Auswirkungen von Ufermauern unter dem Einfluss von Wind- und Schiffswellen am nördlichen Bodenseeufer

Jens Peter Armbruster
ORCID: 0000-0003-4137-7675
Limnologisches Institut der Universität Konstanz, AG Umweltphysik, Mainaustr. 252,
78464 Konstanz, Deutschland, jens.armbruster@yahoo.com

Oliver Miler
ORCID: 0000-0002-4781-244X
AquaSciConsulting Dr. Miler, Petershauserstr. 22,
78467 Konstanz, Deutschland, oliver.miler@web.de

Wolfgang Ostendorp
ORCID: 0000-0002-2171-7356
Limnologisches Institut der Universität Konstanz, AG Umweltphysik, Mainaustr. 252,
78464 Konstanz, Deutschland, wolfgang.ostendorp@uni-konstanz.de

Bericht der AG Umweltphysik am Limnologischen Institut der Universität Konstanz
März 2025

Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS)
DOI: https://doi.org/10.48787/kops/subolakes/352-2-rknkh5p4h4u96

Zitiervorschlag:

ARMBRUSTER, J. P., MILER, O. & OSTENDORP, W. (2025): Auswirkungen von Ufermauern unter dem Einfluss von Wind- und Schiffswellen am nördlichen Bodenseeufer – Bericht der AG Umweltphysik am Limnologischen Institut der Universität Konstanz für das SuBoLakes-Projekt (Az. 35825/01-33/2) der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU). Konstanz, 25 S. + Anhang. https://doi.org/10.48787/kops/subolakes/352-2-rknkh5p4h4u96

Kurzzusammenfassung

Seeufermauern stehen im Verdacht, die ökologischen Bedingungen in ihrem Vorfeld zu beeinträchtigen. In einer vergleichenden Freilanduntersuchung am Nordufer des Bodensee-Obersees wurden turbulente Wasserbewegung, Oberflächensedimenttextur, Makrophyten und Makrozoobenthos-Besiedlung an paarweise angeordneten Uferabschnitten mit bzw. ohne Ufermauer verglichen. An ufernahen Probenahmepositionen zeichneten sich die verbauten Uferabschnitte u. a. durch eine signifikant geringere Phytomassedichte der submersen Makrophyten, geringere Makrozoobenthos-Dichten, niedrigere Anzahl der Makrozoobenthos-Genera, -Familien und -Taxa sowie größere Korrosionsraten an Gips-Körpern aus (insgesamt 26 signifikante Unterschiede). An uferfernen Positionen wurden lediglich sieben signifikante Unterschiede festgestellt.

ARMBRUSTER, J. P., MILER, O. & OSTENDORP, W. (2025): Effects of retaining walls influenced by wind and ship waves on the northern shore of Lake Constance. – Report of the Environmental Physics Group at the Limnological Institute of the University of Konstanz for the SuBoLakes project (Ref. No. 35825/01-33/2) of the German Federal Environmental Foundation (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, DBU). Konstanz, 25 pp + appendix. https://doi.org/10.48787/kops/subolakes/352-2-rknkh5p4h4u96

Abstract

Retaining walls are suspected of impairing the ecological conditions in their foreshore. In a comparative field study, on the northern shore of Lake Constance, turbulent water movement, surface sediment texture, macrophytes and macroinvertebrates were compared based on paired shore sections with and without retaining walls. At nearshore positions, the reinforced shore sections were characterised by significantly lower phytomass densities of submerged macrophytes, lower macroinvertebrate densities, lower numbers of macroinvertebrate genera, families and taxa as well as higher corrosion rates on gypsum bodies (a total of 26 significantly different parameters). Only seven significant differences were found at offshore positions.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
2 Untersuchungsgebiet 1
3 Untersuchungsflächen 2
4 Messgrößen 3
4.1 Ziel-(Response-)Variablen 3
4.2 Störvariablen 4
4.3 Design und statistische Auswertung 5
5 Methodik 5
5.1 Ziel- (Response-)Variablen 5
5.1.1 Turbulente Wasserbewegungen 5
5.1.1.1 Korrosionsrate der Gipskörper 5
5.1.2 Oberflächensedimente 6
5.1.2.1 Textur 6
5.1.2.2 Deckungsgrad von Geröllen 6
5.1.3 Makrophyten 6
5.1.3.1 Deckungsgrad auf dem Seeboden 6
5.1.3.2 Aschefreie Phytomassedichte 7
5.1.3.3 Prozentuale Deckungsanteile der Arten und Artenzahl 7
5.1.3.4 Sohlniveau der oberen Wuchsgrenze der submersen Makrophyten 7
5.1.4 Makroinvertebraten 7
5.1.4.1 Standörtliche Substrate 7
5.1.4.2 Künstliche Substrate 8
5.1.4.3 Auswertung 10
5.2 Störvariablen 10
5.2.1 Länge des Uferabschnitts 10
5.2.2 Exposition der Uferlinie 10
5.2.3 Breite und Neigung der unteren Eulitoral-Zone 10
5.2.4 Breite und Neigung des Sublitorals 11
5.2.5 Sohlniveau der Probenahmepositionen 11
6 Ergebnisse 11
6.1 Prüfung der Voraussetzungen 11
6.2 Sohlniveau der Probenahmepositionen 11
6.3 Turbulente Wasserbewegungen 12
6.3.1 Korrosionsrate der Gipskörper 12
6.4 Oberflächensedimente 14
6.4.1 Textur 14
6.4.2 Deckungsgrad von Geröllen 14
6.5 Submerse Makrophyten 14
6.5.1 Vegetationsbedeckung 14

6.5.2 Phytomasse 15
6.5.3 Deckungsanteile der Arten und Artenzahl 15
6.5.4 Obere Makrophytengrenze 15
6.5.4.1 OMGmin 15
6.5.4.2 OMG10 15
6.5.4.3 OMG50 16
6.6 Makroinvertebraten 16
6.6.1 Standörtliche Substrate 16
6.7 Künstliche Substrate 17
6.7.1 Betonplatte 17
6.7.2 Ziegelgruppe 18
6.7.2.1 Allgemein 18
6.7.2.2 „Ziegel Vorne“ (Öffnung landseits) 18
6.7.2.3 „Ziegel Mitte“ (Öffnung oben) 18
6.7.2.4 „Ziegel Hinten“ (Öffnung seeseits) 18
6.7.3 Gabione 19
7 Diskussion 19
7.1 Störvariablen 20
7.2 Turbulente Wasserbewegungen 20
7.3 Oberflächensedimente 21
7.4 Makrophyten 22
7.5 Makroinvertebraten 22
8 Zusammenfassung 23
9 Danksagung 23
10 Quellenverzeichnis 23

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht ist Teil der Untersuchungen des dritten Arbeitspaketes (AP3) *Messung und Modellierung von Wellen* im Projekt *SuBoLakes – Umweltverträgliche Freizeitschifffahrt auf Seen in Deutschland*, das durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wird (Az. 35825/01-33/2; https://www.subolakes.de/projekt/).

Seeufer sind Übergangslebensräume, die terrestrische und pelagiale Ökosysteme von Seen verbinden (Francis & Schindler 2009; Strayer & Findlay 2010; Vadeboncoeur et al. 2011). Sie stellen einzigartige Habitate für Pflanzen, Invertebraten, Amphibien, Fische und Vögel bereit und sind Zonen des Austausches von organischem Material sowie Nährstoffen zwischen terrestrischen und pelagialen Lebensräumen (Strayer & Findlay 2010; Vadeboncoeur et al. 2011; Wensink 2016; Wetzel 2001).

Viele Seeufer unterliegen einem hohen anthropogenen Nutzungsdruck. Damit gehen uferstrukturelle Veränderungen einher, die der Erosionssicherung (Ufermauern), dem Hochwasserschutz, der Erholung (Strandbäder) und dem Wassersport dienen (Häfen, Steganlagen). Am Bodensee-Obersee sind ca. 63 % der gesamten Uferlänge durch Uferbauwerke verändert. Den größten Anteil aller Uferverbauungen nehmen dabei Betonmauern oder Mauern aus gesetzten und verfugten Steinen mit 33 % ein (Teiber-Sießegger 2009).

Ufermauern stehen unter dem Verdacht, die Integrität der Seeuferzone als Ökoton zu beeinträchtigen (Brauns et al. 2007; Trial et al. 2001). Damit stehen sie dem Umweltziel der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL), den „guten ökologischen Zustand“ für alle berichtspflichtigen Seen zu erreichen, entgegen (Argillier et al. 2023; Poikane et al. 2020; Völker et al. 2016).

Der Schwerpunkt der Untersuchungen zu den Auswirkungen von Ufermauern lag jedoch bisher im marinen Bereich. An Binnenseen wurden bislang nur wenige Studien durchgeführt (zuletzt Ostendorp et al. 2019 und die darin aufgeführte Literatur).

Somit besteht diesbezüglich noch beträchtlicher Forschungsbedarf, der sich v. a. aus den Monitoring-Verpflichtungen der EG-WRRL ableitet. Dabei mangelt es an spezifischen biologischen Bewertungsmethoden und routinemäßiger Überwachung des uferstrukturellen Zustands (Poikane et al. 2020).

In diesem Beitrag untersuchen wir, inwieweit bodennahe Strömung und Turbulenz, Textur der Oberflächensedimente, Makrophyten und Makrozoobenthos durch das Vorhandensein von Ufermauern beeinflusst werden. Wir erwarteten, dass

1. sich in einer ufernahen Zone signifikante Unterschiede zwischen mit Ufermauer verbauten und naturnahen Ufern zeigen,
2. die signifikanten Unterschiede in einer uferfernen Zone verschwinden.

Das Probenahme-Design wurde so angelegt, dass die Effekte von Störvariablen weitgehend ausgeschlossen wurden, wodurch signifikante Unterschiede zwingend auf die Existenz der Ufermauer zurückgeführt werden können.

Die Ergebnisse sollen eine Einschätzung über die Wirkungen von Ufermauern im Hinblick auf die Umweltziele der EG-WRRL erlauben und Hinweise für künftige Renaturierungsmaßnahmen geben.

2 Untersuchungsgebiet

Der Bodensee ist der drittgrößte (536 km^2) und zweittiefste (251 m) See Zentraleuropas (IGKB 2004). Er teilt sich in den seichteren, mesotrophen Untersee sowie den tiefen, oligotrophen Obersee (472 km^2) auf. Der Anteil des Litorals (0–10 m Wassertiefe) an der Gesamtfläche beträgt 14 % (66 km^2). Der Bodensee ist einer der letzten großen Voralpenseen mit einem naturnahen Jahreswasserstandsgang. Die jahreszeitlichen Schwankungen des Wasserstands von im langjährigen Durchschnitt 1,9 m werden zu großen Teilen durch das nival-glaziale Abflussregime des Alpenrheins hervorgerufen. Im langjährigen Mittel erreicht der Pegel im Februar/März seinen niedrigsten und im Juni seinen Höchststand. Der Mittelwasserstand des Obersees liegt bei 395,24 m NHN (Periode 01. Dezember 1990 bis 30. November 2020). Am Bodensee dominieren Winde aus

West- bzw. Südwest (230–290°). Im Uferbereich finden sich eiszeitliche Geschiebe (Grundmoräne) und fluvioglaziale Schotter und Sande, die teils mit geringer Mächtigkeit über der Oberen Süßwassermolasse liegen. Stellenweise treten die Molasseplatten auch an die Oberfläche.

3 Untersuchungsflächen

Die Geländeuntersuchungen und Probenahmen wurden am nördlichen Ufer des Bodensee-Obersees zwischen Überlingen und Nonnenhorn durchgeführt.

Fünf Uferstrecken wurden ausgewählt, um das Nordufer möglichst gut abzudecken (Abbildung 1). Gleichzeitig spiegeln die fünf Uferstrecken einen von West nach Ost verlaufenden Gradienten der Wellenbelastung wider. Bei der Auswahl der Uferstrecken wurde darauf geachtet, dass zusätzliche Beeinträchtigungen wie beispielsweise Badebetrieb oder Steganlagen keine Rolle spielten.

