genutzt. Die Ultraschallsensoren senden einen akustischen Impuls aus. Der ausgesandte Impuls wird von der Wasseroberfläche reflektiert und als Echo wieder empfangen. Diese Schallausbreitung wird gemessen, gemittelt und in ein Spannungssignal proportional zur Entfernung umgewandelt. Die Auflösung der Sensoren ist mit 0,36 mm angegeben. Die Aufnahmezeit beträgt 50 Hz. Der Messbereich liegt zwischen 200 und 1300 mm. Die Ultraschallsensoren benötigen keine Kalibrierung. Vier Ultraschallsensoren (USS 1 – 4) sind in einer Linie vor der Struktur positioniert. Die Anordnung ist so gewählt, das, ähnlich wie das Wellenpegelfeld vor den Gabionen, die einlaufenden Wellen und die von der Struktur reflektierten Wellen gemessen werden können. Die erste Ultraschallsonde ist auf dem gleichen Kanalmetern wie die erste ADV installiert. Somit können die Daten der ersten ADV mit den Daten der ersten USS verglichen werden. Eine weitere Ultraschallsonde (USS 5) ist kurz hinter der Struktur installiert, um Informationen über die transmittierte Wellen zu erhalten. Der Vergleich zwischen USS 5 und dem zweiten Wellenpegelfeld soll Aufschluss über Effekte geben, die dicht hinter der Struktur liegen. Eine weitere Ultraschallsonde (USS 6) ist in der Nähe der Kanalwand installiert, um Informationen über eine mögliche Seitenströmung um die Struktur herum zu erhalten. Die letzte Ultraschallsonde (USS 7) ist auf dem gleichen Kanalmetern wie das zweite ADV installiert. In Abbildung 26 sind die kapazitiven Wellenpegel und die Ultraschallsensoren dargestellt.



Abbildung 26: Gruppe von vier kapazitiven Wellenpegeln am Rand des GWK (links); Vier Ultraschallsensoren an Aluminiumprofilen vor dem Versuchsaufbau (rechts).

Um die Bewegung der „schwimmenden Inseln“ unter Welleneinfluss zu verfolgen, wurden vier Motion-Tracking Kameras (MTC), Oqus 600+, (QUALYSIS, 41105 Göteborg, Schweden) eingesetzt. Das Kamerasystem wurde via einer Stabkalibrierung kalibriert. Dabei wird ein Stab, bestehend aus zwei Markierungen, die in einem festen Abstand von 601,5 mm zueinander angeordnet sind, im Messvolumen bewegt, um die Positionen und Ausrichtungen der Kameras zu bestimmen. Darüber hinaus ist eine stationäre L-förmige Referenzstruktur im Messvolumen installiert. Diese definiert den Ursprung und die Ausrichtung des Koordinatensystems, das mit dem Kamerasystem verwendet werden soll. Das Messvolumen deckt den gesamten Bewegungsbereich der Struktur ab. Während des Wellenangriffs bewegt sich die Struktur unter den Stillwasserspiegel. Deshalb musste der Wasserstand für der Kalibrierung gesenkt werden. Die Kalibrierung wurde täglich überprüft. Die Kameras senden Infrarotsignale aus welche von passiven Markern reflektiert werden. Die Gewindestangen die zur Befestigung der XPS-Platten dienen auch zur Montage von passiven Markern für das Motion-Tracking-System. Die passiven Marker mit 12 mm Durchmesser sind mit einem ein Gewinde versehen was eine einfache Befestigung ermöglicht. Die Kameras erfassen das von den Markern reflektierte Infrarotlicht bei Wellenlängen um 800 - 1100 nm. Mit der Kalibrierung und den Information des aufgenommenen Infrarotlichts kann eine genaue Bestimmung der Markerpositionen im 3D-Raum erfolgen. In Abbildung 27 sind das kalibrierte Volumen und die darin enthaltenen einzelnen Gabionen dargestellt. Weiterhin wird durch die Darstellung der Kamerawinkel der abgedeckte Messbereich dargestellt.

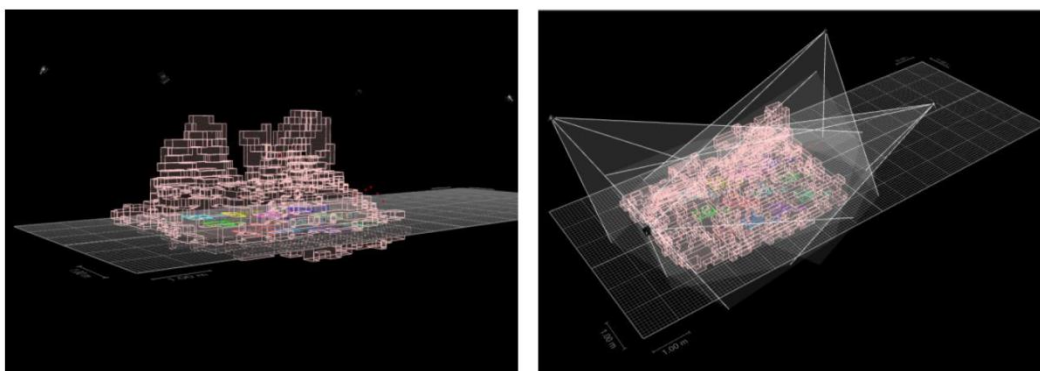


Abbildung 27: Kalibriertes Volumen der Motion-Tracking Kameras (links) mit einzelnen Gabionen (bunt); Dargestellte Kamerawinkel um kalibriertes Volumen (rechts).



Um Informationen über die Geschwindigkeit der Wasserpartikel vor und hinter der Struktur zu erhalten, wurden zwei akustische Doppler-Velocimeter (ADV) in der Nähe der Gabionen installiert. Zwei Vectrino Velocimeter (Nortek, 1351 Rud, Norwegen) wurden dazu eingesetzt. ADVs haben eine maximale Abtastrate von 200 Hz und eine Genauigkeit des Messwertes von  $\pm 1$  mm/s. ADVs nutzen den Doppler-Effekt, der eine berührungslose dreidimensionale Geschwindigkeitsmessung ermöglicht. Der Nenngeschwindigkeitsbereich wurde so gewählt, dass die minimale und maximale Wasserpartikelgeschwindigkeit einbezogen ist. Das erste ADV ist auf der gleichen x-Position wie das erste USS installiert. Die Daten sollten Informationen über die Kinematik der Anfangswellen liefern. Das zweite ADV wird hinter der Struktur installiert, um Informationen über die Kinematik der übertragenen Wellen zu liefern. Um zusätzliche Informationen über die Bewegung des Systems zu erhalten, wurden zwei Inertiale Messsensoren (IMU), OpenTag3 (Loggerhead Instruments, Sarasota, FL 34238 USA), in der Mitte einer der vorderen und hinteren Gabionen installiert. Die Einheiten haben ein Trockengewicht von 110 g. Durch integrierte Beschleunigungssensoren (g), Gyroskope (Grad/Sekunde) und Magnetometer (microTesla) sind sie in der Lage, dreidimensionale Zeitverläufe aufzuzeichnen. Diese Bewegungsdaten haben eine Abtastrate von 50 Hz. Das Koordinatensystem der IMUs ist gleich dem globalen Koordinatensystem des Versuchs. Darüber hinaus wurden zwei Kameras mit einer Auflösung von 640 x 480 und einer Erfassungsrate von 24 fps installiert, um die Versuche zu überwachen und eine Plausibilitätskontrolle während der Datenanalyse zu ermöglichen.



Abbildung 28: Versuchsaufbau in einer perspektivischen Ansicht mit Teil des Motion-Tracking Kamerasystem oben-links im Bild und blauen Fenderbojen sichtbar im Wasser.

Die gesamte Messtechnik wird über verschiedene Trigger gesteuert um synchronisierte Daten zu erhalten. Dies ist in Abbildung 29 dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung sieht man eine Übersicht über die Messgeräte sowie die angeschlossenen Messcomputer. Auf der rechten Seite der Abbildung ist das „trigge-

ring", bzw. das Auslösen der einzelnen Systeme genauer dargestellt. Über diesen Systemaufbau konnte eine synchrone Aufnahme und Speicherung der Daten gesichert werden. Da die Ultraschallsonden einen internen Versatz von 0,072 s aufweisen werden alle Signale um diese Reaktionszeit verschoben. Das heißt, dass ein Triggersignal mit der Länge der Reaktionszeit an den Messrechner gesendet wird. Die steigende Flanke des Triggersignals startete die Aufzeichnung der USS und ADVs. Nach 0,072 s beginnt die Aufzeichnung der Wellenpegel mit der abnehmenden Flanke des Triggersignals. Das Motion-Tracking-System wird über eine einzelne LED-Lampe im Blickfeld der Kameras ausgelöst. Dabei wurde das Motion-Tracking-System vor allen anderen Systemen gestartet. Nach dem Auslösen von USS und ADV wird die LED-Lampe aktiviert. Die Zeitdifferenz zwischen dem Ende des Triggersignals und der Aktivierung der LED-Lampe wird berechnet. Um die berechnete Zeitdifferenz werden die Daten des Motion-Tracking-System mit den anderen Daten synchronisiert. Die generierten Wellen basieren auf den Daten der MLK-Versuche wie in Kapitel 5 dargestellt. Die gewählten Wellen wurden mit einen Fokus auf die Sekundärwellen von Sportbooten und Binnenschiffen ausgewählt. Zusätzlich zu den kurzen regulären Sekundärwellen werden auch lange reguläre Primärwellen getestet. Insgesamt sind Wellen mit Perioden von 1,5 s bis 8,0 s und Höhen zwischen 0,10 m und 0,30 m getestet worden. Wie in Vorversuchen beobachtet, überlagern sich Sekundär- und Primärwellen. Dieses Verhalten wird während der Versuche durch bichromatische Wellen berücksichtigt. Die bichromatische Welle ist eine Überlagerung einer Kurz- und einer Langwelle. Der Wellenaufbau wird durch JONSWAP-Spektren für verschiedene Spitzenzeiten und Wellenhöhen erweitert. Die Spektren sollten die Dämpfungsergebnisse für die regelmäßigen Wellenversuche bestätigen. Es wird angenommen, dass kleine Wellen innerhalb der Spektren gedämpft werden.

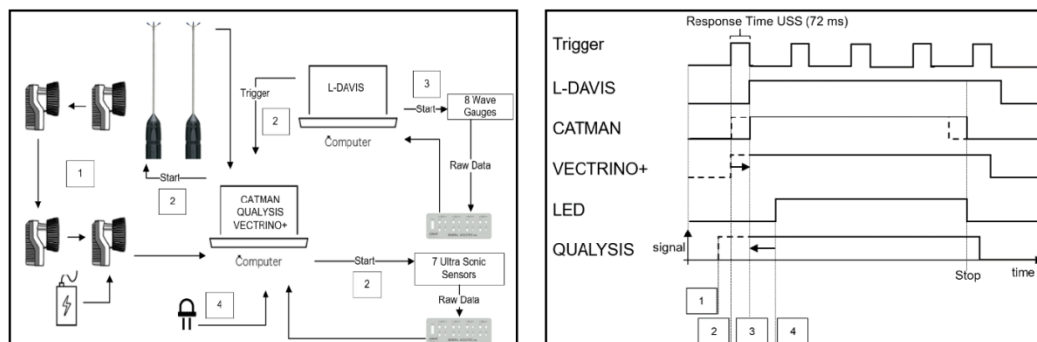


Abbildung 29: Übersicht über die Messgeräte sowie die angeschlossenen Messcomputer (links); Übersicht über das Auslösen („Triggern“) der einzelnen Systeme.

## 6.2 Auswertemethodik

In den folgenden Abschnitten ist die Methodik zur Bestimmung der Reflektion, Transmission und positionstechnische Stabilität der Gabionen genauer erläutert.

### 6.2.1 Reflektion

Zur Ermittlung eines Reflexionskoeffizienten wird das Verhältnis von reflektierter  $H_r$  und initialen Wellenhöhe  $H_i$  angegeben. Die Reflexionseigenschaften eines schwimmenden Systems hängen vom Tiefgang und der Breite der Struktur ab. Zusätzlich hat der Querschnitt einer schwimmenden Struktur einen großen Ein-

fluss auf die Reflexionseigenschaften (Abul-Azm & Gesraha, 2000; Williams et al., 2000). Eine Reflexionsanalyse der gemessenen Ultraschalldaten ist erforderlich um den Reflexionskoeffizienten zu bestimmen. Dabei werden Messungen an mindestens zwei Stellen mit bekanntem Abstand zueinander durch. Durch Messungen an mehreren Standorten können verschiedene Kombinationen von Wellen verglichen werden, um eine höhere Genauigkeit bezüglich des Reflexionskoeffizienten zu erreichen (Mansard & Funke, 1980). Um die einzelnen Zeitreihen der initialen und reflektierten Wellen aus dem gemeinsamen Wellensignal zu erhalten ist eine Phasenverschiebung (engl. „phase-shifting“) erforderlich. Dabei wird zwischen den Signalen der initialen Wellen welche in Phase laufen und den reflektierten Wellen, welche entgegengesetzt laufen, unterschieden (Frigaard & Brorsen, 1993). Diese Phasenverschiebung kann im Frequenzbereich (Goda & Suzuki, 1976; Mansard & Funke, 1980; Baldock & Simmonds, 1999) oder im Zeitbereich (Frigaard & Brorsen, 1993) durchgeführt werden. Hier, wird die Reflexionsanalyse im Frequenzbereich durchgeführt und der Reflexionskoeffizient  $C_T$  dargestellt:

$$C_R = a_r/a_i \quad (4)$$

dabei ist  $a_r$  die Signalvarianz der reflektierten Oberflächenauslenkung und  $a_i$  die Signalvarianz der initialen Oberflächenauslenkung. Die Oberflächenauslenkung welche mit den USS aufgenommen wird kann somit zur Bestimmung der Reflexionskoeffizienten der Gabionen via Reflexionsanalyse im Frequenzbereich genutzt werden. Mit der Reflexionsanalyse können Reflexionskoeffizienten für jede Kombination zwischen zwei USS im USS-Feld erzeugt werden. Die Datenreihe der Oberflächenauslenkung wird um ihren Offsetwert bereinigt. Um diesen Wert für jeden Datenpunkt zu erhalten, wird eine mathematische Optimierungsmethode, mit deren Hilfe für eine Reihe von Messdaten die unbekannt Parameter ihres geometrisch-physikalischen Modells oder die Parameter einer vorgegebenen Funktion bestimmt oder geschätzt werden sollen, angewandt. Es wird ein „polynomial least-square fitting“ der achten Ordnung berechnet. Die Differenz zwischen den Roh- und Anpassungsdaten wird als Offsetwert verwendet. Eine abschließende Glättung der Datenreihe erfolgt durch einen „moving-average filter“. In Abbildung 30 ist eine beispielhafte Darstellung der Rohdaten und der gefilterten, um das Offset-bereinigten Daten dargestellt.

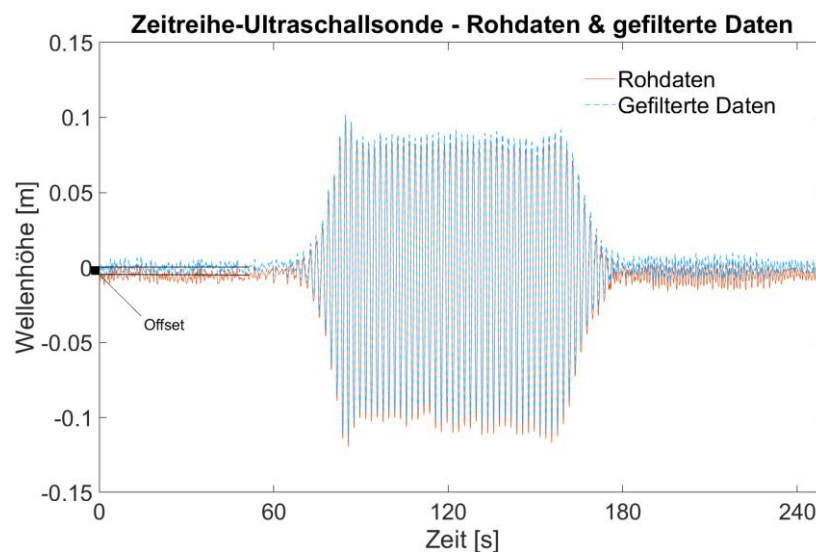


Abbildung 30: Darstellung einer beispielhaften Zeitreihe einer Ultraschallsonde. Vergleich zwischen den Rohdaten und um das Offset bereinigten und gefilterten Daten.

Für die Reflexionsanalyse werden nicht alle Wellen genutzt. Durch Reflexionen von vorherige Wellen veränderte Wellen können so aus der Analyse ausgeschlossen werden. Wenn die Kammhöhe einer Welle mehr als die Hälfte der eingestellten Wellenamplitudenhöhe erreicht, wird der folgende Wellenkamm mit den gleichen Kriterien als Startwert gesetzt. Das Kriterium der Abfolge von zwei Wellen wird verwendet um Fehler zu minimieren. So kann ein Einzelwellenereignis nicht als Startwert identifiziert werden. Der Endpunkt der genutzten Datenreihe wird nicht gesetzt, sondern berechnet. Für eine konstante Anzahl von 40 Wellen je Versuch und eine Abtastrate von 100 Hz kann die Länge der relevanten Datenpunkte für verschiedene Wellenperioden berechnet werden. Während der Datenverarbeitung können am Ende der Datenreihe die vom Strand reflektierten Wellen erkannt werden. Um den Einfluss dieser Reflexionen zu reduzieren, wird der Datensatz um eine je Versuch individuell definierte Anzahl von Wellen reduziert. Der entsprechende Datensatz wird als finite Sequenz  $f(t)$  für die Reflexionsanalyse importiert. Die erwähnten Analyseprozesse und Anzahl an reduzierten Wellen sind in Abbildung 31 zusammengefasst.

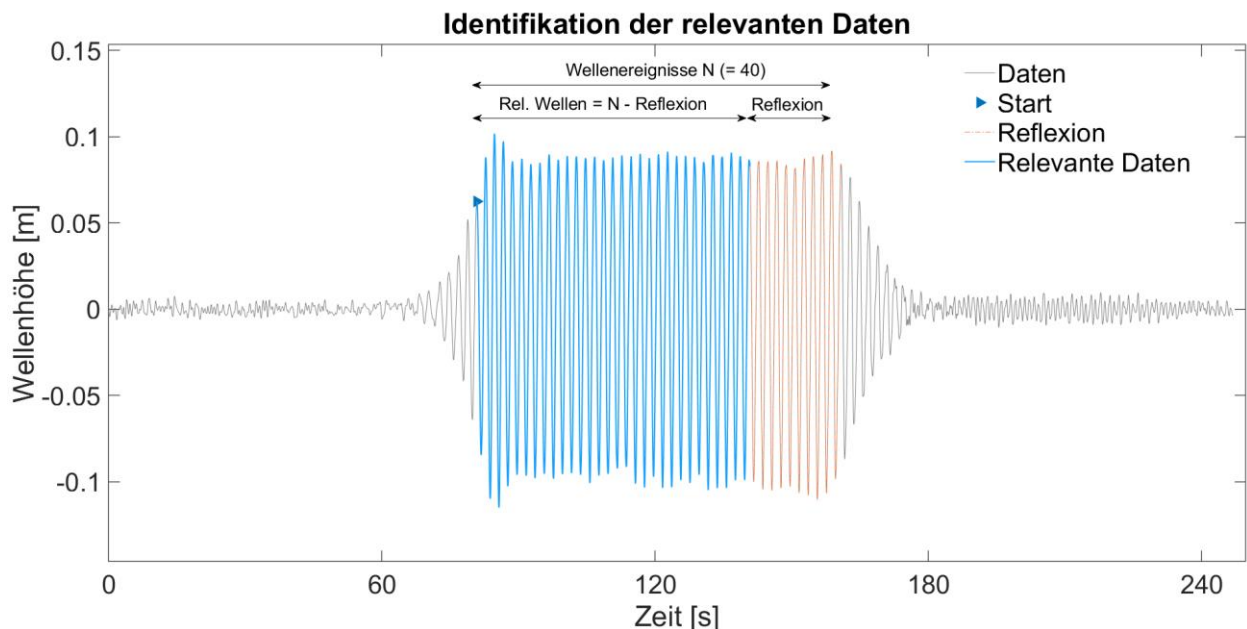


Abbildung 31: Darstellung der Analyse bezüglich der relevanten Wellenereignisse. Nur Wellen ohne Reflexionsbeeinflussung werden genutzt.

### 6.2.2 Transmission

Bei der Transmissionsanalyse werden die vorderen und hinteren, d.h. transmittierten Wellengruppen miteinander verglichen um den Transmissionskoeffizienten  $C_T$  zu berechnen. Dieser wird über die folgende Gleichung berechnet:

$$C_T = H_t/H_i \quad (5)$$

wo  $H_t$  für die transmittierte Wellenhöhe und  $H_i$  für die initiale Wellenhöhe steht. Dabei muss allerdings beachtet werden das  $C_T$  von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig ist (Christian, 2000). So ist:

$$C_T = f\left(\frac{H}{L}, \frac{W}{L}, \frac{d}{h}, \frac{h}{H}, \frac{M}{\gamma BWd}, \frac{I}{MW^2}, \frac{D_G}{d}, \frac{k_m W}{Mg}\right) \quad (6)$$

wobei  $H$  = Wellenhöhe,  $L$  = Wellenlänge,  $B$  = Breite der schwimmenden Struktur normal zur Wellenausbreitungsrichtung,  $d$  = Tauchtiefe,  $h$  = Wassertiefe,  $M$  = Masse der schwimmenden Struktur,  $\gamma$  = spezifisches Gewicht der schwimmenden Struktur,  $I$  = zweites Trägheitsmoment,  $D_G$  = Schwerpunkt der schwimmenden Struktur und  $k_m$  = Steifigkeit des Ankersystems. Die wichtigsten Parameter dabei sind die relative Länge  $\frac{W}{L}$  und auf die relative Tiefe  $\frac{d}{h}$  (Mani, 1991; Koutandos et al., 2005). Für die Ermittlung des Transmissionskoeffizienten werden im Versuch für die vorderen, oder initialen Wellen die Daten der Ultraschallsonden welche schon in der Reflexionsanalyse zum Einsatz kamen genutzt. Für die transmittierten Wellen werden die Daten der hinteren Wellenharfengruppe verwendet. Die Daten der Wellenharfe werden gegenüber den Daten der kurz hinter der Struktur angebrachten Ultraschallsonden bevorzugt, da die 2D-Effekte im Abstand zur Struktur in diesen Daten nicht mehr vorhanden sind. Das bedeutet, dass lokale Effekte dicht hinter der Struktur, wie Wirbelbildung und Umströmungen, nicht die Messung beeinträchtigen können. Die Rohdaten des Wellenmessgeräts werden aufgrund des geringen Signal-Noise-Ratio stärker vorverarbeitet und gefiltert als die Daten der Ultraschallsonden. So wird analog zu den USS-Daten das Offset bereinigt. Es wird ein Lowpass-Filter verwendet zweiter Ordnung mit einer Cutoff-Frequenz von  $0,04 \pi$  rad/sample verwendet. Der Lowpass-Filter ist als ein Nullphasenfilter implementiert, der die Daten in entgegengesetzte Richtungen filtert, um den Effekt der Phasenverschiebung auf der x-Achse zu negieren [Gustafsson, 1996]. Die Identifikation der relevanten Wellenereignisse findet analog zu Kapitel 6.2.1 statt. Die Daten der initialen- und transmittierten Wellen werden in der Länge gleichgesetzt und verglichen. Die Wellenhöhen und -perioden werden für jede einzelne Welle verglichen. Die Wellenperiode, Wellenhöhe, Wellenlänge, Amplitude, Wellengeschwindigkeit und Beschleunigung wird für jede initiale- und transmittierte Welle auf Grundlage der Dispersionsrelation und der zweiten Stokes Order Theorie berechnet. Alle diese Berechnungen werden auch für die Mittelwerte durchgeführt. Damit wird der Transmissionskoeffizient für die einzelne initialen- und transmittierten Wellen berechnet. Alle Prozesse bei der Analyse der Daten für den Transmissionskoeffizienten sind in Abbildung 32 zusammengefasst.