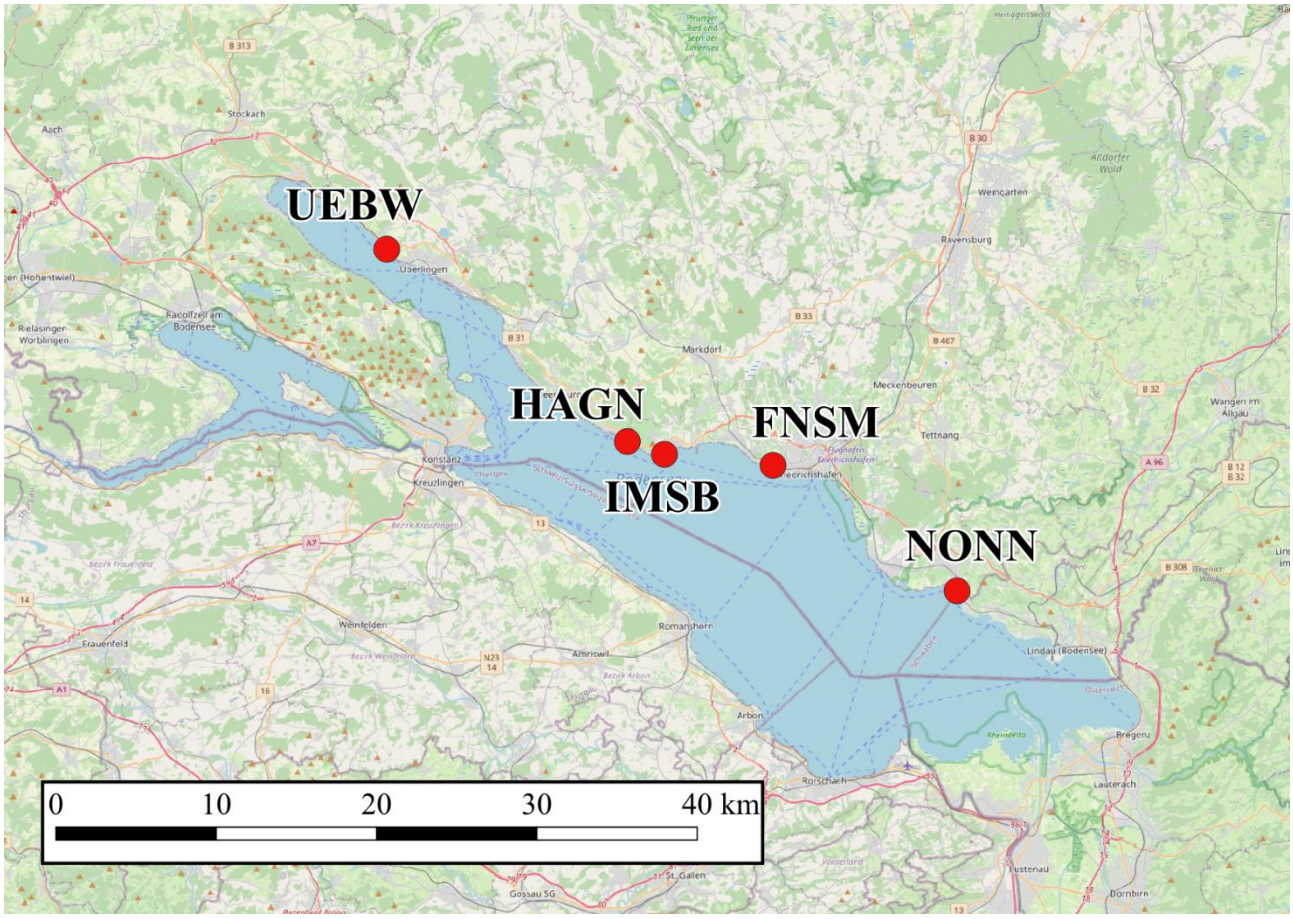

Abbildung 1: Übersicht über die Lage der fünf Untersuchungsflächenpaare am nördlichen Bodenseeufer. Dargestellt sind die Ufer-strecken in Überlingen (UEBW), Hagnau (HAGN), Immenstaad (IMSB), Friedrichshafen (FNSM) und Nonnenhorn (NONN); Kartengrundlage: Open Street Maps.

Eine Uferstrecke setzte sich jeweils aus

a) einem mit Ufermauer verbauten Abschnitt („TEST“, Abbildung 2a) und
b) einem unverbauten, naturnahen Uferabschnitt („REF“, Abbildung 2b)

zusammen.

An jedem TEST- und REF-Abschnitt wurden

a) eine ufernahe (NS) und
b) eine uferferne Probenahmeposition (OS)

ausgewiesen.

Zunächst wurden die Probenahmepositionen einer Uferstrecke am TEST-Abschnitt festgelegt (NS – 1,5 m und OS – 10 m uferliniennormal seewärts des Mauerfußes). Anschließend wurden am REF-Abschnitt der selben Uferstrecke die entsprechenden Positionen so festgelegt, dass sie annähernd die gleiche Wassertiefe, aber nicht notwendigerweise die gleiche Uferentfernung hatten. Alle Positionsdaten verwenden WGS84 UTM 32N als Koordinatenbezugssystem. Höhenangaben sind im Bezugssystem DHHN92 angegeben (m NHN Normalhöhennull). Eine Liste mit den Koordinaten sowie den Sohlniveaus aller Probenahmepositionen findet sich im Anhang S1, Tabelle S1.A.

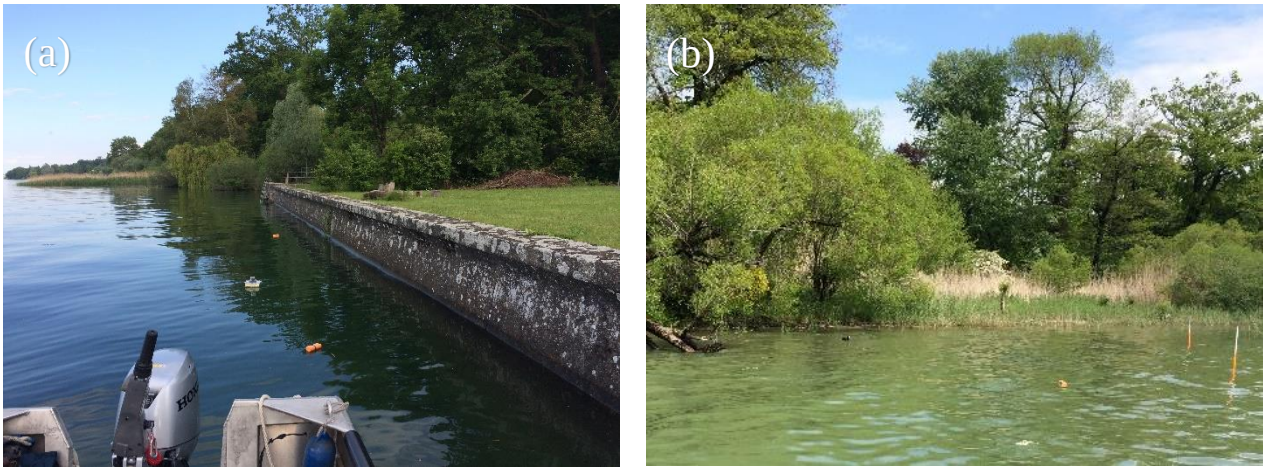

Abbildung 2: (a) Mit Ufermauer bewehrter Uferabschnitt in Friedrichshafen (FNSM-TEST). Zu erkennen sind die beleuchtete Boje für den Drucksensor (Wellenmessungen) sowie die orangefarbenen Bojen, welche die Lage der Probenahmepositionen kennzeichnen; UTM 32N 533984 5278016; 13. Juni 2019 © J. P. Armbruster. (b) Naturnaher Uferabschnitt in Friedrichshafen (FNSM-REF). Am Ufer ragt ein Sturzbaum (linker Bildrand: Weide, *Salix* sp.) in den See hinein; UTM 32N 533815 5278071; 23. Mai 2019 © J. P. Armbruster.

4 Messgrößen

An jeder der 20 Probenahmepositionen wurden die nachfolgend genannten Zielvariablen *Y* sowie potentielle Störvariablen *Z* gemessen. Die Vorgehensweise bei der Erfassung der Variablen folgt in weiten Teilen Ostendorp et al. 2019. Details sind in Kapitel 5 beschrieben.

4.1 Ziel-(Response-)Variablen

1) Korrosionsrate ($\Delta m/\Delta t$, g m^{-2} h^{-1}) von standardisierten Gipskörpern als Indikator der bodennahen Strömung und Turbulenz (*Gypsum dissolution technique*, *GDT*),
2) Prozentuale Anteile der Korngrößenklassen der Oberflächensedimente (*PSD*, %),

3) Flächendeckungsgrad von Geröllen (*d* > 35 mm) auf dem Seeboden (*COC*, m^2 m^{-2}),
4) Deckungsgrad der submersen Makrophyten-Vegetation (*SMC*, %),
5) aschefreie Phytomassendichte (*AFDW*, g m^{-2}),
6) prozentuale Deckungsanteile der einzelnen submersen Makrophyten-Arten (%),
7) Artenzahl der submersen Makrophyten (*SNSM*, Arten),
8) Sohlniveau der oberen Wuchsgrenze der submersen Makrophyten – Obere Makrophytengrenze (*OMG*, m NHN),
9) Gesamtdichte der Makroinvertebraten (MZB) im standörtlich vorliegenden Substrat [*pz_insitu*, Individuen m^{-2}] sowie in drei Typen künstlicher Substrate, welche niedrige (Betonplatte *pz_Bet*, Individuen m^{-2}), mittlere (Hochlochziegel *pz_Zvor*, *pz_Zmit*, *pz_Zhin*, Individuen m^{-2}) und hohe Substratkomplexität (Gabione *pz_Gab*, Individuen m^{-2}) simulieren,
10) daraus abgeleitet verschiedene MZB-Metrics (vgl. https://gewaesser-bewertung-berechnung.de/index.php/perlodes-online.html).

4.2 Störvariablen

1) Länge des Uferabschnitts (*lAbs*, m)
2) Exposition der Uferlinie (*Expo*, °)
3) Breite der unteren Eulitoral-Zone (*wEul*, m)
4) Neigung der unteren Eulitoral-Zone (*nEul*, °)
5) Breite des Sublitorals (*wSub*, m)
6) Neigung des Sublitorals (*nSub*, °)
7) Sohlniveau der Probenahmepositionen (*WD*, m NHN)

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zu gewährleisten, wurde auf eine möglichst zeitgleiche Beprobung der Uferstrecken geachtet (Abbildung 3). Die Beprobung der Uferabschnitte einer Uferstrecke fand immer am selben Tag statt.

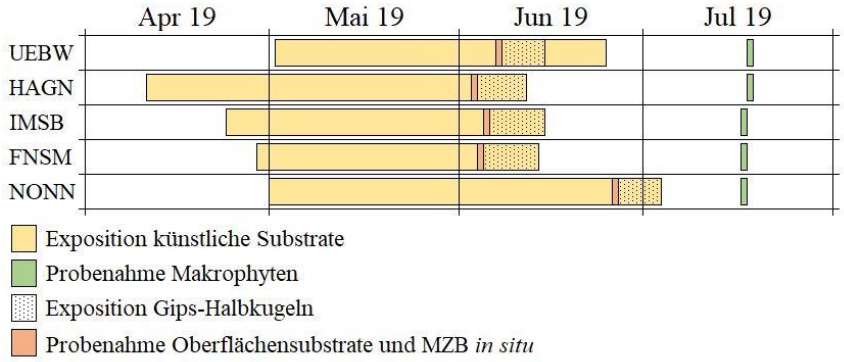

Abbildung 3: Übersicht über die im Zeitraum von April bis Juli 2019 durchgeführten Freilanduntersuchungen.