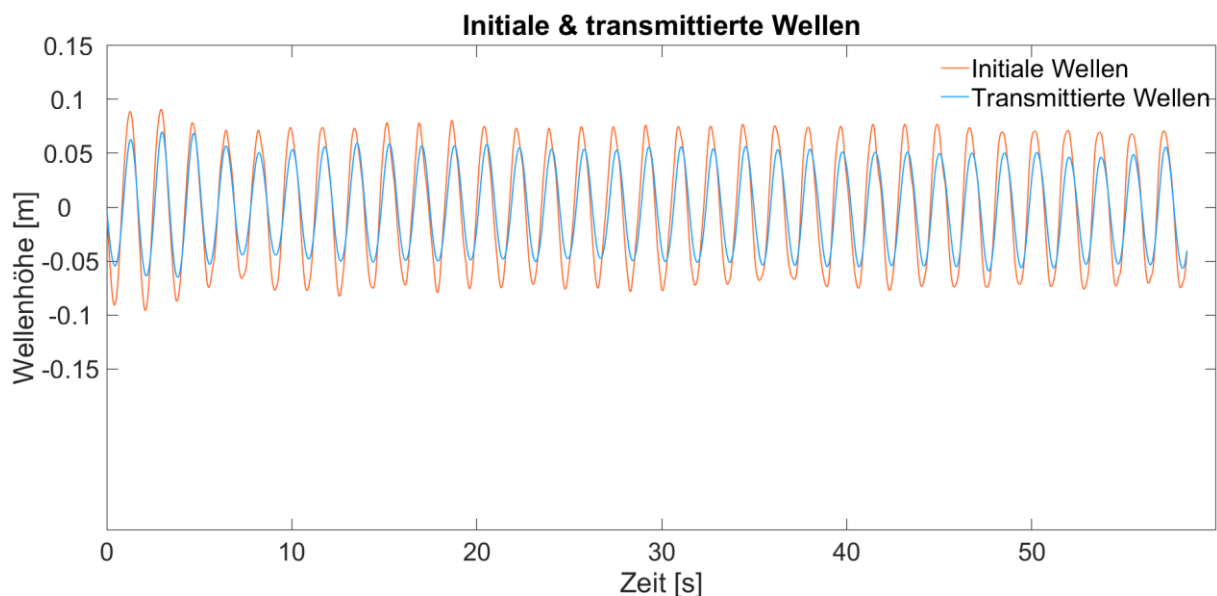


Abbildung 32: Initiale und transmittierte Wellen über die Zeit dargestellt

### 6.2.3 Positionsstabilität der Gabionen

Die Daten des Motion-Tracking-Systems QUALYSIS werden hinsichtlich der Position der einzelnen Marker, bzw. der einzelnen Gabionen, analysiert. Das von den Kameras ausgesendete Infrarotsignal wird von den passiven Markern zurückgeworfen und führt zu einer 2D-Ansicht des Messraumes für jede Kamera. Die Bilder werden zu einem 3D-Bild kombiniert. In dieser Ansicht werden die erkannten Marker mit roten Punkten dargestellt. Darüber hinaus werden Störsignale erfasst die manuell identifiziert und aus der Analyse ausgeschlossen werden müssen. Diese Störsignale entstehen auf dem Wasser, in brechende Wellen und auf den Gabionen die das Infrarotlicht der Kamera, wie die passiven Marker, reflektieren. Innerhalb eines einzigen Versuchs von 300 s werden insgesamt bis zu 80.000 Objekte erkannt. Von diesen Objekten müssen die 24 bis 48 Trajektorien der auf den Gabionen befindlichen Marker identifiziert und markiert werden. Ein einzelner Frame mit allen erkannten Objekten, Marker und Störsignale, (rot) neben den relevanten passiven Markern (grün) ist in Abbildung 33 dargestellt.

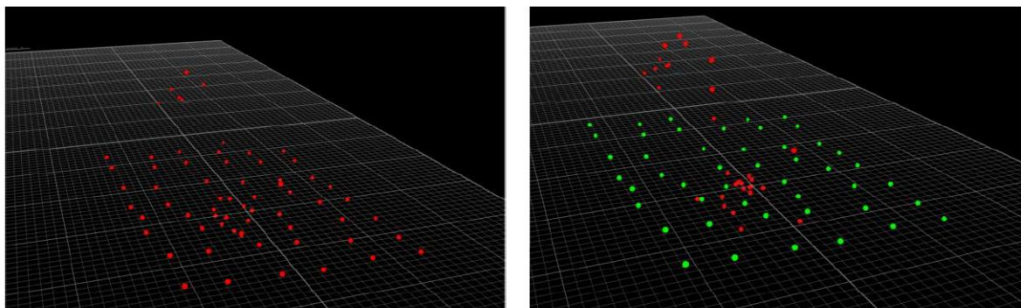


Abbildung 33: Einzelner Frame einer 300 s langen Messung mit roten, unidentifizierten Markern und Störsignalen (links) und identifizierte grüne Marker neben den Störsignalen (rechts).

Die identifizierten Trajektorien der Marker können zu starren Körpern verbunden werden. Dies erlaubt die programminterne Berechnung der sechs Freiheitsgrade. Auch bei dem temporären Verlust eines Markers können diese Daten noch bestimmt werden. Für jeden starren Gabionenkörper wird ein eigenes lokales Koordinatensystem bestimmt. Dieses lokale Koordinatensystem ist standardmäßig in der geometrischen Mitte der Marker, d.h. der Mitte der Gabionen, platziert. Das lokale Koordinatensystem, bezogen auf das globale Koordinatensystem, wird zur Berechnung der Bewegung der gemessenen starren Körper verwendet. Dabei haben alle lokalen Koordinatensysteme eine Ausrichtung und einen mit dem Referenzkoordinatensystem ausgerichteten und bekannten Standort, so dass keine weitere Transformation der lokalen Koordinatensysteme erforderlich ist. In Abbildung 34 sind die erzeugten starren Körper sowie weiterhin vorhandene Störsignale dargestellt.

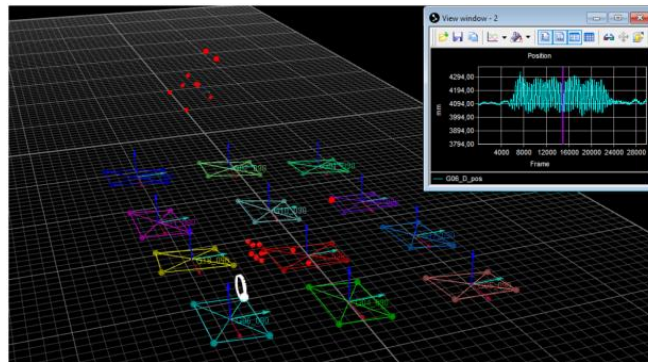


Abbildung 34: Aus Trajektorien erzeugten starren Körper (bunt) sowie weiterhin vorhandene Störsignale (rot);

## 6.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Transmission, Reflexion, Dissipation und Positionsstabilität der Gabionen sind im Folgenden dargestellt.

### 6.3.1 Transmission

Aufgrund des hohen Einflusses der Wellenperiode werden die Ergebnisse bezüglich des Transmissionskoeffizienten  $C_T$  über die Wellenfrequenz  $f$  und die Wellenzahl  $k$  dargestellt. In Abbildung 35 sind die Ergebnisse für die erste (Wellenzahl = 1255) und zweite Formation (Wellenzahl = 1443) zusammen als Streudaten dargestellt. Beide Formationen zeigen sehr ähnliche Ergebnisse. Der Längenunterschied zwischen beiden Formationen ist in Bezug auf die Wellenlänge zu klein, um signifikante Veränderungen der Ergebnisse anzuzeigen. Dies bedeutet, dass andere Parameter wie die Trägheit, die Porosität oder die Eintauchtiefe der Struktur für die Transmission dominant sind. So werden während der Analyse beide Datensätze zusammengefasst und als zusammengesetztes Testereignis dargestellt. Eine erste Hochrechnung der Daten kann veranschaulicht werden. Die Streudaten geben einen ersten Eindruck bezüglich der Transmissionskoeffizienten der Gabionen. Wellen mit niedrigen Frequenzen ( $f < 0,35$ ) werden zu 100 % übertragen und nicht durch die Gabionen behindert ( $C_T = 1,0$ ). Bei mittleren Wellenfrequenzen ( $0,35 < f < 0,50$ ) ist zu erkennen, dass die Übertragung um circa 10 % abnimmt ( $C_T = 0,9$ ). Der letzte Frequenzbereich ( $0,50 < f < 0,70$ ) zeigt eine hyperbolische Abnahme um 40 - 50 % ( $C_T = 0,4 - 0,5$ ). Auffallend ist auch, dass die Streuung von  $C_T$  mit zunehmender Frequenz zunimmt. Dies ist bei Datensätze mit kurzen Wellen auf die geringere Reflexion des Strandes und die damit verbundene steigende Anzahl an unbeeinflussten Wellen zurückzuführen. Die damit verbundene Mehrzahl an Datenpunkten führt automatisch zu einer höheren statistischen Abweichung. Darüber hinaus wirken sich kürzere Wellen negativ auf die Klassifizierung der einzelnen Wellen vor und hinter der Struktur aus, da das Risiko von Welleninstabilität und Wellenverformung höher wird.

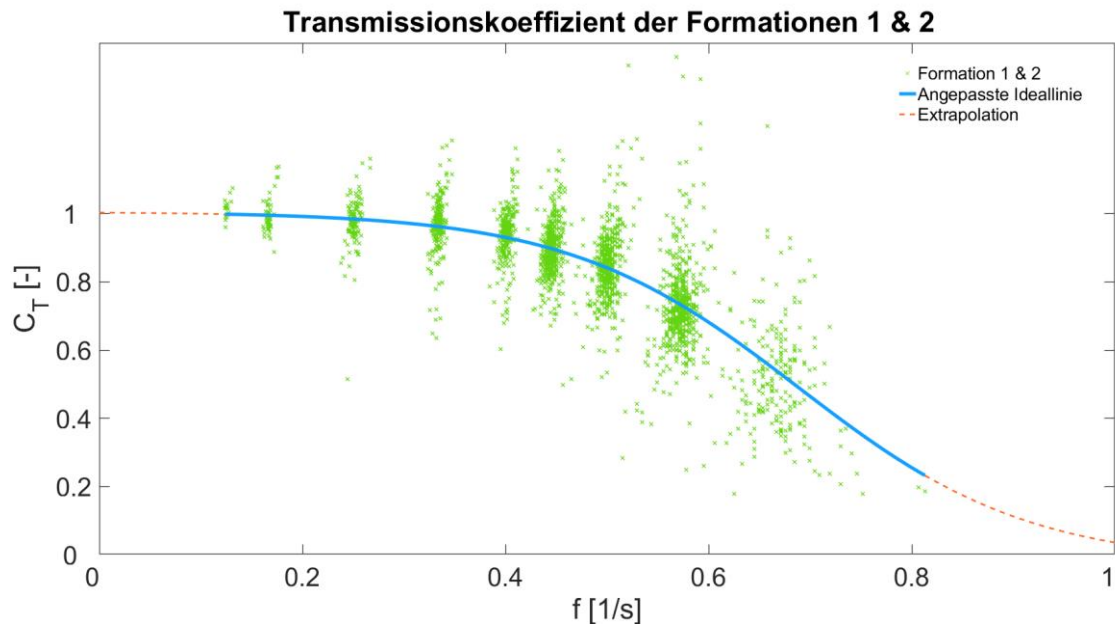


Abbildung 35: Darstellung des Transmissionskoeffizienten  $C_T$  für Formation 1 und 2

Neben der Wellenperiode hat auch die Wellenhöhe einen Einfluss auf den Transmissionskoeffizienten  $C_T$ . Um dies zu verdeutlichen wird der Median von  $C_T$  der einzelnen Tests mit gleicher Wellenhöhe und gleicher Periode berechnet und gegen die Wellenzahl  $k$  aufgetragen. Die Abbildung 36 zeigt, dass sich die Datenpunkte nach ihrer Wellenhöhe entlang der y-Achse sortieren. Es ist zu erkennen, dass die Mediane für  $C_T$  die gleichen Trends aufweisen wie die Streudaten. Um die Streuung der Daten mit einzubeziehen sind zusätzlich die 25 % und 75 % Quantile von  $C_T$  aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich der Abstand zwischen den beiden Quantilen (Interquartile Range, IQR) bei kürzeren Perioden vergrößert. Das bedeutet, dass bei der Bestimmung von  $C_T$  größere Ungenauigkeiten mit kürzeren Perioden auftreten. Dennoch unterscheiden sich die Quantile nur leicht von den Medianen. Aus diesem Grund werden die Mediane der zusammengesetzten Daten zur weiteren Verarbeitung herangezogen.



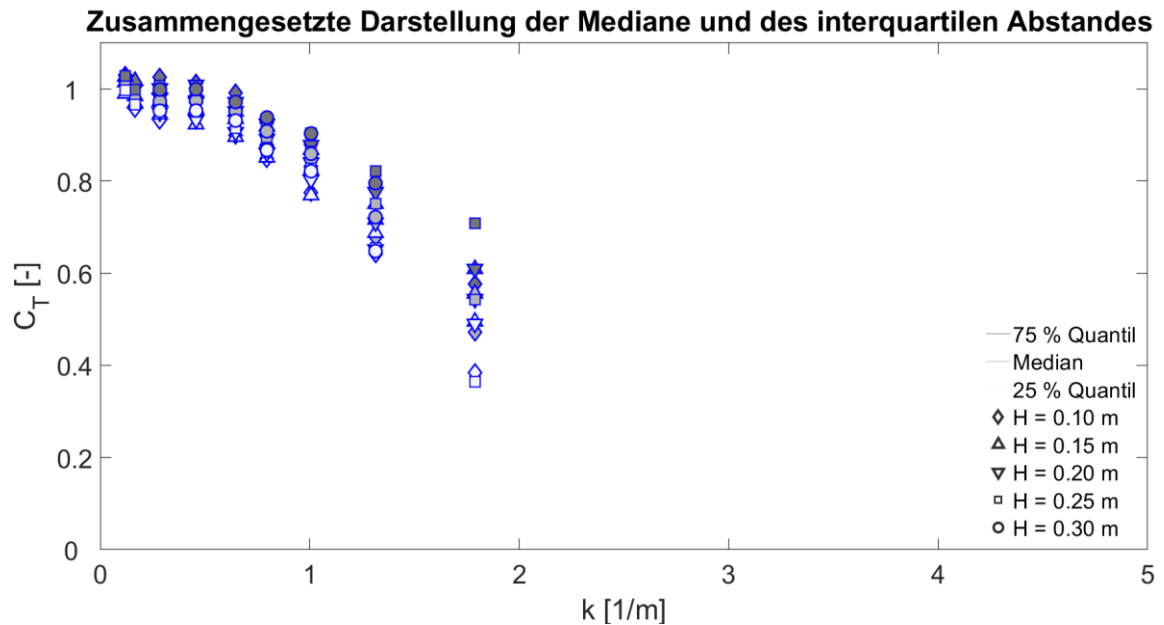


Abbildung 36: Zusammengesetzte Darstellung aller Mediane und des interquartilen Abstandes bezüglich des Transmissionskoeffizienten über die Wellenzahl  $k$ .

Um weitere Informationen über  $C_T$  bezüglich der verschiedenen Wellenhöhen zu erhalten, wird eine Parametrisierung durchgeführt. Diese orientiert sich an einer hyperbolischen Tangensfunktion welche über die Anpassungskoeffizienten  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  und  $p_4$  wie folgt dargestellt ist:

$$C_T(x) = p_1 * \tanh(p_2 * (p_3 + x)) + p_4 \quad (7)$$

Alle Werte für die Anpassungskoeffizienten  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  und  $p_4$  werden gegen die dimensionslose Wellenhöhe  $H/d$ , mit  $d$  als Eintauchtiefe der Gabionen, aufgetragen. Jeder Koeffizient wird als lineare Gleichung von  $H/d$  beschrieben. Die linearen Gleichungen ersetzen die Koeffizienten der hyperbolischen Funktion. Diese Substitution bewirkt eine Diversifikation der verschiedenen Kurven für  $H/d$ . Die parametrisierte Sichtweise ist in Abbildung 37 dargestellt. Nach der Parametrisierung ist zu erkennen, dass der Einfluss der Wellenhöhe in der Nähe der Extremwerte auf der X-Achse vernachlässigbar ist, d.h. hier laufen die Linien zusammen. Dieses Verhalten ist auf die Randbedingungen für extrem kleine und lange Wellen zurückzuführen.  $C_T$  für lange Wellen ( $k < 0,8$ ) liegt nahe 1,0. Das bedeutet, dass Wellen mit langen Periodendauern von den Gabionen wenig beeinflusst werden und für diese Wellen in diesem Versuchsaufbau eine geringe Wellendämpfung stattfindet. Bei Wellen mit kürzeren Periodendauern ( $0,8 < k < 3,0$ ) wird ein hyperbolischer Rückgang von  $C_T$  beobachtet. Das bedeutet, dass andere physikalische Prozesse die Transmission beeinflussen und Wellen mit der „lebenden Insel“ interagieren. Es kann angenommen werden, dass Wellen mit kurzen Wellenperioden ( $k > 3,0$ ) nicht transmittiert werden. Es ist erkennbar, dass der Einfluss der Wellenperiode auf  $C_T$  signifikant ist. Der Einfluss der Wellenhöhe für  $C_T$  ist erkennbar, aber in Bezug auf den Einfluss der Wellenperiode noch gering. Der Einfluss der Wellenbrecherlänge ist marginal. Es ist anzunehmen, dass die Unterschiede zwischen beiden Formationen zu klein waren, um signifikante Unterschiede während der Versuche zu erzeugen.

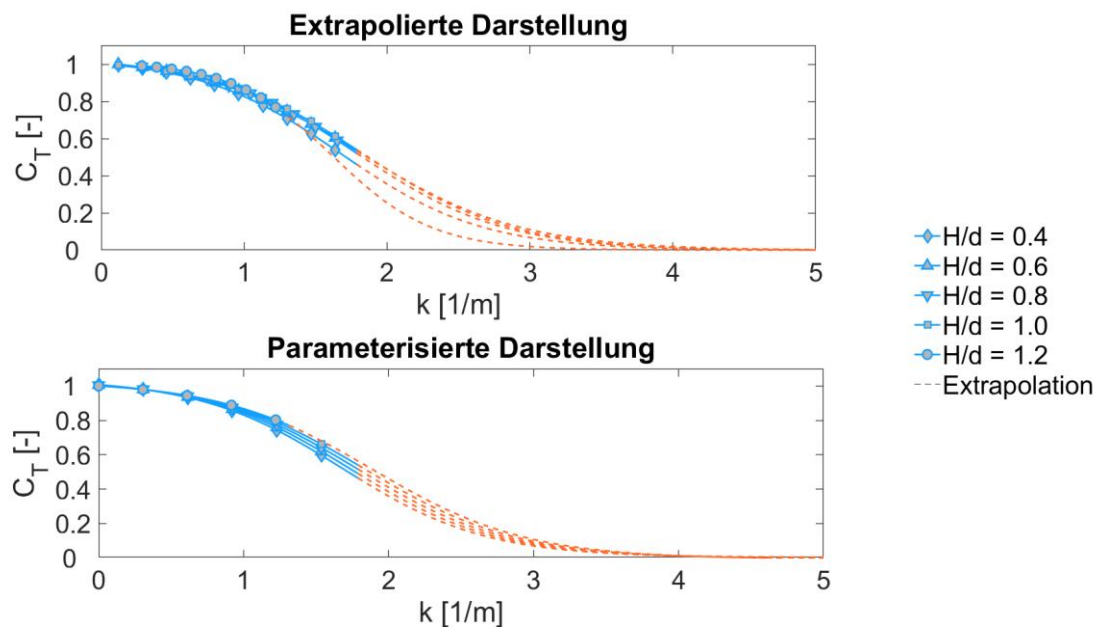


Abbildung 37: Extrapolierte (oben) und parameterisierte (unten) Darstellung des Transmissionskoeffizienten über die Wellenzahl  $k$  in Abhängigkeit der Wellenhöhe  $H$  und Eintauchtiefe  $d$ .

### 6.3.2 Reflektion

Aufgrund des hohen Einflusses der Wellenperiode werden die Ergebnisse bezüglich des Reflektionskoeffizienten  $C_R$  über die Wellenzahl  $k$  dargestellt. Die Daten geben einen ersten Eindruck des Reflexionsverhaltens der Gabionen.  $C_R$  hat einen Startwert von 0,1, da die Reflexionen des Strandes von vorangegangenen Tests im Kanal verbleiben und während der Reflexionsanalyse als Spiegelung der Struktur deklariert werden. Dies ist nur durch extrem lange Wartezeiten zu vermeiden und wird in der Praxis nicht durchgeführt. Lange Wellen ( $k < 0,8$ ) werden von der Struktur nicht reflektiert ( $C_R = 0,1$ ). Bei kürzeren Wellen ( $0,8 < k < 1,3$ ) ist zu erkennen, dass die Reflexion um 10 % zunimmt ( $C_R = 0,2$ ). Kurzwellen ( $k > 1,3$ ) zeigen einen hyperbolischen Anstieg um 20 % ( $C_R = 0,4$ ). Die Ergebnisse beider Formationen unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Die Geometrieunterschiede zwischen beiden Strukturen sind zu gering, um signifikante Ergebnisunterschiede anzuzeigen. Die zusammengesetzten Daten bezüglich des Reflektionskoeffizienten  $C_R$  sind in Abbildung 38 dargestellt. Eine Kurve zur besseren Interpretation der Daten ist eingefügt. Dazu wurde eine hyperbolische Tangensfunktion über die Datenpunkte gelegt, welche 1,0 als obere Grenze und 0,0 als untere Grenze verwendet.