4.3 Design und statistische Auswertung

Das Untersuchungsdesign entsprach einem faktoriellen Probenahmeplan mit paarweisen Messwerten ($n_1 = n_2 = 5$ Uferstrecken), wobei TEST-Abschnitte (mit Ufermauer) und REF-Abschnitte (naturbelassene Ufer) verglichen wurden. Die Vergleiche der Zielvariablen Y wurden in gleicher Weise für die ufernahe (NS) und die uferferne Position (OS) durchgeführt:

1. $Y_{NS,TEST} - Y_{NS,REF} = \Delta Y_{NS}$
2. $Y_{OS,TEST} - Y_{OS,REF} = \Delta Y_{OS}$

ΔY wurde parametrisch (t-Test für paarweise angeordnete Messwerte, H_0: $\Delta Y = 0$) und nicht-parametrisch (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test) getestet.

Wir erwarteten, dass signifikante Abweichungen der Zielvariablen von Null ($\Delta Y \neq 0$; $p < 0{,}05$) für ΔY_{NS} wesentlich häufiger und ausgeprägter auftreten, als für ΔY_{OS}. Weiterhin erwarteten wir, dass sich die paarweisen Differenzen der Störgrößen Z nicht von Null unterscheiden. Unter der Gültigkeit beider Hypothesen kennzeichnet die NS-Position den Mauereffekt, während die OS-Position die räumliche Variabilität abbildet. Die statistischen Analysen wurden mit R 4.4.1 (R Development Core Team 2024) und RStudio 2024.09.0 (RStudio Inc. 2024) durchgeführt.

5 Methodik

5.1 Ziel- (Response-)Variablen

5.1.1 Turbulente Wasserbewegungen

5.1.1.1 Korrosionsrate der Gipskörper

Bei der Gipskörpertechnik (*Gypsum dissolution technique* (*GDT*)) wird der Masseverlust von in Wasser exponierten Gips-Körpern (hier: Gips-Halbkugeln, Abbildung 5) als ein Maß für gleichgerichtete und turbulente Strömungen am Gewässerboden verwendet (Muus 1968; Doty 1971). Zur Anfertigung einer Gips-Halbkugel wurden 100 ml deionisiertes Wasser (20 °C) vorgelegt und 143 g Gips der Sorte Spezial A (Alpha-Halbhydrat, CASEA GmbH, Ellrich, Deutschland) in einem handelsüblichen Gipserbecher für etwa drei Minuten eingerührt. Danach wurde die Gipsmasse für zwei Minuten ruhen gelassen („Sumpfen“) und im Anschluss wieder für drei Minuten fertig gerührt. Anschließend wurde die Gipsmasse in eine selbstangefertigte Gussform aus Silikonkautschuk (Innendurchmesser $d = 80$ mm) gegossen. Die innere Wandung wurde vorab mit dem Trennmittel CKC (CASEA GmbH, Ellrich, Deutschland) ausgestrichen. Im noch fließfähigen Zustand der Gipsmasse wurde mittig ein mit handelsüblicher Knetmasse verpfropfter Trinkhalm ($l = 40$ mm, $d = 8$ mm) für die spätere Befestigung im Substrat sowie ein Plastiketikett zur Identifikation eingedrückt. Nach 30 min Abbinden wurden die Halbkugeln aus den Silikonhalbschalen ausgeschalt. Es folgte zunächst die Lufttrocknung unter Laborbedingungen (20 °C) sowie anschließend eine Trocknung im belüfteten Trockenschrank bei 45 °C für jeweils 24 h, um ein gewichtskonstantes Formstück zu erhalten.

Im Ausgangszustand hatte die Gips-Halbkugel eine Oberfläche von $A_0 = 159{,}8$ cm² bei einem Durchmesser von $d = 80$ mm, einer Höhe von $h = 40$ mm und einer zylinderförmigen Höhlung mit einem Durchmesser von $d = 8$ mm. Die Größe der Halbkugel wurde in Anlehnung an die am Standort vorkommenden Grobkiese ($d_{eq} = 32$–63 mm) und Gerölle ($d_{eq} > 63$ mm) gewählt.

Die Gips-Halbkugeln hatten im Ausgangszustand eine mittlere Masse von $m_0 = 160{,}4$ g ($SD = 13{,}3$ g, N = 60). Die Masse des eingegossenen Plastiketiketts von $m = 0{,}5$ g und des eingegossenen Trinkhalms von $m = 0{,}1$ g ist dabei bereits in Abzug gebracht. Der Knetpfropfen wurde vor dem Wiegen aus dem Trinkhalm entfernt.

Die Gips-Halbkugeln wurden von einem Forschungstaucher mit der Kalotte nach oben, ebenerdig und möglichst bündig auf dem Seegrund platziert und mit einem feuerverzinkten Nagel auf dem Seeboden verankert. Pro Uferabschnitt wurden sechs Gips-Halbkugeln installiert, je drei Gips-Halbkugeln in der ufernahen (NS) und drei in der uferfernen Zone (OS). Eine Übersicht über den Expositionszeitraum gibt Abbildung 3. Aus den

gemessenen Masseverlusten der Gipskörper wurde die Korrosionsrate ($\Delta m/\Delta t$, g h^{-1} m^{-2}) berechnet, indem der Masseverlust in Bezug zu Ausgangsmasse, Expositionsdauer und Oberfläche der Gips-Halbkugeln zu Beginn der Exposition gesetzt wurde. Anschließend wurde aus den drei Messwerten einer Zone ein Mittelwert gebildet.

5.1.2 Oberflächensedimente

Die Beprobung der Oberflächensedimente fand am 07. Juni 2019 (UEBW), 03. Juni 2019 (HAGN), 05. Juni 2019 (IMSB), 04. Juni 2019 (FNSM) und 26. Juni 2019 (NONN) statt (Abbildung 3). Die Probenahme wurde von Forschungstauchern durchgeführt.

5.1.2.1 Textur

Die Oberflächensedimente wurden mit einer Kastendredge beprobt (Maße Kastendredge: 0,30 m × 0,19 m × 0,15 m). Die Kastendredge wurde etwa 0,03 m tief in das Sediment gedrückt und 0,3 m weit gezogen, sodass insgesamt ein Volumen von etwa 0,00171 m^3 beprobt wurde. Größere Geröllstücke wurden manuell in die Kastendredge geschoben. Da die Vorgaben – insbesondere bzgl. der zu erfassenden Sedimenttiefe – häufig nicht eingehalten werden konnten, war eine quantitative, volumenbezogene Probenahme nicht möglich. Im Labor wurde durch eine Reihe aufeinanderfolgender Siebungen mit Maschenweiten zwischen 112 mm und 0,063 mm die frische Sedimentprobe quantitativ aufgetrennt (Maschenweiten bzw. Klassengrenzen nach ISO 3310). Die Massen der Korngrößenfraktionen wurden ins Verhältnis zur Masse der Gesamtprobe gesetzt, um den Anteil der Korngrößenklassen an der Gesamtprobe zu berechnen (*PSD*, %). Da mehrere Kornklassen ein einheitliches Verhalten zeigten (vgl. Anhang S4, Tabelle S4.A), wurden die fünfzehn unterschiedenen Fraktionen zu fünf Fraktionen zusammengefasst: Mittelsand (*mS*, <0,63 mm), grobsandiger Feinkies (*fK*, 0,63 – 6,3 mm), Mittelkies (*mK*, 6,3 – 35,5 mm), Grobkies (*gK*, 35,5 – 112 mm) und Gerölle (*gG*, >112 mm).

5.1.2.2 Deckungsgrad von Geröllen

Auf einer Grundfläche von 0,50 m × 0,25 m wurden alle Gesteinskörper mit einem Durchmesser von etwa >35 mm vom Seeboden abgesammelt. Die Gesteinskörper wurden im Labor gereinigt, getrocknet und einzeln gewogen, auf ebener Fläche ausgelegt und zusammen mit einem Meterstab (Kalibrationsmaßstab) fotografiert. Die Fotos der Gesteinskörper wurden auf Papier ausgedruckt und die darauf abgebildeten Steine einzeln ausgeschnitten. Jede Stein-Projektionsfläche wurde unter konstanten Luftfeuchtigkeitsbedingungen einzeln mit einer Präzisionswaage gewogen (Genauigkeit: 0,1 mg). Mit dem Meterstab als Referenz wurde für jeden Gesteinskörper die Projektionsflächengröße (m^2) berechnet. Die Summe aller Projektionsflächen wurde durch die Probenahmefläche (0,125 m^2) geteilt, um den Deckungsanteil der Gerölle (= *Coverage of Cobbles*, *COC*, m^2 m^{-2}) zu erhalten.

5.1.3 Makrophyten

Die Geländeerfassung der Makrophyten wurde am 17. und am 18. Juli 2019 durchgeführt (Abbildung 3).

5.1.3.1 Deckungsgrad auf dem Seeboden

Der Deckungsgrad der submersen Makrophyten wurde an den Probenahmepositionen durch Forschungstaucher visuell geschätzt (*SMC*, %).

5.1.3.2 Aschefreie Phytomassedichte

Die Makrophyten-Biomasse wurde in einer vorher festgelegten Bezugsfläche quantitativ beprobt, wobei folgendermaßen vorgegangen wurde:

(i) bei einer sehr geringen Makrophyten-Deckung (<0,1 %) wurde ein Streifen von 0,5 m bis 1 m Breite und 7,5 m bis 15 m Länge abgesteckt und alle darin befindlichen Pflanzen verprobt;

(ii) bei einer geringen Deckung (<10 %) wurden eine oder mehrere repräsentative Flächen von 1 m Breite und 1,5 m Länge mit einem Meterstab markiert und anschließend quantitativ abgeerntet;

(iii) bei einer hohen Vegetationsdeckung (>10 %) wurden eine oder mehrere repräsentative Grundflächen von 0,4 m × 0,4 m ausgewählt und quantitativ abgeerntet.

Die Probennahme wurde von Forschungstauchern durchgeführt. Im Labor wurde das Material gründlich mit Wasser gereinigt und von Kleinstlebewesen (v. a. *Dreissena rostriformis bugensis* ANDRUSOV, 1897) sowie von mineralischem und pflanzlichem Totmaterial befreit. Eine Stichprobe wurde für mindestens 24 h im Trockenschrank bei 80 °C getrocknet. Mit einer Kugelmühle TYP 03.502, VOLT (Fritsch GmbH, Idar-Oberstein, Deutschland) wurde das getrocknete Pflanzenmaterial fein gemörsert. Aus dem Glühverlust (*LOI*, 560 °C für 8 h) wurde die aschefreie Phytomasse ermittelt und auf die Probenahmefläche bezogen (*AFPM*, g m^{-2} Trockensubstanz).

5.1.3.3 Prozentuale Deckungsanteile der Arten und Artenzahl

Das im Rahmen der Biomasse-Beprobung geerntete Pflanzenmaterial wurde mit der gängigen Bestimmungsliteratur bis auf Artniveau bestimmt (van de Weyer et al. 2018a, 2018b). Für jede Art wurde der prozentuale Anteil an der nassen Biomasse geschätzt. Unterschieden wurden die Arten: *Chara aspera* WILLD. (*%Cha_as*), *Chara contraria* KÜTZ. (*%Cha_co*), *Chara globularis* THUILL. (*%Cha_gl*), *Stuckenia pectinata* (L.) BÖRNER (*%Stu_pe*), *Potamogeton perfoliatus* L. (*%Pot_pe*), *Myriophyllum spicatum* L. (*%Myr_sp*), *Najas marina* L. (*%Naj_ma*), *Potamogeton friesii* RUPR. (*%Pot_fr*) und *Potamogeton lucens* L. (*%Pot_lu*).