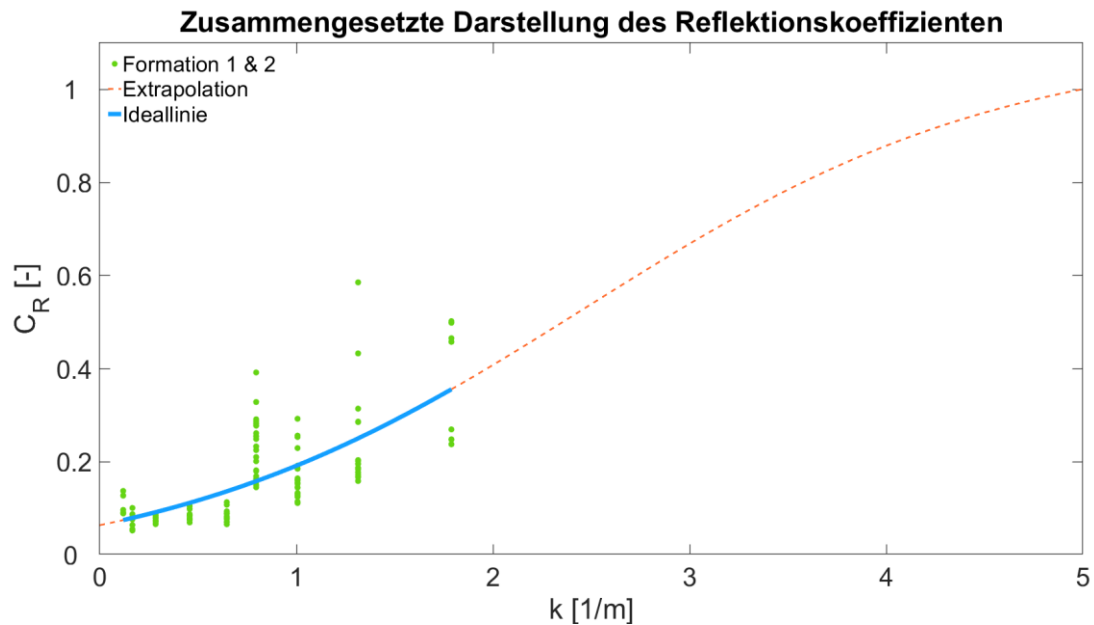


Abbildung 38: Reflektionskoeffizienten  $C_R$  der Gabionen über die Wellenzahl  $k$  dargestellt.

Die Datenpunkte sind, wie in Kapitel 6.3.1 erläutert, die Mediane aller verfügbaren Tests mit gleicher Wellenhöhe und gleicher Periode, welche gegen die Wellenzahl mit einer idealen Wellenperiode aufgetragen werden. Um weitere Informationen über die Reflektionskoeffizienten  $C_R$  zu erhalten, wird eine Parametrisierung durchgeführt. Alle Werte der Koeffizienten  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  und  $p_4$  der Passkurven werden gegen die dimensionslose Wellenhöhe  $H/d$  aufgetragen. Ein lineares Modell welches als passend zu den Koeffizienten identifiziert wurde erlaubt, dass jeder Koeffizient als lineare Gleichung von  $H/d$  ausgedrückt werden kann. Die linearen Gleichungen ersetzen die Koeffizienten der hyperbolischen Funktion. Mit dieser Substitution wird eine Diversifikation der verschiedenen Kurven für  $H/d$  erreicht. Nach der Parametrisierung ist zu erkennen, dass kein Einfluss der Wellenhöhe bei extrem kurzen und langen Wellen angezeigt wird.  $C_R$  für lange Wellen ( $k < 0,8$ ) nähert sich dem Wert Null und es werden keine Wellen durch die Struktur reflektiert. Wenn die Wellen kürzer werden ( $0,8 < k < 3,0$ ), tritt ein hyperbolischer Anstieg von  $CR$  auf. Extrem kurze Wellen ( $k > 3,0$ ) werden vollständig reflektiert ( $C_R = 1,0$ ). Im Zuge dessen lässt sich festhalten, dass der Einfluss der Wellenperiode für  $C_R$  signifikant ist. Dies ist in Abbildung 39 erkennbar. Der Einfluss der Wellenhöhe auf  $C_R$  ist gut erkennbar, aber in Bezug auf den Einfluss der Wellenperiode gering. Es ist zu beachten, dass der Einfluss der Wellenhöhe höher ausfällt als beim Transmissionskoeffizienten  $C_T$ .

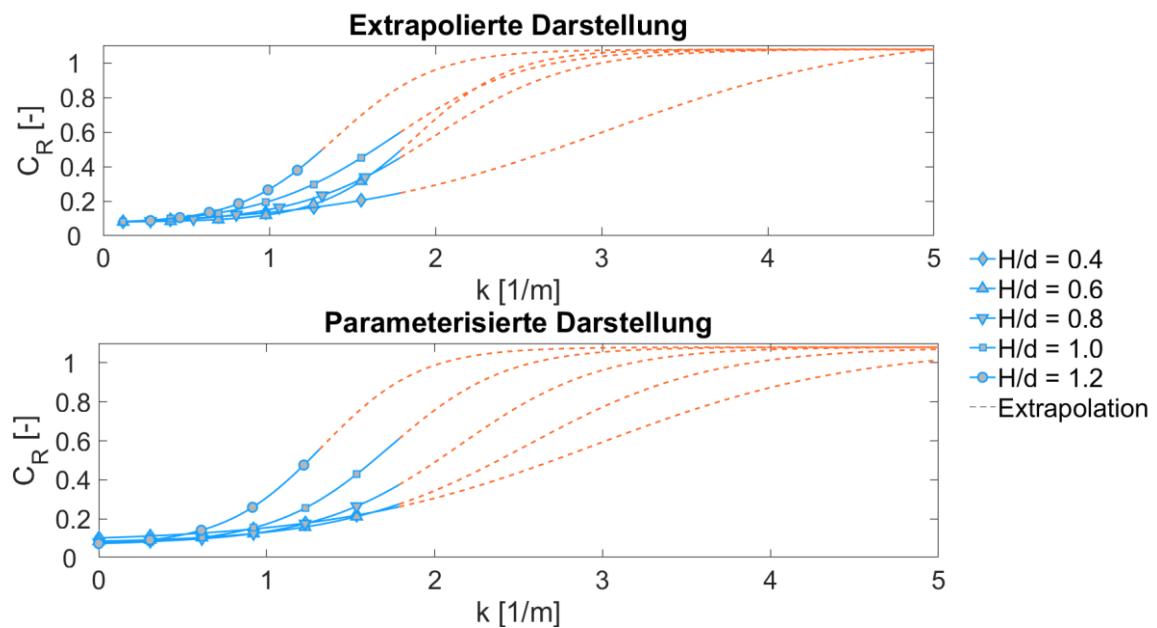


Abbildung 39: Extrapolierte Daten des Reflektionskoeffizienten  $C_R$  bezüglich Wellenhöhe  $H$  und Eintauchtiefe über die Wellenzahl  $k$  dargestellt (oben); gleichen Daten nach Parametrisierung über lineare Koeffizienten (unten).

### 6.3.3 Dissipation

Eine Darstellung der Transmissions- und Reflexionskoeffizienten in derselben Abbildung, einschließlich hochgerechneter Daten, erlaubt die Bestimmung des Dissipationskoeffizienten  $C_{Diss}$ . Dieser Koeffizient ist gegen die Wellenzahl  $k$  aufgetragen.  $C_{Diss}$  beschreibt die Energieverluste der Welle unter Anwesenheit der schwimmenden Insel. Die Energieverluste werden sowohl für die Mediane als auch für die extrapolierten Daten über folgende Gleichung berechnet:

$$C_{Diss} = \sqrt{1 - C_R^2 - C_T^2} \quad (7)$$

Der berechnete Dissipationskoeffizient  $C_{Diss}$  steigt mit der Wellenzahl  $k$  an. Der Einfluss der Wellenhöhe ist auffällig. Wellen mit kleinen Wellenhöhen werden bei Kurzwellen deutlich abgebaut ( $C_{Diss} = 0,80 - 0,85$ ). Wellen mit zunehmender Wellenhöhe werden um 55 - 70 % abgebaut. Die maximale Energiedissipation der Wellen ist zwischen  $1,0 < k < 3,0$  erkennbar. Der maximale Dissipationskoeffizient  $C_{Diss}$  liegt bei ~80 - 90 % der eingeleiteten Wellenenergie. Dies ist in Abbildung 40 dargestellt. Das Gebiet für extrem kurze Wellen ist markiert, da Wellen hier aufgrund der hohen Steilheit brechen. Die Vorhersagen für diesen Bereich sind nicht anwendbar. Der mit „Resonanzfrequenz“ bezeichnete Bereich beinhaltet die Ergebnisse der Energiedissipation, die vermutlich durch die Resonanzfrequenz beeinflusst werden. Die Vorhersagen der Energiedissipation für diesen Bereich sind nicht anwendbar.

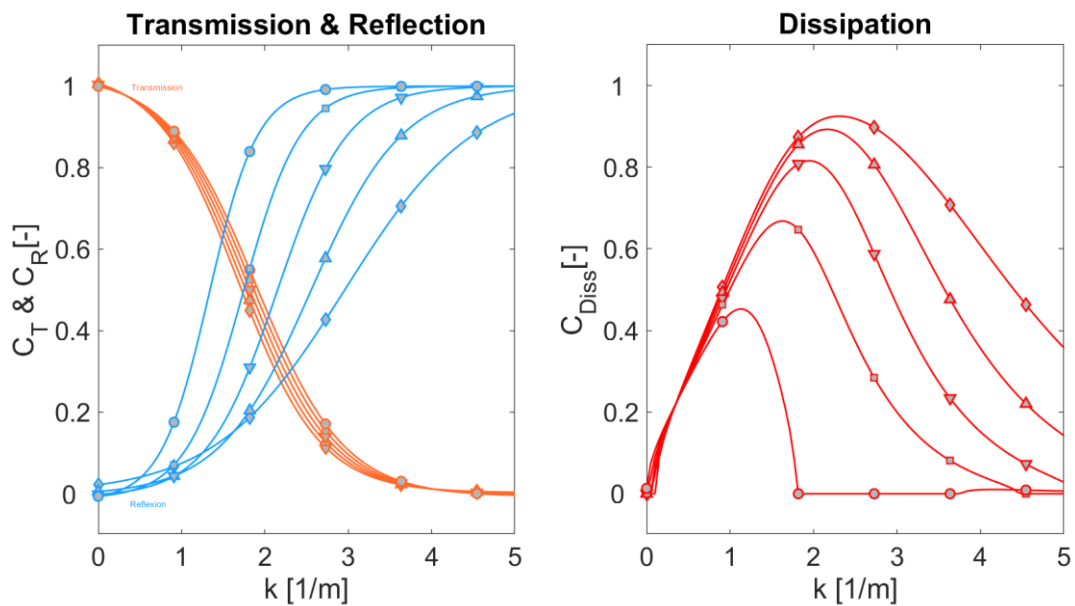


Abbildung 40: Überlagerte Darstellung des Transmissions- und Reflektionskoeffizienten (links) neben dem berechneten Dissipationskoeffizienten (rechts)

#### 6.3.4 Positionsstabilität der Gabionen

Die Ergebnisse bezüglich der Transmissions-, Reflexions- und Dissipationskoeffizienten belegen, dass eine Wellendämpfung durch die Gabionen stattfindet. Diese Ergebnisse sollen nun mit der Positionsstabilität der Gabionen verbunden werden, um zu untersuchen, welchen Einfluss die hydrodynamischen Bewegungen der Struktur auf die Dämpfung haben.

Die Orbitalbewegungen von drei Gabionen der schwimmenden Inseln sind im Nachfolgenden dargestellt. Die drei Gabionen befinden sich in der vorderen, mittleren und hinteren Position am Rand der Struktur. Die Bewegungen werden über die z-Position (Heave) und die x-Position (Surge) dargestellt. Dabei werden alle Bewegungen während des Tests dargestellt. Die Wellenausbreitungsrichtung ist von links nach rechts. Das Bewegungsverhalten der Gabionen ist für einen Test mit kurzen Wellen ( $T = 1,5$  s) in Abbildung 41 und für einen Test mit langen Wellen ( $T = 4,0$  s) in Abbildung 42 dargestellt. Das stark unterschiedliche Bewegungsverhalten der Gabionen bei unterschiedlichen Wellenperioden ist auffällig. Bei den Tests mit kurzen Wellen konnte für die Gabione in der vorderen Position eine stärkere Hubbewegung im Gegensatz zu der mittleren und hinteren Gabione identifiziert werden. Die mittig liegende Gabione weist wiederum eine stärkere Hubbewegung als die hintere Gabione auf. Die große horizontale Bewegung aller Gabionen ist auf die Reflexion der Wellen zurückzuführen. Die Wellen haben nicht die Energie, um die Trägheit der Struktur für eine volle Orbitalbewegung zu überschreiten. Die Wellen treffen auf die Vorderseite der Gabione und erzeugen eine Kraft in die entgegengesetzte Richtung. Diese Kraft beschleunigt die Masse der Gabionen und führt aufgrund des fehlenden Lagers zu einer horizontalen Bewegung. Während der Versuche wird das System maximal um 600 mm verschoben, dann ist die durch das Verankerungssystem erlaubte Verschiebung maximal. Die Unterschiede zwischen den Bewegungen der drei Gabionen sind über die Zeit konstant. Alles in allem lässt sich sagen, dass die Dämpfungsrate der Struktur im Laufe der Zeit konstant ist. Das bedeutet, dass weder der

Ausgangszustand noch die Bewegung während der Versuche einen Einfluss auf das Dämpfungsverhalten haben. Die Bewegung der Strukturen liefert eine Erklärung für das gemessene Dämpfungsverhalten bei kurzen Wellenperioden, wie in Kapiteln 6.3.1-6.3.3 erfolgt. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass die Dämpfung mit jeder Reihe von Gabionen zunimmt.

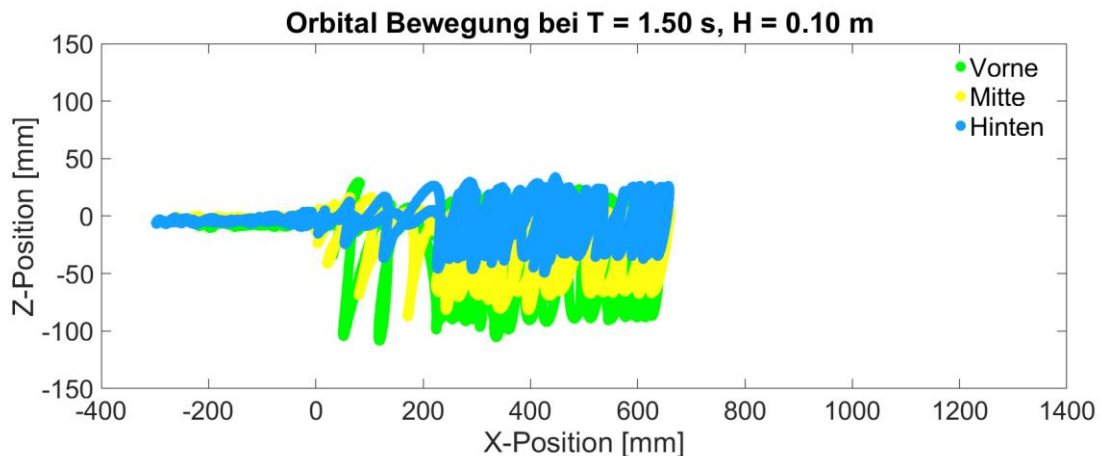


Abbildung 41: Bewegung der vorderen (grün), mittleren (gelb) und hinteren (blau) Gabione in x- und z- Richtung unter einer Welle mit einer Periode von 1,5 s.

Bei den langen Wellen in Abbildung 42 bewegen sich die einzelnen Gabionen, bzw. die gesamte schwimmende Inseln, auf einer Orbitalbahn. Eine Dämpfung ist nicht erkennbar, da alle Gabionen die gleichen Bewegungen in z- und x-Richtung durchlaufen. Es ist zu erkennen, dass die Bewegung der hinteren Gabione eine stärkere Bewegung in x aufweist. Dieses Verhalten ist auf die Verankerungen der Gabionen zurückzuführen.

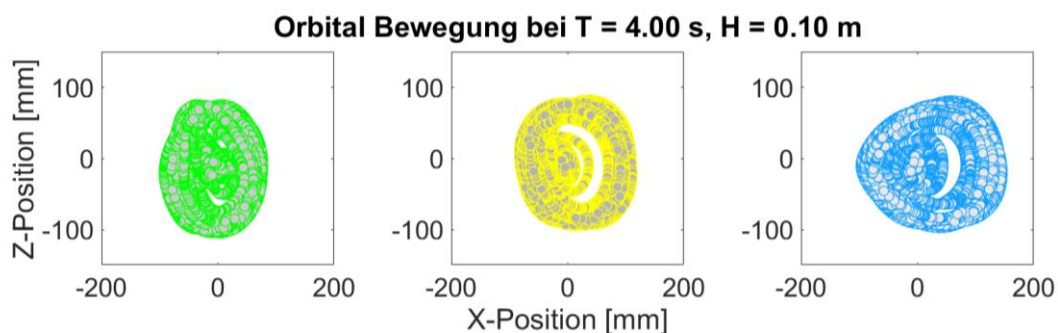


Abbildung 42: Bewegung der vorderen (dunkelgrau), mittleren (dunkel) und hinteren (hellgrau) Gabione in x- und z- Richtung unter einer Welle mit einer Periode von 4,0 s.

Für neun Versuche mit unterschiedlichen Wellenperioden zwischen 1,5 s bis 8,0 s sind die Bewegungen einer einzelnen Gabione in Abbildung 43 dargestellt. Die Bewegungen der Gabionen für die verschiedenen Wellenperioden zeigen nicht-orbitale Bewegungen für Perioden unter 2,25 s an. Für Perioden unter 2,25 s kann eine zunehmende laterale Bewegung mit abnehmender Periode beobachtet werden. Dieser Periodenbereich entspricht den Bereichen, in denen effektive Transmissions- und Reflexionskoeffizienten ermittelt werden konnten. Die nicht-orbitale Bewegung von Gabionen im Gegensatz zu den natürlichen Orbitalbewegungen

der Wasserpartikel führen zu einem Dämpfungseffekt. Die hohe Trägheit der Gabionen führt zu der nicht-orbitalen Bewegung. Bei Wellenperioden größer 6,0 s ist auch eine nicht-orbitale Bewegung der Gabionen zu erkennen. Diese lässt sich durch die reflektierten Wellen des Strandes erklären, die in diese Darstellung mit einbezogen wurden. Abschließend lässt sich feststellen, dass die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Transmissions-, Reflektions- und Dissipationskoeffizienten sich anschaulich durch das Bewegungsverhalten der Gabionen erläutern lassen.

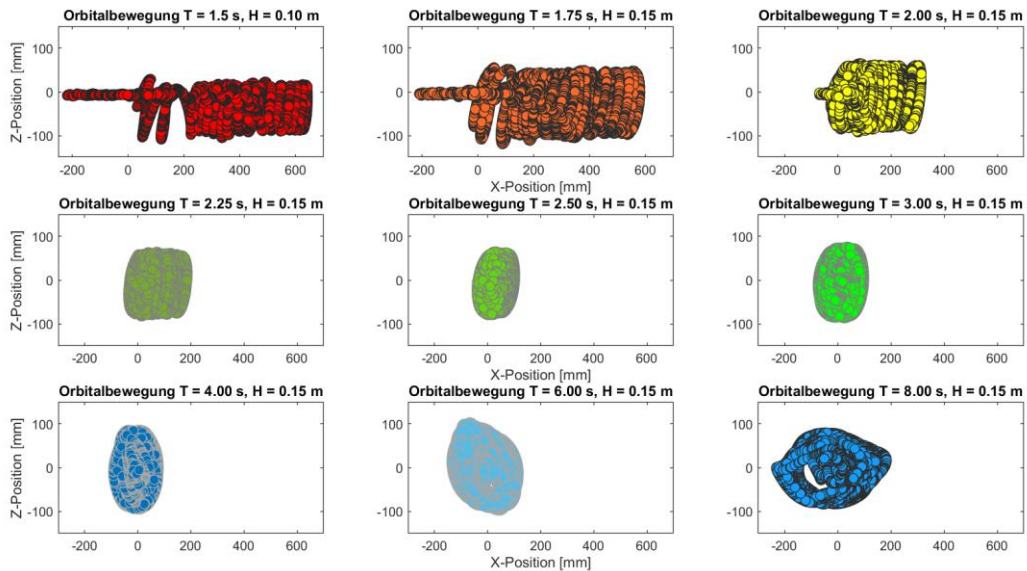


Abbildung 43: Bewegungsverhalten einer einzelnen Gabione unter verschiedenen Wellenperioden zwischen 1,5 s und 8,0 s.



## 7 Diskussion

Naturnahe schwimmende Vegetationsbestände können als Ersatzlebensraum auf Gewässern eingesetzt werden, um deren ökologische Qualität und Durchgängigkeit zu verbessern. Durch den Einsatz von standortgerechten Pflanzen werden die für den Aufbau der natürlichen Nahrungskette notwendigen Voraussetzungen geschaffen, so dass diese künstlich eingesetzten Vegetationsbestände im Verlauf der Zeit und der Entwicklung von den typischen Arten besiedelt werden. Untersuchungen des Makrozoobenthos haben gezeigt, dass auf vergleichbaren schwimmenden Inseln in einem natürlichen Umfeld nach 2 Vegetationsperioden bereits ähnliche, Lebensgemeinschaften angetroffen wurden. Mit fortschreitender Entwicklung naturnaher durchwurzelter Gabionenkörper wurde eine günstige naturnahe Besiedlung prognostiziert. Diese Entwicklung ist nur möglich, wenn sich die Bestände dauerhaft auf dem Wasser entwickeln können.

Insbesondere in Bezug auf die Durchgängigkeit von Gewässern sind in wiederkehrenden Gewässerabschnitten ökologisch wirksame Habitatstrukturen (Trittsteine) erforderlich, welche eine Durchwanderung für die aquatischen Lebensgemeinschaften ermöglichen. Nach dem Strahlwirkungskonzept müssen demnach abhängig von den Zielarten diese Strukturen in Maximalabständen von ca. 2 km und Mindestgrößen von ca. 500 m<sup>2</sup> entlang des Gewässers angeordnet sein. Zur Umsetzung dieser Dichte von Habitatelementen ist daher auf naturnahe Bauweisen und Techniken zurückzugreifen, um deren Qualitäten zu gewährleisten und den dauerhaften Eintrag von künstlichen Materialien in die Gewässer zu verhindern.

Die Versuche im MLK, wie in Kapitel 5 dargestellt, zeigen, dass eine dauerhafte Schwimmstabilität der Gabionen in der jetzigen Entwicklungsstufe nicht bei allen Varianten gewährleistet werden konnte. Dies ist zum einen auf den inhomogenen Aufbau der Gabionen sowie das ungleiche Wachstumsverhalten während der Vegetationsphasen zurück zu führen. Wie erläutert wird der Auftrieb der Gabionen durch zwei Faktoren sichergestellt. Zum einen die lebende, mattenbildende Vegetation bei der Triebe, Wurzeln und Rhizome der verschiedenen Pflanzenarten ein ausgeprägtes Luftleitgewebe besitzen, welches eine geringere Dichte als Wasser aufweist und dadurch schwimmfähig ist. Zum anderen verfängt sich, während des anaeroben Stoffwechsels gebildetes, Sumpfgas in den Matten.