5.1.3.4 Sohlniveau der oberen Wuchsgrenze der submersen Makrophyten

Die Obere Makrophytengrenze (*OMG*) gibt an, bis zu welchem Sohlniveau (m NHN) submerse Makrophyten zum Seeufer hin vorkommen. Unterschieden wurden auf Basis visueller Schätzung drei Grenzniveaus: das Sohlniveau mit dem uferliniennächsten Vorkommen von Unterwasserpflanzen (*OMGmin*) sowie das Sohlniveau bei dem die Vegetation eine durchschnittliche Deckung von 10 % (*OMG10*) bzw. 50 % erreicht (*OMG50*). An jeder *OMG*-Position wurde die aktuelle Wassertiefe gemessen. Anhand der Tagesmesswerte des Pegels Konstanz-Hafen konnte aus der gemessenen Wassertiefe das Sohlniveau der Positionen errechnet werden.

5.1.4 Makroinvertebraten

Das Makrozoobenthos (MZB) wurde neben dem standörtlich vorliegenden Substrat (*in situ*) auch auf drei verschiedenen Typen von künstlichen Exponaten untersucht. Alle im Wasser durchgeführten Arbeiten wurden von Forschungstauchern erledigt.

5.1.4.1 Standörtliche Substrate

Die Beprobung der *in situ* vorliegenden Substrate (Abbildung 4a) wurde mit einer Saugpumpe (Eigenbau Limnologisches Institut der Universität Konstanz) durchgeführt. Es wurde eine Grundfläche von 0,25 m × 0,5 m (0,125 m²) beprobt. Das Feindsediment wurde manuell aufgewirbelt. Alle innerhalb der Probenahmefläche liegenden Gerölle (ca. *d* >35 mm) wurden händisch verprobt, das aufsitzende MZB im Labor abgewaschen

und mit der Gesamtprobe zusammengeführt. Die Probenahme fand am 07. Juni 2019 (UEBW), 03. Juni 2019 (HAGN), 05. Juni 2019 (IMSB), 04. Juni 2019 (FNSM) und 26. Juni 2019 (NONN) statt (Abbildung 3).

Abbildung 4: (a) Standörtlich vorliegendes Substrat bei Friedrichshafen (FNSM-REF). Zu sehen sind grobe Kiese und Gerölle die zum Teil von *Dreissena rostriformis bugensis* ANDRUSOV, 1897 bewachsen sind. Dazwischen wachsen Armleuchteralgen; 17. Juli 2019; UTM 32N 533815 5278071 © W. Ostendorp. (b) „Betonplatte“ kurz nach der Installation auf dem Seeboden bei Nonnenhorn (NONN-TEST). Zu erkennen ist die glatte, strukturlose Oberfläche der Betonplatte. Die Betonplatte wurde mit einem Stahlhaken auf dem Seeboden fixiert; 01. Mai 2019; UTM 32N 545440 5269883 © W. Ostendorp. (c) „Ziegelgruppe“ kurz nach der Installation auf dem Seeboden bei Nonnenhorn (NONN-TEST). Zu erkennen sind die beiden Stahlhaken, welche die Ziegelgruppe auf dem Seeboden verankern; 01. Mai 2019; UTM 32N 545440 5269883 © W. Ostendorp. (d) „Gabione“ kurz nach der Installation auf dem Seeboden bei Nonnenhorn (NONN-TEST). Zu sehen ist, wie sich die Kiese innerhalb des Raschelsacks flach ausbreiten. Der Stahlhaken zur Verankerung auf dem Seeboden, wurde mittig durch die Gabione geführt.; 01. Mai 2019; UTM 32N 545440 5269883 © W. Ostendorp.

5.1.4.2 Künstliche Substrate

Zusätzlich zur Probenahme im standörtlichen Substrat wurden künstliche Exponate hergestellt, um drei Stufen der Substratkomplexität zu simulieren (niedrig – mittel – hoch; Abbildung 4b–d). Die Exponate wurden mind. sechs Wochen vor der Probenahme auf dem Seeboden platziert und dort mittels Stahlhaken verankert. Eine Übersicht über die Zeitpunkte von Positionierung und Bergung ist in Tabelle 1 wiedergegeben (siehe auch Abbildung 3). Pro Position eines Uferabschnitts wurden drei Replikate eingesetzt, um möglichen Verlusten zu begegnen. Von den drei Replikaten wurde nur eines ausgewertet. Zum Ende der Exposition wurden die künstlichen Exponate unter Wasser verprobt. Das MZB wurde im Labor abgespült und bis zur Auszählung in 70 %-Ethanol (v/ v) konserviert.

Tabelle 1: Übersicht über die Zeitpunkte der Ausbringung und Bergung der künstlichen Exponate sowie die Anzahl der Expositionstage.

	UEBW	HAGN	IMSB	FNSM	NONN
Datum Ausbringung	02.05.2019	11.04.2019	23.04.2019	29.04.2019	01.05.2019
Datum Bergung	24.06.2019	11.06.2019	14.06.2019	13.06.2019	03.07.2019
Anzahl Expositionstage	54	62	53	46	63

Betonplatte

Als künstliches Exponat mit geringer Substratkomplexität (niedrig) wurde eine Betonplatte mit den Maßen 0,250 m × 0,250 m × 0,050 m verwendet. Diese wurde horizontal auf den Seeboden gesetzt und mit einem Stahlhaken fixiert (Abbildung 4b). Die „von MZB besiedelbare“ Oberfläche, d. h. frei vorliegende Fläche einer Betonplatte, betrug 0,113 m^2. In die Berechnung der besiedelbaren Oberfläche flossen die vier schmalen Seitenflächen sowie die große, nach oben zeigende Fläche der Betonplatte ein.

Ziegelgruppe

Die Ziegelgruppe stellte das Exponat mit mittlerer Substratkomplexität dar. Eine Ziegelgruppe bestand aus drei Hochlochziegeln mit den Maßen 0,240 m × 0,115 m × 0,113 m, die mit schmalen Umreifungsbändern fixiert wurden (Abbildung 4c). Während beim mittleren Ziegel die Öffnung nach oben zeigte („Ziegel Mitte“), waren die Öffnungen der Rand-Ziegel landseits („Ziegel Vorne“) bzw. seeseits gerichtet („Ziegel Hinten“). Aufgrund der Ausrichtung der Ziegel unterschied sich auch deren besiedelbare Oberfläche. Beim „Ziegel Vorne“ sowie beim „Ziegel Hinten“ betrug diese jeweils 0,350 m^2; beim „Ziegel Mitte“ 0,323 m^2. In die Berechnung der besiedelbaren Oberfläche flossen neben den großen Seitenflächen der Ziegel auch die Flächen der Lochinnenräume ein. Flächen, die von den benachbarten Ziegeln sowie vom Seeboden bedeckt waren, wurden nicht berücksichtigt. Die Ziegelgruppe wurde mit zwei Stahlhaken, welche durch die Öffnungen des mittleren Ziegels gesteckt wurden, auf dem Seeboden verankert. Bei der Bergung wurden die drei Ziegel einer Ziegelgruppe noch unter Wasser voneinander getrennt, so dass eine separate Auswertung möglich war.

Gabione

Als drittes Exponat wurde ein mit Kiesen gefüllter handelsüblicher Raschelsack verwendet („Gabione“, Abbildung 4d). Die Gabione war das dem standörtlich vorliegenden Substrat am nächsten kommende Exponat und simulierte hohe Substratkomplexität.

Jeder Raschelsack wurde mit insgesamt 7.500 g Kiesen gefüllt. Diese setzten sich aus jeweils 2.500 g der Fraktionen *F1* = 11,2–20,0 mm, *F2* = 20,0–35,5 mm und *F3* = 35,5–63,0 mm zusammen. Die Öffnungen der Raschelsäcke wurden verknotet, um den Verlust von Kiesen zu verhindern. Die Raschelsäcke wurden flach auf dem Seeboden positioniert und mit einem Stahlhaken verankert. Zum Ende der Expositionszeit wurden die Gabionen noch unter Wasser vollständig verprobt. Im Labor wurde das MZB vom Raschelsack und von den Kiesen abgespült und konserviert.

Die drei Kies-Fraktionen wurden mittels Siebung aufgetrennt um die Masse der Fraktionen nach der Exposition zu bestimmen (M = 2.331 g, SD = 297 g, n = 19).

Zur Berechnung der besiedelbaren Oberfläche, wurde angenommen, dass es sich bei den Kiesen in den Raschelsäcken um geometrische Kugeln handelte. Daher wurde als Grundlage für die Berechnungen der mittlere Durchmesser der Fraktionen verwendet (d_{F1} = 15,6 mm; d_{F2} = 27,8 mm & d_{F3} = 49,3 mm). Mit dem Durchmesser wurde für jede Fraktion das mittlere Volumen (V_{F1} = 2,0 cm^3, V_{F2} = 11,19 cm^3 & V_{F3} = 62,55 cm^3) sowie die mittlere Oberfläche (O_{F1} = 765 mm^2 O_{F2} = 2419 mm^2 & O_{F3} = 7620 mm^2) eines einzelnen Gesteinskörpers berechnet.

Aus der Masse einer Fraktion nach der Exposition und der durchschnittlichen Dichte von Bodenseewacken (ρ = 2,73 g m^{-3}) wurde das Gesamt-Volumen der Fraktion berechnet. Indem das Gesamt-Volumen durch das mittlere Volumen eines einzelnen Gesteinskörpers dividiert wurde, erhielt man die durchschnittliche Anzahl an Gesteinskörpern, welche in einer Fraktion vorhanden war. Diese wurde mit der mittleren Oberfläche des einzelnen Gesteinskörpers multipliziert, um die Gesamt-Oberfläche der Fraktion zu erhalten. Zuletzt wurden die Oberflächen der drei Fraktionen einer Gabione addiert, um die besiedelbare Oberfläche einer Gabione zu erhalten.

Die Oberfläche des Raschelsack-Materials wie auch die zusätzlich zu den Ausgangsfraktionen einsedimentierten Feinkiese (*d* <11,2 mm) wurden bei der Berechnung der besiedelbaren Oberfläche nicht berücksichtigt.

5.1.4.3 Auswertung

Das MZB wurde unter Anwendung eines geeigneten Stichprobenverfahrens ausgezählt und unter Zuhilfenahme der gängigen Bestimmungsliteratur determiniert (u. a. Bauernfeind & Humpesch 2001, Eggers & Martens 2001, Glöer 2017, Schmedtje et al. 1992). Seltene Taxa wurden in der Gesamtprobe, häufige Taxa in Stichproben gezählt. Ziel war es, in jeder Probe eine Gesamtzahl von 300 bis 350 Tieren real gezählt zu haben. Eine Übersicht über alle nachgewiesenen Taxa ist im Anhang S6 zu finden. Die Individuenzahlen der Taxa wurden auf die Probenahmefläche bzw. die besiedelbare Oberfläche der künstlichen Exponate bezogen, so dass eine Berechnung vieler WRRL-üblicher Metrics möglich war (insgesamt: 66 Metrics). Die Metrics wurden mit dem ASTERICS Computertool berechnet (https://gewaesser-bewertung-berechnung.de/index.php/perlodes-online.html). Funktionale Metrics (Habitatpräferenzen, Ernährungstypen, Fortbewegungstyp) wurden basierend auf insgesamt 10 Punkten berechnet (https://www.freshwaterecology.info). Jedes Indikatortaxon besitzt 10 Punkte, die sich z. B. auf unterschiedliche Habitatpräferenzen verteilen können.

5.2 Störvariablen

Die im folgenden Abschnitt beschriebenen Störgrößen Z wurden, wenn nicht anders geschrieben, mittels GIS-Software berechnet (ArcGIS 10). Als Datengrundlage wurde das Tiefenmodell des Bodensees aus dem Tiefenschärfe-Projekt der IGKB verwendet (Wessels et al. 2017).

5.2.1 Länge des Uferabschnitts

Die Länge des Uferabschnitts (*lAbs*, m) gibt die Länge der gleichförmigen Ufermauer (TEST) bzw. des ununterbrochenen, naturbelassenen Uferabschnitts an (REF).

5.2.2 Exposition der Uferlinie

Die Exposition (*Expo*, °) gibt den Richtungswinkel seewärts und senkrecht zur Uferlinie an.

5.2.3 Breite und Neigung der unteren Eulitoral-Zone

Als untere Eulitoral-Zone wurde der Bereich zwischen mittlerer Mittelwasserlinie (395,23 m NHN) und mittlerer Niedrigwasserlinie (394,58 m NHN) festgelegt. Für diese Zone wurden Breite *wEul* (m) und Neigung *nEul* (°) berechnet.

5.2.4 Breite und Neigung des Sublitorals

Als Sublitoral wurde die Uferzone zwischen mittlerer Niedrigwasserlinie (394,58 m NHN) und Haldenkante (hier angenommen als 390,58 m NHN, d. h. 4,00 m unterhalb der mittleren Niedrigwasserlinie) bezeichnet. Für diese Zone wurden Breite *wSub* (m) und Neigung *nSub* (°) berechnet.

5.2.5 Sohlniveau der Probenahmepositionen

Aus der an den Probenahmepositionen gemessenen Wassertiefe (Geländeerfassung) wurde anhand des Tagespegels (Messstation Konstanz) das Sohlniveau berechnet (*WD*, m NHN).

6 Ergebnisse

6.1 Prüfung der Voraussetzungen

Die paarweisen Differenzen ΔZ der Störvariablen Länge des Uferabschnitts (*lAbs*), Exposition (*Expo*), Breite unteres Eulitoral (*wEul*) sowie Breite bzw. Neigung des Sublitorals (*wSub* bzw. *nSub*) waren nicht signifikant verschieden von Null.

Signifikante Unterschiede wurden bei den paarweisen Differenzen der Neigung des unteren Eulitorals festgestellt (*nEul*). Dabei zeichneten sich die mit Ufermauer bewehrten Uferabschnitte (TEST) durch höheres Gefälle als die naturbelassenen Uferabschnitte (REF) aus (Tabelle 2). Eine Liste mit den Störvariablen aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S2, Tabelle S2.A.

Tabelle 2: Übersicht über die Ergebnisse der paarweisen *t*-Tests der Störvariablen *Z*: Länge des Uferabschnitts (*lAbs*), Exposition (*Expo*), Breite der unteren Eulitoral-Zone (*wEul*), Neigung der unteren Eulitoral-Zone (*nEul*), Breite des Sublitorals (*wSub*) und Neigung des Sublitorals (*nSub*). Angegeben sind Mittelwert sowie Standardabweichung der Störvariablen an TEST- (Z_{TEST}) und an REF-Abschnitten (Z_{REF}, $M \pm SD$, n = 5), Mittelwert und Standardabweichung der paarweisen Differenzen ΔZ sowie *t*- und *p*-Werte.

		Z_{TEST}	Z_{REF}	ΔZ	Statistik	
Variable	Einheit	$M \pm SD$	$M \pm SD$	$M \pm SD$	*t*	*p*
lAbs	m	49 ± 16	141 ± 127	-92 ± 136	-1,52	0,204
Expo	°	199 ± 38	217 ± 28	-18 ± 23	-1,73	0,159
wEul	m	5 ± 4	19 ± 15	-14 ± 16	-1,97	0,120
nEul	°	11,6 ± 6,0	3,7 ± 3,3	7,9 ± 6,2	2,86	0,046
wSub	m	225 ± 141	234 ± 136	-9 ± 41	-0,47	0,665
nSub	°	2,0 ± 2,4	0,9 ± 0,6	1,1 ± 2,8	0,88	0,428

6.2 Sohlniveau der Probenahmepositionen

Im Mittel aller Uferabschnitte (n = 10) lag das Sohlniveau (*WD*) der ufernahen Probenahmepositionen (NS) auf 394,68 m NHN und damit 0,36 m oberhalb der uferfernen Positionen (OS, 394,32 m NHN). Die paarweisen Differenzen ΔZ von *WD* unterschieden sich weder in NS noch in OS signifikant von Null (Tabelle 3). Eine Liste mit den Sohlniveaus aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S1, Tabelle S1.A.

Tabelle 3: Übersicht über die Ergebnisse der paarweisen *t*-Tests des Sohlniveaus der Probenahmepositionen (*WD*). Angegeben sind Mittelwert und Standardabweichung der TEST-Abschnitte Z_{TEST} und der REF-Abschnitte Z_{REF} ($M \pm SD$, n = 5), Mittelwert und Standardabweichung der paarweisen Differenzen ΔZ sowie *t*- und *p*-Werte, jeweils für die ufernahen (NS) und die uferfernen Positionen (OS).

		Z_{TEST}	Z_{REF}	ΔZ	Statistik	
Variable		$M \pm SD$	$M \pm SD$	$M \pm SD$	t	p
WD [m NHN]	NS	394,71 ± 0,28	394,68 ± 0,25	0,03 ± 0,05	1,37	0,243
	OS	394,33 ± 0,22	394,32 ± 0,24	0,01 ± 0,04	0,65	0,553

6.3 Turbulente Wasserbewegungen

6.3.1 Korrosionsrate der Gipskörper

Nach einer durchschnittlichen Expositionsdauer von 190 ± 21 h ($M \pm SD$, n = 60 Gipskörper) hatten die Gips-Halbkugeln zwischen 29,3 und 77,1 % ihrer ursprünglichen Masse verloren. Die Werte für die Korrosionsrate $\Delta m/\Delta t$ lagen zwischen 14,4 und 38,3 g m^{-2} h^{-1} (M = 28,6 g m^{-2} h^{-1}) (Tabelle 4). An den naturnahen Referenz-Abschnitten (REF) unterschied sich $\Delta m/\Delta t$ nahezu nicht zwischen ufernaher (NS) und uferferner Zone (OS). Eine Liste mit den Korrosionsraten aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S3, Tabelle S3.A.

An den NS-Positionen zeigte sich ein schwach signifikanter Mauereffekt, wobei im Mittel $\Delta m/\Delta t$ an verbauten Uferabschnitten (TEST) gegenüber REF um 13 % erhöht war. An den OS-Positionen verschwanden die Unterschiede zwischen TEST- und REF-Abschnitten. Die paarweisen Differenzen ΔY unterschieden sich nicht von Null.

Abbildung 5: Auf dem Seeboden installierte Gips-Halbkugel kurz vor der Bergung an der Uferstrecke in Hagnau (HAGN-REF); UTM 32N 524730 5279557; 14. Juni 2019 © W. Ostendorp. Deutlich zu erkennen ist die allseitige Korrosion der Gips-Halbkugel, welche ursprünglich bis zum Kopf des Nagels gereicht hatte.

Tabelle 4: Übersicht über die Ergebnisse der paarweisen *t*-Tests (bzw. Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test) der Response-Variablen *Y*. Erläuterungen zu den Formelzeichen sind im Text gegeben. Für die ufernahen (NS) und die uferfernen Positionen (OS) sind jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen der mit Ufermauer verbauten Abschnitte Y_{TEST} bzw. der naturnahen Abschnitte Y_{REF} ($M \pm SD$, n = 5), die Mittelwerte und Standardabweichungen der paarweisen Differenzen ΔY sowie *t*- und *p*-Wert angegeben. Die Verwendung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests ist durch blaue Schriftfarbe gekennzeichnet.

		NS					**OS**				
Variable	Einheit	Y_{TEST}	Y_{REF}	ΔY	*t*	*p*	Y_{TEST}	Y_{REF}	ΔY	*t*	*p*
$\Delta m/\Delta t$	g m^{-2} h^{-1}	32,0 ± 3,0	27,7 ± 3,6	4,3 ± 4,1	-2,37	0,076	28,5 ± 2,1	26,4 ± 6,4	2,1 ± 7,2	0,65	0,553
PSD, mS	%	0 ± 0	1 ± 2	-1 ± 2	-1,15	0,313	2 ± 2	3 ± 4	-1 ± 5	-0,58	0,592
PSD, fK	%	2 ± 3	7 ± 6	-4 ± 7	-1,31	0,259	8 ± 11	12 ± 19	-4 ± 23	-0,43	0,692
PSD, mK	%	37 ± 23	20 ± 13	17 ± 28	1,34	0,252	39 ± 15	24 ± 15	16 ± 10	3,34	0,029
PSD, gK	%	31 ± 17	59 ± 15	-28 ± 15	-4,19	0,014	37 ± 8	52 ± 29	-15 ± 32	-1,03	0,360
PSD, gG	%	29 ± 17	12 ± 13	17 ± 21	1,79	0,147	14 ± 22	9 ± 9	5 ± 25	0,45	0,677
COC	m² m^{-2}	0,5 ± 0,3	0,7 ± 0,4	-0,2 ± 0,6	-0,73	0,507	0,5 ± 0,2	0,4 ± 0,2	0,1 ± 0,2	0,63	0,563
SMC	%	4 ± 7	21 ± 20	-17 ± 22	-1,75	0,155	71 ± 42	58 ± 39	14 ± 30	1,05	0,354
AFPM	g m^{-2}	0 ± 0	21 ± 21	-21 ± 20	-2,31	0,082	112 ± 94	125 ± 117	-13 ± 79	-0,36	0,739
SNSM	Arten	2,0 ± 1,6	1,6 ± 1,1	0,4 ± 1,5	0,59	0,587	1,4 ± 1,5	2,0 ± 1,7	-0,6 ± 2,9	-0,47	0,666
%Cha_as	%	30 ± 45	58 ± 53	-28 ± 46	-1,34	0,252	60 ± 55	58 ± 45	2 ± 21	0,17	0,871
%Cha_co	%	0 ± 0	19 ± 43	-19 ± 43	-1,00	0,374	16 ± 36	20 ± 45	-4 ± 9	-1,00	0,374
%Stu_pe	%	7 ± 16	0 ± 0	7 ± 16	0,96	0,390	0 ± 0	9 ± 14	-9 ± 14	-1,34	0,250
%Pot_pe	%	10 ± 14	3 ± 4	7 ± 16	1,02	0,365	4 ± 9	0 ± 0	4 ± 9	1,00	0,374
%Myr_sp	%	30 ± 35	0 ± 0	30 ± 35	1,94	0,125	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	1,00	0,374
pz_insitu	log(Ind. m^{-2})	3,61 ± 0,20	4,02 ± 0,21	-0,41 ± 0,07	-7,50	0,063	3,87 ± 0,14	4,13 ± 0,31	-0,25 ± 0,40	-1,44	0,224
pz_Bet	log(Ind. m^{-2})	3,29 ± 0,42	3,21 ± 0,31	0,07 ± 0,24	0,70	0,522	3,03 ± 0,47	3,32 ± 0,42	-0,29 ± 0,36	-1,83	0,141
pz_Zvor	log(Ind. m^{-2})	2,83 ± 0,18	2,96 ± 0,17	-0,13 ± 0,26	-1,00	0,393	2,86 ± 0,14	2,62 ± 0,13	0,24 ± 0,18	2,59	0,081
pz_Zmit	log(Ind. m^{-2})	2,87 ± 0,12	2,88 ± 0,26	-0,01 ± 0,24	-0,05	0,962	2,85 ± 0,29	2,92 ± 0,30	-0,07 ± 0,48	-0,29	0,790
pz_Zhin	log(Ind. m^{-2})	2,65 ± 0,44	2,84 ± 0,15	-0,19 ± 0,32	-1,06	0,402	2,86 ± 0,21	2,90 ± 0,33	-0,04 ± 0,31	-0,22	0,47
pz_Gab	log(Ind. m^{-2})	2,94 ± 0,52	3,07 ± 0,37	-0,13 ± 0,72	-0,37	0,734	3,18 ± 0,27	3,09 ± 0,36	0,09 ± 0,26	0,74	0,51

6.4 Oberflächensedimente

6.4.1 Textur

Die Oberflächensedimente waren an den Probenahmepositionen (n = 20) vor allem von Grobkies (*gK*, 35,5–112 mm) und Mittelkies (*mK*, 6,3–35,5 mm) geprägt. Gerölle (*gG*, >112 mm) und grobsandiger Feinkies (*fK*, 0,63–6,3 mm) waren ebenfalls häufig. Der Anteil von Mittelsand (*mS*, < 0,63 mm) war vergleichsweise gering. Bei allen Fraktionen waren allerdings erhebliche Mittelwertstreuungen vorhanden. An den naturnahen REF-Abschnitten fielen die Unterschiede zwischen NS- und OS-Positionen vergleichsweise gering aus: in den OS-Positionen waren die durchschnittlichen Anteile der Fraktionen *mS*, *fK* und *mK* höher als in den NS-Positionen; die Fraktionen *gK* und *gG* waren in den NS-Positionen höher. Eine Liste mit den prozentualen Anteilen der Fraktionen aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S4, Tabelle S4.A.