Während der Versuche im MLK wurde deutlich, dass wiederholte Wellenriffe durch die sekundären Wellensysteme vorbeifahrender Schiffe das Sumpfgas, welches für einen Großteil des Auftriebs verantwortlich ist, aus den Gabionen austreibt. Das Gas ist entweder in Form von Blasen/ Bläschen aus dem Gabionenkörper ausgetrieben und/ oder das bewegliche Wasser der Gabionen wurde durch sauerstoffreiches Wasser des Kanals ersetzt. Auf diese Weise konnten sich nicht die notwendigen anaeroben Standortbedingungen einstellen. So sind, wie in Abbildung 44 dargestellt, einzelne Gabionen durch den fehlenden Auftrieb in Folge wiederholter Wellenriffe versunken. Weiterhin ist davon auszugehen, dass sich durch den Wasserverlust beim Umsetzen der Gabionen in den Mittellandkanal im nahezu gesamten Gabionenkörper aerobe Zustände eingestellt haben und daher mit Einsetzen der Gabionen in den Kanal kein Gasvolumen als Auftrieb vorhanden war. Die Gewichtsmessungen des Wasserverlustes haben gezeigt, dass zwischen 12% und 27% des Wassers aus den Gabionenkörpern beim Herausheben austreten und durch Luft/ Luftsauerstoff ersetzt werden. Zum Vergleich besitzen Torfkörper welche auch die Basis natürlicher schwimmender Inseln bilden können je nach Ausgangsmaterial ein sehr hohes Wasserhaltevermögen von 95% und mehr. Der Prozess des Gasaustausches und der Übergang von anaeroben zu aeroben Bedingungen innerhalb der gewachsenen Strukturen ist observiert worden, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes aber nicht genauer unter-



sucht. Hier ist eine weiterführende Untersuchung bezüglich der Schwimmstabilität durch innerhalb des Gabionenkörpers aufgefangenes und gespeichertes Gasvolumen unter Welleneinfluss notwendig. Weiterhin ist dieser Umstand beim Herausheben und Umsetzen der Gabionen aus dem Wasser bei der Ergebnisauswertung zukünftiger Untersuchungen als wichtiger Einflussfaktor zu berücksichtigen.



Abbildung 44: In Folge von zu hohem und zu häufigem Wellengang gesunkener Gabionenkörper im Mittellandkanal

Die vorliegenden Ergebnisse der Versuche im GWK zeigen, dass die verbundenen Gabionen eine signifikante Dämpfungswirkung für Wellen mit Wellenperioden  $T \leq 2,25$  s haben. Die Transmission der einfallenden Wellen wird für die kleinsten Wellenperioden ( $T = 1,5$  s) um 50 % ( $C_T = 0,5$ ) reduziert. Wellen werden zwischen 20 - 50 % ( $C_R = 0,2 - 0,5$ ) bei den kleinsten Wellenperioden ( $T = 1,5$  s) reflektiert. Die einfallende Wellenenergie wird für die kleinste Wellenhöhe und -periode ( $H = 0,10$  m,  $T = 1,5$  s) um bis zu 85 % ( $C_{Diss} = 0,85$ ) reduziert. Bei Wellen mit Wellenperioden  $T \geq 2,25$  s sinkt die wellendämpfende Wirkung, zusammengesetzt aus Transmission und Reflektion, ab. Hier kann durch bauliche Maßnahmen, z.B. eine Verbreiterung der schwimmenden Insel, ein verbessertes Verhalten herbeigeführt werden. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass der Transmissionskoeffizient  $C_T$  vermindert wird bei einem Anstieg der Wellenzahl  $k$  und dass der ansteigende Reflektionskoeffizient  $C_R$  zusammen mit der Wellenzahl  $k$  ansteigt. Darüber hinaus ist ein Anstieg des Reflektionskoeffizienten  $C_R$  zusammen mit  $H/L$  zu beobachten sowie ein Anstieg des Dissipationskoeffizienten  $C_{Diss}$  zusammen mit der Wellenzahl  $k$ . Der Dissipationskoeffizient  $C_{Diss}$  steigt bei einer Abnahme von  $H/L$  an. Darüber hinaus konnte erkannt werden, dass nicht-orbitale Bewegungen der Gabionen als Indikator für das Dämpfungsverhalten herangezogen werden können.

Um alle Sekundärwellen zufriedenstellend zu dämpfen ( $CT < 0,5$ ) beträgt die erforderliche Länge einer schwimmenden Insel etwa 4,0 - 8,0 m. Die Effizienz der schwimmenden Inseln kann hinsichtlich Kosten und Leistung maximiert werden, wenn der  $d/h$ -Wert erhöht wird. Das bedeutet, dass schwimmende Vegetationsinseln in Anwendungsgebieten einen möglichst großen Teil der Wassersäule einnehmen sollten. Der Einsatz von festen Verankerungssystemen würde die Leistungsfähigkeit der schwimmenden Inseln weiter erhöhen, würde aber gleichzeitig zu größeren Kräften führen, welche in der Bodenverankerung abgeleitet werden müssen. Dies steht im Zusammenhang mit der Verhinderung einer natürlichen Orbitalbewegung. Zusätzliche dissipative Einflüsse wie Wellenbrechen, Oberflächenreibung, Wirbelbildung vor der Struktur und die Wechselwirkung von Wellen mit gegenläufigen Wellen, welche zwischen den einzelnen Gabionen entstehen, sind im Rahmen dieses Projektes nicht weiter erforscht worden. Diese Prozesse bedingen die wellen-

dämpfende Wirkung der schwimmenden Inseln und sollten in Zukunft weiter untersucht werden. Durch die angebrachten XPS-Platten unterhalb der Struktur konnte der Einfluss der Wurzeln der Gabionen auf die Wellendämpfung nicht in Betracht gezogen werden. Hier sollte in weiterführenden Versuchen untersucht werden ob eine zusätzliche wellendämpfende Wirkung durch das herabhängende Wurzelwerk vorliegt. Das Wurzelsystem könnte die effektive Eintauchtiefe erhöhen und als zusätzliches Trägheitselement innerhalb der Wassersäule dienen. Gleiches gilt für den vegetativen Bewuchs der Gabionen. Während der Versuche wurde die Vegetation abgeschnitten, um die Bewegungsaufnahme mithilfe Motion Trackings zu ermöglichen. Mit Vegetation, wie in Abbildung 45 dargestellt, war eine Identifizierung der passiven Marker nicht möglich. Mit Bewuchs ist eine zusätzliche wellendämpfende Wirkung durch zusätzliche Masse als auch durch Störwirkungen beim Wellenüberlauf zu erwarten.

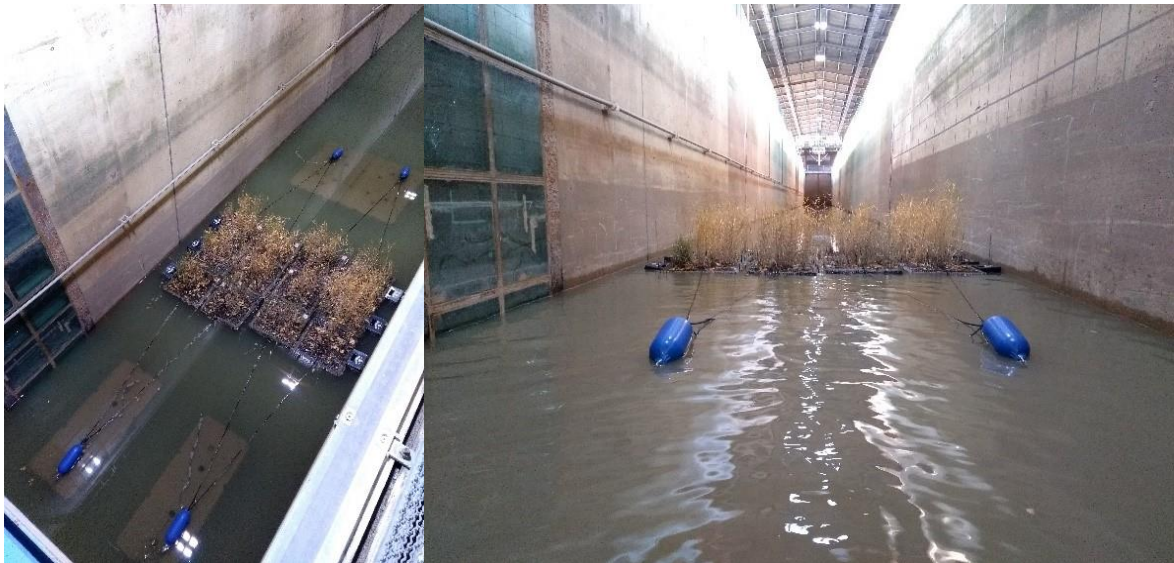


Abbildung 45: Bewachsene, schwimmende Inseln im Großen Wellenkanal bei minimalem Wasserstand mit sichtbaren Verankerungsblöcken und Reiterbojen.



## 8 Öffentlichkeitsarbeit

Das DBU-Projekte „33496/01 – BioSchWelle – Erprobung der Wellendämpfung durch „lebende Inseln“ zur Erhöhung der Artenvielfalt in Gewässern“ wurde im Laufe der Projektlaufzeit auf nationalen sowie internationalen Fachkonferenzen vorgestellt:

- Günther, H., Wolf, S., Hacker, E. Potentials and application of floating blue-green infrastructures for rainwater management in urban areas. X Conference AEIP-APENA-EFIB-ECOMED Soil and Water Bioengineering, 21.-23. Madrid 2018
- Günther, H. Living islands – initiation of natural floating wetlands for lake shore development. SWS annual Meeting. 29.05-01-06.2018 Denver Colorado.

Darüber hinaus sind für die Außendarstellung der Versuchs- und Analysemethoden nach Abschluss der Forschungsprojektes Veröffentlichungen in folgenden Journalen geplant:

- Ecological Engineering - The Journal of Ecosystem Restoration (Elsevier)
- Binnenschifffahrt & Hansa – International Maritime Journal (insbesondere zur Erreichung der deutschen Fachverbände sowie Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesanstalt für Gewässerkunde, etc.)

Darüber hinaus sind für die Außendarstellung der Versuchs- und Analysemethoden nach Abschluss der Forschungsprojektes Veröffentlichungen im Ecological Engineering - The Journal of Ecosystem Restoration (Elsevier) geplant. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse der Modellversuche sollen bei Zusage auf der Woche der Umwelt 2020 im Park vom Schloss Bellevue vorgestellt werden.



## 9 Fazit und Ausblick

Laut der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) sollen Flüsse, Seen, Übergangsgewässer, Küstengewässer und Grundwasser spätestens bis zum Jahr 2027 in einem „guten Zustand“ sein. Gegenwärtig erfüllen jedoch nur ca. 8% der Oberflächenwasserkörper diesen Zielzustand. Durch Nutzungsdruck und anthropogenen Einflüssen ist die naturnahe Uferzonierung von Fließgewässern und Seen oft erheblich verändert. Aufgrund ihrer vielfältigen Funktionen (Habitatfunktion für Tiere, Strukturelement im Wasser, Erhöhung der Selbstreinigungsfunktion und Beschattung des Wasserkörpers), spielt die Entwicklung einer naturnahen bzw. standortgerechten Ufervegetation jedoch eine wichtige Rolle bei der Sicherstellung des guten ökologischen Zustands gemäß EU-WRRL. Der Einsatz von auf dem Wasser schwimmenden Vegetationsstrukturen könnte im Zuge der Umsetzung der EU-WRRL eine ökologische Verbesserungsmaßnahme bei der Entwicklung naturnaher Ufervegetation darstellen. Unabhängig von anthropogen veränderter Wassertiefe bzw. Wasserstandschwankung könnten schwimmende Vegetationsstrukturen an erheblich veränderten oder künstlichen Gewässern eingesetzt werden. Problematisch ist jedoch, dass bisher eingesetzte Konstruktionen besonders bei großflächiger Anwendung nicht mit den Umweltqualitätszielen der EU-WRRL zur ökologischen Entwicklung von Gewässern zu vereinen sind, da ein dauerhafter Eintrag künstlicher Materialien (Kunststoffe und Metall) in die Gewässer stattfindet. Zudem konnte festgestellt werden, dass sich die Strukturen, die zur Schaffung eines künstlichen Auftriebs verwendet werden, mit der Zeit zu verschlechtern beginnen. Daher erfordern bisherige Bauweisen von sogenannten „künstlichen schwimmende Inseln“ einen erheblichen Wartungsaufwand und haben sich somit als wirtschaftlich ungeeignet erwiesen. Es wurde festgestellt, dass eine Übertragung der Prozesse, die den Eigenauftrieb in natürlichen schwimmenden Vegetationsgesellschaften erzeugen, für die Aufrechterhaltung des Auftriebs an Bedeutung gewinnen. Hier setzt auch das Grundprinzip schwimmender Vegetationsstrukturen nach Ingenieurbiologischer Bauweise („Lebende Inseln“) an. Die „Lebenden Inseln“ werden mit verrottbaren Materialien gebaut. Der Auftrieb wird zu Beginn durch trockene Halme und das Aerenchym (Luftleitgewebe) bestimmter Pflanzen erzeugt. Langfristig bildet sich unter anaeroben Bedingungen Sumpfgas, welches die Hauptauftriebsfunktion übernimmt.