Beim Vergleich der TEST- und REF-Abschnitte unterschieden sich in den NS-Positionen die paarweisen Differenzen ΔY der Fraktion *gK* signifikant von Null. Dabei waren im Mittel die Werte der TEST-Abschnitte um 28 % niedriger als die der REF-Abschnitte (n = 5, Tabelle 4). Wegen des abweichenden Verhaltens im Uferabschnitt UEBW, war ΔY_{NS} der Fraktionen *mS*, *fK* und *gG* in der NS-Zone nicht signifikant verschieden von Null. Dabei waren *mS* und *fK* an den REF-Abschnitten im Mittel um 1 % (*mS*) bzw. 4 % (*fK*) höher als an den TEST-Abschnitten. *gG* war an den REF-Abschnitten im Mittel um 17 % niedriger als an den TEST-Abschnitten. Die prozentualen Anteile der Fraktion *mK* waren in NS an vier von fünf TEST-Abschnitten höher als an den REF-Abschnitten. Für *mK* zeigte die Uferstrecke NONN ein abweichendes Verhalten, wodurch ΔY_{NS} nicht signifikant verschieden von Null war. Im Mittel betrug die Differenz zwischen TEST- und REF-Abschnitten 17 %.

An den OS-Positionen waren die prozentualen Anteile der Fraktionen *mS*, *fK*, *gK* und *gG* an TEST- und REF-Abschnitten in etwa gleich. Ein signifikanter Unterschied wurde für die paarweisen Differenzen von *mK* gemessen, wobei in TEST die Mittelwerte um 16 % höher waren als in REF.

6.4.2 Deckungsgrad von Geröllen

Die Flächendeckung von Geröllen auf dem Seeboden (*COC*, $m^2\ m^{-2}$) schwankte zwischen 0,1 $m^2\ m^{-2}$ und 1,2 $m^2\ m^{-2}$ (M = 0,5 $m^2\ m^{-2}$, n = 20). An den REF-Abschnitten erreichten die Messwerte der OS-Positionen im Mittel nur knapp 60 % der NS-Positionen. Eine Liste mit der *COC* aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S4, Tabelle S4.B.

Sowohl in den NS-Positionen als auch in den OS-Positionen waren nahezu keine Unterschiede vorhanden (Tabelle 4). Die paarweisen Differenzen ΔY von *COC* unterschieden sich nicht von Null (n = 5).

6.5 Submerse Makrophyten

6.5.1 Vegetationsbedeckung

Im Durchschnitt aller Positionen waren 39 % des Seebodens von submersen Makrophyten bedeckt (n = 20). Das Spektrum der Vegetationsbedeckung *SMC* reichte von 0 % bis 100 %. An den REF-Abschnitten war der Mittelwert von *SMC* in den NS-Positionen um 37 % niedriger als in den OS-Positionen. Eine Liste mit der *SMC* aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S5, Tabelle S5.A.

Beim Vergleich der TEST- und REF-Abschnitte unterschieden sich die paarweisen Differenzen ΔY von *SMC* weder in NS noch in OS von Null (n = 5). In NS war *SMC* an den REF-Abschnitten im Mittel um 17 % höher als an den TEST-Abschnitten. Dabei war UEBW die einzige Uferstrecke, an der *SMC* am TEST-Abschnitt höher als am REF-Abschnitt war. Am NONN war in NS gar keine Vegetation vorhanden. In den OS-Positionen unterschied sich *SMC* nicht zwischen TEST- und REF-Abschnitten.

6.5.2 Phytomasse

Das Spektrum der aschefreien Phytomassendichte *AFPM* erstreckte sich von 0 g m^{-2} bis 260 g m^{-2} (*M* = 65 g m^{-2}, n = 20). Dabei wiesen an den REF-Abschnitten die NS-Positionen stets eine geringere *AFPM* auf, als die OS-Positionen. Im Mittel wies *AFPM* in den NS-Positionen nur etwa 17 % der OS-Positionen auf. Eine Liste mit der *AFPM* aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S5, Tabelle S5.A.

Beim Vergleich der TEST- und REF-Abschnitte zeigte sich in NS ein schwach signifikanter Maueréffekt, wobei im Mittel *AFPM* an REF um das siebzigfache größer war als an TEST (n = 5, Tabelle 4). An den uferfernen Positionen unterschied sich *AFPM* nicht zwischen TEST- und REF-Abschnitten.

6.5.3 Deckungsanteile der Arten und Artenzahl

Insgesamt wurden 9 Makrophyten-Arten nachgewiesen, wobei die Position NONN-REF-OS am artenreichsten war (5 Arten). Im Mittel wurden an jeder Probenahmeposition 1,75 Arten erfasst (n = 20). Den größten Anteil an der Vegetationsdeckung hatte *Chara aspera* (*%Cha_as*) mit im Durchschnitt 52 % Deckungsanteil gefolgt von *Chara contraria* (*%Cha_co*) mit 14 % und *Myriophyllum spicatum* (*%Myr_sp*) mit knapp 8 % (n = 20). An den REF-Abschnitten unterschieden sich Artenzahl (*SNSM*) und Deckungsanteil der Makrophyten-Arten kaum zwischen NS- und OS-Positionen. Es dominierten die Armleuchteralgen *C. aspera* und *C. contraria*. Laichkräuter traten stetig und mit geringer Flächendeckung auf. Eine Übersicht über die *SNSM* sowie die prozentualen Anteile der Arten aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S5, Tabelle S5.A bzw. S5.B.

Die paarweisen Differenzen ΔY von *SNSM* unterschieden sich weder in den NS- noch in den OS-Positionen von Null (n = 5, Tabelle 4). Auch für die prozentualen Flächendeckungsanteile der Makrophyten-Arten wurden keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen. Bemerkenswert war der hohe prozentuale Anteil von *M. spicatum* in den NS-Positionen der TEST-Abschnitte. An allen anderen Probenahmepositionen spielte die Art nahezu keine Rolle.

6.5.4 Obere Makrophytengrenze

Eine Liste mit den Sohlniveaus der Oberen Makrophytengrenzen (*OMG*) aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S5, Tabelle S5.C.

6.5.4.1 OMGmin

Das Sohlniveau mit dem uferliniennächsten Vorkommen von Unterwasserpflanzen (*OMGmin*) lag zwischen 393,44 m NHN und 395,54 m NHN.

An den REF-Abschnitten lag *OMGmin* im Mittel auf einem Sohlniveau von 395,01 m NHN (n = 5) und damit um durchschnittlich 0,67 m höher als an den TEST-Abschnitten (Tabelle 5). Es konnte ein signifikanter Maueréffekt nachgewiesen werden: die paarweisen Differenzen ΔY von *OMGmin* waren signifikant verschieden von Null.

6.5.4.2 OMG10

Das Sohlniveau, bei dem die Vegetation eine durchschnittliche Deckung von 10 % (*OMG10*) erreichte, lag zwischen 393,44 m NHN und 395,24 m NHN.

An den REF-Abschnitten lag *OMG10* im Mittel aller Uferstrecken auf 394,85 m NHN (n = 5). Es zeigte sich ein signifikanter Maueréffekt, wobei *OMG10* an den REF-Abschnitten im Mittel 0,60 m höher lag als an den TEST-Abschnitten (n = 5, Tabelle 5).

6.5.4.3 OMG50

Das Sohlniveau bei dem die Vegetation eine durchschnittliche Deckung von 50 % erreichte (*OMG50*) lag zwischen 393,04 m NHN und 395,01 m NHN.

An den REF-Abschnitten lag *OMG50* im Durchschnitt aller Uferstrecken auf 394,44 m NHN (n = 5). An vier von fünf untersuchten Uferstrecken war *OMG50* an den REF-Abschnitten höher gelegen als an den TEST-Abschnitten. Im Mittel betrug der Unterschied 0,2 m (n = 5, Tabelle 5). Aufgrund des abweichenden Verhaltens der Uferstrecke NONN, waren die paarweisen Differenzen allerdings nicht signifikant verschieden von Null.

Tabelle 5: Übersicht über die Ergebnisse der paarweisen *t*-Tests der Oberen Makrophytengrenze (*OMG*). Angegeben sind Mittelwert und Standardabweichung der verbauten Uferabschnitte Y_{TEST} und der naturbelassenen Uferabschnitte Y_{REF} ($M \pm SD$, $n = 5$), die Mittelwerte und Standardabweichungen der paarweisen Differenzen ΔY sowie *t*- und *p*-Werte.

	Y_{TEST}	Y_{REF}	ΔY	Statistik	
Variable	$M \pm SD$	$M \pm SD$	$M \pm SD$	*t*	*p*
OMGmin [m NHN]	394,34 ± 0,61	395,01 ± 0,57	-0,67 ± 0,25	-5,43	0,012
OMG10 [m NHN]	394,34 ± 0,54	394,85 ± 0,37	-0,60 ± 0,25	-5,30	0,006
OMG50 [m NHN]	394,24 ± 0,61	394,44 ± 0,81	-0,19 ± 0,28	-1,50	0,208

6.6 Makroinvertebraten

6.6.1 Standörtliche Substrate

In den standörtlichen Substraten (*in situ*, Abbildung 4a) wurden insgesamt 36 Makrozoobenthos-(MZB)-Taxa nachgewiesen. Auf den einzelnen Beprobungsflächen schwankten die Individuendichten zwischen 2.037 und 35.910 Individuen m^{-2}. Im Mittel waren pro Probenahmefläche 9.926 Individuen m^{-2} vorhanden (n = 20). Die häufigsten Taxa waren Chironomidae, *Dreissena rostriformis bugensis* und *Dikerogammarus villosus* (SOWINSKY, 1894). An den REF-Abschnitten wiesen die Individuendichten der NS-Positionen im Mittel nur 70 % der Individuendichten der OS-Positionen auf. Eine Liste mit den Individuendichten aller Probenahmepositionen im standörtlichen Substrat findet sich in Anhang S6, Tabelle S6.A.

Insgesamt zeigte in NS die Individuendichte im standörtlichen Substrat *pz_insitu* einen schwach signifikanten Maueréffekt (Tabelle 4). Dabei wiesen die TEST-Positionen im Mittel eine um 38 % niedrigere Individuendichte als die REF-Positionen auf (n = 5). Auch in den OS-Positionen war der Mittelwert der paarweisen Differenzen ΔY_{OS} negativ, aber nicht mehr signifikant verschieden von Null. Weiterhin konnten im standörtlichen Substrat signifikante Unterschiede bei insgesamt neun Metrics nachgewiesen werden (Tabelle 6). Sechs Metrics (*Average Score per Taxon*, *Anzahl EPT-Taxa* [Ephemeroptera-Plecoptera-Trichoptera], *Anzahl Familien*, *Anzahl Genera*, *Anzahl Taxa & Gesamtabundanz*) unterschieden sich nur in NS, wobei für alle galt, dass der Wert an den REF-Abschnitten höher als an den TEST-Abschnitten war. OS unterschieden sich die paarweisen Differenzen dreier Metrics signifikant von Null: *Anzahl Bivalvia Taxa* und *%Trichoptera* waren an den REF-Abschnitten höher, *Evenness* an den TEST-Abschnitten.

6.7 Künstliche Substrate

6.7.1 Betonplatte

Auf den Betonplatten wurden insgesamt 24 MZB-Taxa nachgewiesen. Im Mittel waren je Betonplatte 2.215 Individuen m^{-2} vorhanden und damit deutlich weniger als in den standörtlichen Substraten (n = 20). Die Individuendichten schwankten zwischen 169 und 7.004 Individuen m^{-2}. Im Mittel waren es 2.215 Individuen m^{-2}. Am häufigsten traten die Taxa Chironomidae, Oligochaeta und *D. rostriformis bugensis* auf. An den REF-Abschnitten wiesen die Individuendichten der NS-Positionen im Mittel nur 70 % der OS-Positionen auf. Eine Liste mit den Individuendichten aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S6, Tabelle S6.B.

An vier von fünf untersuchten Uferstrecken waren die Individuendichten der Betonplatten (*pz_Bet*) an den TEST-Abschnitten höher als an den REF-Abschnitten. Im Schnitt waren an den TEST-Abschnitten etwa 500 Individuen m^{-2} mehr vorhanden als an den REF-Abschnitten (n = 5). Wegen des abweichenden Verhaltens der Uferstrecke HAGN, wurde kein signifikanter Unterschied der paarweisen Differenzen von Null festgestellt (Tabelle 4). OS war *pz_Bet* an den REF-Abschnitten höher. Auch hier waren die paarweisen Differenzen nicht signifikant verschieden von Null. Die paarweisen Differenzen der berechneten Metrics unterschieden sich allesamt nicht signifikant zwischen TEST- und REF-Abschnitten (Tabelle 6).

Tabelle 6: Zusammenfassung der statistischen Ergebnisse für die MZB-Metrics, getrennt nach ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Aufgelistet sind nur Metrics, deren paarweise Differenzen mindestens bei einem Treatment signifikante Ergebnisse lieferten. Rot hinterlegt sind Metrics, bei denen die paarweisen Differenzen ΔY aus TEST- (T) und REF-Abschnitten (R) negativ waren. Grün hinterlegt sind Metrics, bei denen ΔY positiv war. Nicht signifikante Ergebnisse sind mit „n. s.“ gekennzeichnet.

	NS						OS					
Metric	*in situ*	Betonplatte	Ziegel Vorne	Ziegel Mitte	Ziegel Hinten	Gabione	*in situ*	Betonplatte	Ziegel Vorne	Ziegel Mitte	Ziegel Hinten	Gabione
Gesamtabundanz	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Anzahl Genera	T < R	n. s.	T < R	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Anzahl Familien	T < R	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Anzahl Taxa	T < R	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Anzahl Bivalvia Taxa	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Anzahl EPT-Taxa	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	T < R
Anzahl Gastropoda Taxa	n. s.	n. s.	T < R	T< R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	T < R
%Gastropoda	n. s.	n. s.	T < R	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
%Hirudinea	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	T < R	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
%Trichoptera	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
%Kriechend/laufend	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
%Präferenz Lithal	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
%Präferenz Psammal	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Shannon-Wiener-Diversität	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Evenness	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	T > R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Margalef Index	n. s.	n. s.	n. s.	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Average Score per Taxon	T < R	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

6.7.2 Ziegelgruppe

6.7.2.1 Allgemein

Die Hochloch-Ziegelsteine wiesen die geringsten Individuendichten aller beprobten Substrate auf. Sie schwankten zwischen 142 Individuen m^{-2} und 1.995 Individuen m^{-2} (n = 56). Im Vergleich der drei Einzelziegel wies der mittlere Ziegel mit der Öffnung nach oben die höchste mittlere Individuendichte auf (Ziegel „Mitte“; *M* = 743 Individuen m^{-2}, n = 19), gefolgt vom Ziegel mit der Öffnung landseits (Ziegel „Vorne“, *M* = 644 Individuen m^{-2}, n = 19) und dem Ziegel mit der Öffnung seeseits (Ziegel „Hinten“, *M* = 620 Individuen m^{-2}, n = 18). An den REF-Abschnitten waren die mittleren Individuendichten der NS-Positionen beim Ziegel „Hinten“ um 32 % und beim Ziegel „Mitte“ um 17 % niedriger als an den OS-Positionen. Beim Ziegel „Vorne“ war die Individuendichte in NS fast doppelt so hoch wie in OS. Bezogen auf die Anzahl der nachgewiesenen Taxa unterschieden sich die Ziegel ebenfalls: während auf den mittleren Ziegeln insgesamt 30 Taxa nachgewiesen wurden, waren es auf den beiden randlichen Ziegeln jeweils 23 Taxa. Auf allen drei Ziegeln wurden die Taxa Chironomidae, *D. villosus* und *D. rostriformis bugensis* am häufigsten nachgewiesen.

Am Ende der Expositionszeit konnte an der Position NONN-TEST-OS keines der drei Ziegelgruppen Replikate geborgen werden. Die Uferstrecke NONN wurde daher aus den paarweisen Vergleichen ausgeschlossen. Somit flossen nur vier Uferstrecken in die statistische Auswertung der Ziegel ein. Die Listen mit den Individuendichten aller Probenahmepositionen finden sich in Anhang S6, Tabelle S6.C, Tabelle S6.D bzw. Tabelle S6.E.

6.7.2.2 „Ziegel Vorne“ (Öffnung landseits)

In den NS-Positionen unterschieden sich die Individuendichten der Ziegel „Vorne“ *pz_Zvor* nicht zwischen TEST- und REF-Abschnitten. In den OS-Positionen war *pz_Zvor* an TEST gegenüber REF im Mittel um 57 % erhöht (n = 4, Tabelle 4). Der Unterschied der paarweisen Differenzen unterschied sich schwach signifikant von Null.

Signifikante Unterschiede konnten auch für die paarweisen Differenzen der Metrics *Shannon-Wiener-Diversität*, *Anzahl Gastropoda Taxa*, *%Gastropoda*, *Anzahl Genera*, *%Kriechend/laufend*, *%Präferenz Lithal* und *%Präferenz Psammal* nachgewiesen werden (Tabelle 6). Alle Unterschiede betrafen die NS-Positionen. Die Mittelwerte der Metrics waren allesamt an den REF-Abschnitten höher als an den TEST-Abschnitten. In OS waren keine Unterschiede vorhanden.

6.7.2.3 „Ziegel Mitte“ (Öffnung oben)

Bei drei von vier untersuchten Uferstrecken waren die Individuendichten des mittleren Ziegels (*pz_Zmit*) an den REF-Abschnitten höher als an den TEST-Abschnitten. Der Unterschied war vergleichsweise schwach ausgeprägt: Im Mittel waren an den REF-Abschnitten etwa 63 Individuen m^{-2} mehr vorhanden als an den TEST-Abschnitten (n = 4). Wegen des abweichenden Verhaltens der Uferstrecke IMSB, wurde kein signifikanter Unterschied der paarweisen Differenzen ΔY_{NS} von Null festgestellt (Tabelle 4). In OS unterschied sich *pz_Zmit* nicht zwischen TEST und REF.

Signifikante Unterschiede der paarweisen Differenzen von Null wurden für die Metrics *Margalef-Index*, *Anzahl Gastropoda Taxa*, *%Gastropoda*, *Anzahl Familien*, *Anzahl Genera* und *Anzahl Taxa* nachgewiesen (Tabelle 6). Bei allen war der Mittelwert an den REF-Abschnitten höher als an den TEST-Abschnitten. Die Unterschiede wurden nur in NS nachgewiesen.

6.7.2.4 „Ziegel Hinten“ (Öffnung seeseits)

Sowohl in NS als auch in OS unterschieden sich die paarweisen Differenzen ΔY der Individuendichten des hinteren Ziegels *pz_Zhin* nicht von Null (n = 3, Tabelle 4). Signifikante Unterschiede von Null konnten bei

den paarweisen Differenzen der Metrics *%Hirudinea* und *%Kriechend/laufend* festgestellt werden. In beiden Fällen war der Wert an den naturnahen REF-Abschnitten höher als an den verbauten TEST-Abschnitten (Tabelle 6). Die Unterschiede traten nur in den NS-Positionen auf und verschwanden wieder in OS.

6.7.3 Gabione

In den Gabionen wurden insgesamt 31 Taxa nachgewiesen. Die Anzahl der Taxa war zwar geringer als im standörtlichen Substrat, jedoch höher als auf allen anderen künstlichen Exponaten. Die Individuendichten schwankten zwischen 236 Individuen m^{-2} und 4.219 Individuen m^{-2}. Im Mittel waren in einer Gabione 1.547 Individuen m^{-2} vorhanden (n = 19). Am häufigsten traten die Taxa *D. rostriformis bugensis*, Chironomidae und *D. villosus* auf. An den REF-Abschnitten wiesen die NS-Positionen durchschnittlich 76 % der Individuendichten der OS-Positionen auf. Eine Liste mit den Individuendichten aller Probenahmepositionen findet sich in Anhang S6, Tabelle S6.F.

Da in der Position NONN-TEST-NS am Ende der Expositionszeit keines der drei Gabionen-Replikate geborgen werden konnte, flossen nur vier Uferstrecken in die statistische Auswertung der Hochlochziegel ein.

Sowohl NS als auch OS unterschieden sich die Mittelwerte der Individuendichten in den Gabionen *pz_Gab* kaum zwischen TEST- und REF-Abschnitten (n = 4, Tabelle 4). Demzufolge waren auch keine signifikanten Unterschiede der paarweisen Differenzen ΔY von Null vorhanden.

Für ΔY der Metrics *%Hirudinea*, *Anzahl EPT-Taxa* und *Anzahl Gastropoda Taxa* wurden signifikante Unterschiede festgestellt: *%Hirudinea* unterschied sich nur NS signifikant von Null, wobei ΔY_{NS} negativ war (Tabelle 6). OS unterschied sich ΔY_{OS} der Metrics *Anzahl EPT Taxa* und *Anzahl Gastropoda Taxa* signifikant von Null, obwohl NS kein signifikanter Unterschied vorlag.

7 Diskussion

Seeufermauern stehen im Verdacht, die litoralen Habitate und Biozönosen über mehrere kausale Pfade zu beeinträchtigen (Ostendorp 2014; Gittman et al. 2016; Dugan et al. 2018).

Ein Wirkungspfad beginnt damit, dass standortfremde Substrate (z. B. Beton- oder Steinoberflächen) zur Besiedlung durch eine angepasste (Algen-)Flora und Invertebratenfauna zur Verfügung gestellt werden. Diesen Pfad haben wir durch die Exponierung von standardisierten Betonplatten nachgebildet.

Ein zweiter Pfad betrifft die veränderten Reliefbedingungen, d. h. die Tatsache, dass die Substratoberflächen senkrecht ausgerichtet sind, was die Ansiedlungsmöglichkeiten, den Lichtgenuss und den mechanischen Stress durch Wellengang deutlich verändert. Überdies ist zu erwarten, dass hohe, senkrecht ausgerichtete und glatte Maueroberflächen ein beträchtliches Wanderungshindernis für bestimmte Invertebraten-Gruppen, Amphibien, Reptilien und Säugetiere darstellen (Ostendorp 2014). Dieser Aspekt wurde von uns nicht untersucht.

Ein dritter Pfad beginnt mit der Veränderung des Wellenfelds und der ufernahen turbulenten Strömung im unmittelbaren Vorfeld der Bauwerke, insbesondere während auflandiger Starkwindereignisse (Kraus & McDougal 1996; Martin et al. 2005; Miles et al. 2001; Runyan & Griggs 2003; Tait & Griggs 1991 für den marinen Bereich) oder – bereits bei ruhiger Witterung – durch vorbeifahrende Fahrgastschiffe.

In unserer Untersuchung haben wir uns auf den dritten Aspekt fokussiert. Mit einem einfachen faktoriellen Probenahmeplan haben wir am Beispiel des schiffs- und windwellen-exponierten Nordufers des Bodensee-Obersees nachgewiesen, dass (i) auch an Binnenseen signifikante Mauer-Effekte auftreten, und dass (ii) die direkten Maueffekte nur bis etwa zehn Meter weit in das Sublitoral hineinreichen (Tabelle 7).