Vor diesem Hintergrund wurden Untersuchungen im Rahmen des DBU-Projektes „33496/01 – BioSchWelle – Erprobung der Wellendämpfung durch „lebende Inseln“ zur Erhöhung der Artenvielfalt in Gewässern“ durchgeführt. Die Hauptideen aus diesem Projekt sind:

- **Das Anwachsen der Gabionen erfordert ein bis zwei Vegetationsperioden**
  - Ökologischer Trittstein (IUP)
- **Dauerhafte Schwimmstabilität unter Schiffswellen ist mit der momentanen Ausführung nicht zu garantieren (LuFI)**
- **Die schwimmenden Inseln mit einer Breite von 3 – 4 m weisen eine wellendämpfende Wirkung bei Wellen mit Perioden  $T \leq 2,25$  s auf (LuFI)**
  - Reflektion
  - Transmission
  - Dissipation

Zu Beginn des ersten Projektjahr wurden die einzelnen Gabionen erfolgreich mit Bewuchs versehen. Der Aufwuchs der Schilfgabione im selben Jahr war ein projektkritisches Element, da trotz schneller Produktion der Gabionskörbe mit dem Start der Projektlaufzeit die verbleibende Vegetationsperiode 2017 in der freien

Natur nur noch sehr kurz war. Nach abwägen diverser Optionen konnte die Variante mit einem künstlichen Wasserbecken im Gewächshaus als wertvolle Maßnahme zur Verlängerung der Vegetationsperiode durchgeführt werden. Die Projektpartner danken an dieser Stelle dem Institut für Gartenbauliche Produktionssysteme der LUH für die Bereitstellung der Gewächshausflächen. Durch den Einsatz des Gewächshauses konnte die Vegetationsperiode entscheidend verlängert werden, wodurch die Gabionen ab Juni 2018 bereit für die Versuche im MLK und im GWK waren. Im zweiten Projektjahr konnten die Versuche erfolgreich durchgeführt werden und die wellendämpfende Wirkung der schwimmenden Inseln nachgewiesen werden.

Die involvierten Institute, bestehend aus dem „Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen“, dem „Institut für Umweltplanung“ der Leibniz Universität Hannover und der „Fakultät Landbau/Umwelt/Chemie“ der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, haben großes Interesse daran, die „schwimmenden Inseln“ weiterzuentwickeln. Der nächste Entwicklungsschritt soll darauf abzielen, dass eine dauerhafte Auftriebsleistung gewährleistet ist. Dazu soll bestimmt werden wieviel Gas unter welcher Welle aus den Gabionen verdrängt wird. Die Gabionen sollten dazu mit gezielt belüftbaren Kammern ausgestattet werden, wo unter Welleneinfluss das Gasvolumen bestimmt wird. Diese indirekte Messung des Luft- und Gasgehaltes kann auch verwendet werden, um z.B. eine direkte Messung bzw. ein zu entwickelndes Messgerät zu prüfen. Der Versuchsaufbau sieht vor, dass die Gabionen nach unten abgespannt werden und mit Kraftmesser ausgestattet sind. So kann nach jeder Welle die Differenz des Auftriebs gegenüber dem Ausgangszustand gemessen werden und damit das ausgetriebene Gas bestimmt werden. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend soll eine technische Lösung entwickelt werden, damit das für den Auftrieb relevante Gas auch unter Welleneinfluss gebunden bleibt.



Abbildung 46: Gabionen nach der dritten Vegetationsphase und nach den Tests im Mittellandkanal und Großen Wellenkanal im September 2019



## Literaturverzeichnis

- Abdel-Maksoud, A.; Rieck, Karsten (1996): Wellensystem eines Schiffes bei stationärem Fahrtzustand. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wellen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 9. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S.55-74
- Abul-Azm, A. G., & Gesraha, M. R. (2000). *Approximation to the Hydrodynamics of Floating pontoons under Oblique Waves*. Ocean Engineering, 27(4), 365–384. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00057-2)
- Brauns, M.; Gücker, B.; Wagner, C.; Garcia, X.-F.; Walz, N. & Pusch, M. T. (2011): *Human lakeshore development alters the structure and trophic basis of littoral food webs*. Journal of Applied Ecology 48: 916–925.
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2010: *Merkblatt Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)*, Ausgabe 2010 <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102451>
- Burgess, N. D. u. Hiron, G. J. M. (1992): *Creation and management of artificial nesting sites for wetland birds*. Journal of Environmental Management 34 (4): 285–295.
- Christian, C. D. (2000). *Floating Breakwaters for Small Boat Marina Protection*. Coastal Engineering, 2268–2277.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (2016): *Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Binnengewässern*. DWA. Hennef. 153 S.
- Donselaar-Ten Bokkel Huinik, W.A.E.v., 1961: *An ecological study of the Vegetation in three former river beds*. Wentia 5:112-162.
- Elbisy, M.S. (2015): *Estimation of regular wave run-up on slopes of perforated coastal structures constructed on sloping beaches*, Ocean Engineering, 109, pp. 60-71.
- Gabel, F.; Garcia, X. F.; Brauns, M.; Sukhodolov, A.; Leszinski, M. u. Pusch, M. T. (2008): *Resistance to ship-induced waves of benthic invertebrates in various littoral habitats*. Freshwater Biology 53: 1567–1578.
- Gesing, Carolin (2010): *Hydraulische Belastungen am Ufer aus Schifffahrt und Abfluss*. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *Alternative technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen - Wirkungsweise, Belastbarkeit, Anwendungsmöglichkeiten*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 7-14.
- Günther, H., 2013: *Lebende Inseln. Selbstschwimmende Pflanzengesellschaften für urbane Gewässer*. Dissertation 100 s., Berlin, Technischen Universität Berlin
- Gustafsson, F. (1996). *Determining the Initial States in Forward-Backward Filtering*. IEEE, 44(4), 988–992. <https://doi.org/10.1109/78.492552>
- Headley, T. R. & Tanner, C. C., 2006: *Application of Floating Wetlands for enhanced stormwater treatment: A review* 100 s., New Zealand: National Institute of Water & Atmospheric research Ltd.
- Hering, D. (2015): *Zur Notwendigkeit gehölzbestandener Gewässerrandstreifen und Auen. Tagung: aqualon trifft Wissenschaft. Ansätze und Impulse zur Umsetzung der EU-WRRRL(2.0)*. 29. September 2015. Köln.



- Hogg, E.H. & Wein, R.W., 1988a: *The contribution of Typha components to floating mat buoyancy*. Ecology 69:1025-1031.
- Hogg, E.H. & Wein, R.W., 1988b: *Seasonal Change in Gas Content and Buoyancy of Floating Typha Mats*. Journal of Ecology 76:1055-1068.
- Jiang, Z.-B., Liu, H., Wang, B.-L. (2013): *Numerical simulation of the interaction between regular wave of large amplitude and floating box-type breakwater*, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 1173-1179.
- Kaule, G. & A. Peringer, 2011: *Die Übergangs- und Hochmoore des Chiemgaus – Vergleichende Untersuchung zur Entwicklung zwischen den Jahren 1969-72 und 2010*. Berichte der bayerischen botanischen Gesellschaft (81):109-142.
- Koutandos, E., Prinos, P., & Gironella, X. (2005). *Floating Breakwaters Under Regular and Irregular Wave Forcing: Reflection and Transmission Characteristics*. Journal of Hydraulic Research, 43(2), 174-188. <https://doi.org/10.1080/00221686.2005.9641234>
- Kratz, T.K. & DeWitt, C. B., 1986: *Internal Factors controlling peatland-lake ecosystems development*. Ecology 67:100-107.
- Leschisin, D. A.; Williams, G. L. u. Weller, M. W. (1992): *Factors affecting waterfowl use of constructed wetlands in north-western Minnesota*. Wetlands 12 (3): 178-183.
- Li, X.-N.; Song, H.-L.; Li, W.; Lu, X.-W. u. Nishimura, O. (2010): *An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water*. Ecological Engineering 36 (4): 382-390.
- Mani, J. S. (1991). *Design of Y-Frame Floating Breakwater*. Journal of Waterway, Port, Coastal and, Ocean Engineering, 117, 105-119.
- Murali, K., & Mani, J. S. (1997). *Performance of Cage Floating Breakwater*. Journal of Waterway, Port, Coastal and, Ocean Engineering.
- Ruthsatz, B., 1996: *Veränderungen der Vegetationsdecke eines Schwingrasens über Torfstichgelände nach Wassereinstau. Untersuchungen an Dauerbeobachtungsflächen im Mürmes-Moor (Vulkaneifel)*. Tuexenia (16):117-150.
- Schleuter, M.; König, B.; Koop, J.; Söhngen, B. u. Soyeaux, R.: *Die Wirkung von schiffsbedingtem Wellenschlag auf die Uferbesiedlung mit Makrozoobenthos dargestellt an Untersuchungsergebnissen von Erhebungen an der Unteren Havel-Wasserstraße (UHW)*. Bundesanstalt für Gewässerkunde /Hrsg. Bfg Bericht -1498.
- Succow, M. & Joosten, H., 2001: *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2. Auflage 622 s., Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuch.
- Thomson, W. (1888). 1. On Ship-Waves. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 14, 194-194. doi:10.1017/S0370164600003758
- Williams, A. N., Lee, H. S., & Huang, Z. (2000). *Floating Pontoon Breakwaters*. Ocean Engineering, 27(3), 221-240. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(98\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00056-0)



- Y.Takagi, A.Tsujikawa, M.Takato, T.Saito, M.Kaida, 1998; *Development of a non-contact liquid level measuring system using image processing*, Water science and technology, vol. 37, no.12, pp.381-387, 1998.
- Yang, C., Wang, Q. & Yang, J. 2014. *Applying Image Recording and Identification for Measuring Water Stages to Prevent Flood Hazards*. Natural Hazards 74(2): p.737-754.
- Zimmerli, S., 1988: *Vegetation und Standort von Schwingrasen in der Schweiz. Vegetation and site condition of floating mats in Switzerland* 105 s., Zürich: Geobotanisches Institut der ETH.
- Mansard, E. P. D., & Funke, E. R. (1980). *The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method*. Coastal Engineering, 154-172. <https://doi.org/10.1061/9780872622647.008>
- Frigaard, P., & Brorsen, M. (1993). *A Time-Domain Method for Separating Incident and Reflected Irregular Waves*. Aalborg: Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Baldock, T. E., & Simmonds, D. J. (1999). *Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry*. Coastal Engineering, 38(3), 167-176. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00046-0)
- Goda, Y., & Suzuki, Y. (1976). *Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments*. Coastal Engineering, 828-845.