Dazu haben wir fünf Uferstrecken ausgewählt, die jeweils aus einem naturbelassenen und einem mit einer langen Ufermauer verbauten Abschnitt bestanden. An den verbauten Abschnitten haben wir in etwa 1,5 m (ufernah, NS) und 10 m Entfernung (uferfern, OS) vor der Mauer Untersuchungen und Probenahmen durchgeführt. Die korrespondierenden Positionen in den unverbauten Abschnitten lagen in etwa der gleichen Was-

sertiefe. Der Vergleich der ufernahen Positionen zwischen verbauten und naturbelassenen Abschnitten repräsentiert den Mauereffekt, während der Vergleich der uferfernen Positionen eher die Unterschiede anderer Umweltfaktoren abbildet, die nicht direkt mit dem Mauereffekt zu tun haben.

Die hydrodynamischen Vorgänge, die bei wind- oder schiffsinduziertem Wellengang an einer Ufermauer und der unmittelbar vorgelagerten Einflusszone stattfinden, sind aus dem marinen Bereich gut bekannt (Ostendorp et al. 2019 und die darin zitierte Literatur). Sie sind gekennzeichnet durch

- die hydraulische Impermeabilität des Bauwerks, die für eine hohe Reflektivität sorgt,
- die Intensivierung der turbulenten Wasserbewegungen durch Wellenbrechen, Uprush und Backwash sowie Bildung partiell stehender Wellen,
- Veränderungen der Korngrößenverteilung, insbesondere des Anteils der Feststofffraktion, für die unter den gegebenen Bedingungen die Netto-Transportrate Null ist und
- Veränderungen des vorgelagerten Uferreliefs (z. B. Trogbildung am Mauerfuß).

Als modifizierende Faktoren treten u. a.

- die Merkmale der einlaufenden Wellen (v. a. Wellenhöhe und -periode, Einlaufwinkel, Bereich des Wellenbrechens)
- Neigung und Bodenrauigkeit sowie
- Wassertiefe am Fuß der Mauer

auf.

7.1 Störvariablen

Unser Beprobungsplan (paarweise Beprobung mit fünf Replikaten) sah vor, dass weitere Variablen, die den Wellenenergie-Eintrag und das Wellenverhalten in der Flachwasserzone beeinflussen, beispielsweise die Uferlinien-Exposition und die Sublitoral-Breite sowie die Wassertiefe im jeweiligen Uferabschnitt konstant bleiben. Diese Annahme wurde mit positivem Ergebnis geprüft. Signifikante Unterschiede zwischen naturnahem und mauerbewehrtem Ufer traten lediglich bei der Neigung der unteren Eulitoral-Zone auf. Für diesen Effekt verantwortlich sind Ufermauern, die einen Mauerfuß unterhalb der mittleren Mittelwasserlinie haben (395,24 m NHN). Die Ufermauern begrenzen das Eulitoral landseitig, woraus eine Verschmälerung dieser Zone resultiert. Damit wird durch die senkrechte Mauer mit aufgefülltem Hinterland rechnerisch die mittlere Neigung gegenüber dem erwartungsgemäß gleichförmigen Relief der naturbelassenen Uferabschnitte drastisch erhöht. In unserer Studie lag der Mauerfuß aller untersuchten Ufermauern unterhalb der mittleren Mittelwasserlinie.

Es kann also von der Gültigkeit unserer Annahme ausgegangen werden, so dass die nachfolgend dargestellten Unterschiede zwischen den mauerbewehrten und den naturnahen Ufervarianten alleinig auf den Mauereffekt zurückgeführt werden können.

7.2 Turbulente Wasserbewegungen

Die Intensität der turbulenten Wasserbewegungen wurde durch die Korrosionsrate standardisierter Gipskörper abgebildet. Zur Erfassung der bodennahen Strömungen entwickelten Muus (1968) und Doty (1971) unabhängig voneinander ein indirektes Verfahren, das den Masseverlust von Gipskörpern als ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit, turbulente Wasserbewegung und Exposition einer Lokalität verwendet. Die sogenannte *gypsum dissolution technique* (*GDT*) findet Anwendung in marinen und limnischen Ökosystemen (z. B. Petticrew & Kalff 1991; Jokiel & Morrissey 1993; Angradi & Hood 1998; Fulton & Bellwood 2005). Allerdings stellt die *GDT* lediglich ein Verfahren zur Erfassung der allgemeinen und durchschnittlichen Wasserbewegung, d. h. der laminaren Strömungen und turbulenten Wasserbewegungen einschließlich der Korrosion durch mitgeführte Feststoffpartikel dar (Porter et al. 2000).

In unserer Untersuchung zeigten sich im seichten Wasser vor Ufermauern (Position NS) schwach signifikant höhere durchschnittliche Korrosionsraten als an den vergleichbaren Positionen naturbelassener Uferabschnitte. In größerer Entfernung von der Uferlinie bzw. der Mauer verringerte sich der Effekt, so dass die Differenzen

nicht mehr signifikant waren. Damit konnte gezeigt werden, dass es am Bodensee-Ufer zu einer deutlichen Turbulenzerhöhung im Vorfeld von Mauern kommt. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit dem Resultat aus Ostendorp et al. (2019).

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse. Angegeben ist, wie sich TEST- (T) und REF-Abschnitt (R) an ufernahen (NS) und uferfernen Positionen (OS) zueinander verhalten, sowie ob die Ergebnisse statistisch signifikant waren: „*“ – $p < 0{,}05$; „(*)“ – $0{,}05 \geq p < 0{,}10$.

Variable	NS	OS
$\Delta m/\Delta t$	$T > R^{(*)}$	$T \approx R$
PSD, mS	$T < R$	$T \approx R$
PSD, fK	$T < R$	$T \approx R$
PSD, mK	$T > R$	$T > R^{*}$
PSD, gK	$T < R^{*}$	$T \approx R$
PSD, gG	$T > R$	$T \approx R$
COC	$T \approx R$	$T \approx R$
SMC	$T < R$	$T \approx R$
AFPM	$T < R^{*}$	$T \approx R$
SNSM	$T \approx R$	$T \approx R$
%Cha_as	$T \approx R$	$T \approx R$
%Cha_co	$T \approx R$	$T \approx R$
%Stu_pe	$T \approx R$	$T \approx R$
%Pot_pe	$T \approx R$	$T \approx R$
%Myr_sp	$T > R$	$T \approx R$
OMGmin	$T < R^{*}$	
OMG10	$T < R^{*}$	
OMG50	$T < R$	
pz_insitu	$T < R^{(*)}$	$T < R$
pz_Bet	$T > R$	$T < R$
pz_Zvor	$T \approx R$	$T > R^{(*)}$
pz_Zmit	$T < R$	$T \approx R$
pz_Zhin	$T \approx R$	$T \approx R$
pz_Gab	$T \approx R$	$T \approx R$

7.3 Oberflächensedimente

Die beobachteten Unterschiede in der Intensität der turbulenten Wasserbewegungen spiegelten sich nicht in der Textur der Oberflächensedimente wider. Die in Ostendorp (2019) dokumentierte Auswaschung der Feinsedimente vor Ufermauern konnte in der vorliegenden Untersuchung statistisch nicht bestätigt werden. Erstaunlicherweise war in unserer Untersuchung der Anteil der groben Kiese im seichten Wasser der naturbelassenen Ufer gegenüber den verbauten Ufern erhöht.

Es fiel auf, dass sich bei den Fraktionen Mittelsand (*mS*), grobsandiger Feinkies (*fK*) und Gerölle (*gG*) die Uferstrecke in Überlingen (UEBW) anders als alle anderen Uferstrecken verhielt, wodurch ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen naturnahen und verbauten Uferabschnitten aufgehoben wurde. Möglicherweise ist für die Abweichung das vergleichsweise hohe Niveau des Mauerfußes in UEBW-TEST die Ursache (Niveau Mauerfuß: 395,14 m NHN, d. h. nur 0,10 m unterhalb des mittleren Mittelwasserstands). Inwieweit die – verglichen mit dem Obersee – geringe Wellenbelastung im Überlinger See eine Rolle spielt, soll in einer nachfolgenden Arbeit herausgefunden werden.

Ein Effekt auf den Flächenanteil der Gerölle an der Sedimentoberfläche (*d* >35 mm), wie er in Ostendorp et al. 2019 gefunden wurde, konnte in der hier vorliegenden Studie nicht nachgewiesen werden. Es hat den Anschein, dass die lokalen Gegebenheiten den Flächenanteil der Gerölle stärker prägen, als es der Effekt der Ufermauern tut.

7.4 Makrophyten

Das Vorkommen und Wachstum submerser Makrophyten an einem Uferabschnitt wird von den Faktoren Wassertiefe, Oberflächensedimentstruktur und Wellenwirkung bestimmt (Jupp & Spence 1977; Keddy 1982, 1983, 1985; Chambers 1987). Letztere kann sowohl die Phytomasse als auch die Obere Makrophytengrenze *OMG* (d. h. die Wassertiefe, bis zu der vom Ufer aus betrachtet Makrophytenwachstum möglich ist) beeinflussen (Riis & Hawes 2003). Wir konnten Effekte der Ufermauern auf die Makrophyten in Form von verringerter Phytomassendichte sowie einer seewärtigen Verschiebung der oberen Makrophytengrenze nachweisen (d. h. in eine größere Wassertiefe). Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit den Ergebnissen aus Ostendorp et al. 2019. Potentielle Mechanismen, die zu einer Beeinträchtigung des Makrophytenwachstums vor Ufermauern führen können sind:

(i) stärkere Belastung oder sogar Entwurzelung durch erhöhte Welleneinwirkung (Brewer & Parker 1990; Schutten & Davy 2000; Schutten et al. 2004).
(ii) Abrieb durch Sedimentpartikel, die durch bodennahe Strömungen mobilisiert werden (Murphy & Eaton 1983).
(iii) Auswaschung von Feinsedimenten und damit einhergehend Zerstörung des Keimbetts für Diasporen sowie Verringerung der Nährstoffverfügbarkeit (Jupp & Spence 1977).
(iv) Einschränkung der Wiederbesiedelung des Seegrunds nach Sturmereignissen aufgrund von Abdrift der Diasporen (Van Zuidam & Peeters 2015).

Die in Ostendorp et al. 2019 nachgewiesene Veränderung des Deckungsgrads der submersen Makrophyten-Vegetation konnten wir in der vorliegenden Studie nicht nachweisen. In Teilen ist dies durch das Fehlen von Makrophyten an den ufernahen Positionen der Uferstrecke am Nonnenhorn zu erklären. Zudem weicht – wie auch schon bei der Textur der Oberflächensedimente – die Uferstrecke in Überlingen vom Trend der anderen Uferstrecken ab.

7.5 Makroinvertebraten

Die Substratabhängigkeit der Makroinvertebraten-(MZB)-Besiedlung ist durch zahlreiche Untersuchungen bekannt (Heino 2000; Tolonen et al. 2001; White & Irvine 2003) Demzufolge können sich Maueréffekte (i) allein durch die hydrodynamische Belastung und (ii) zusätzlich über die veränderte Substrattextur einschl. der makrophytischen Besiedlung auswirken. Um zwischen den beiden Ursachenkomplexen unterscheiden zu können, haben wir sowohl die natürlicherweise vorliegenden Substrate mit jeweils standörtlich variierender Textur als auch standardisierte künstliche Exponate eingesetzt. Die Exponat-Typen wurden so gewählt, dass sie drei Stufen der Substratkomplexität abbildeten (niedrig – mittel – hoch).

Ein Effekt der Mauer auf die MZB-Individuendichte konnte nur im standörtlich auftretenden Substrat nachgewiesen werden (Tabelle 4).Weitere Unterschiede konnten durch die Auswertung der MZB-Metrics gefunden werden: Ufernah unterschieden sich die paarweisen Differenzen von insgesamt 22 Metrics signifikant zwischen verbauten und unverbauten Uferabschnitten. An den uferfernen Probestellen waren es nur fünf (Tabelle 6). Die Unterschiede waren sowohl im standörtlichen Substrat als auch an den künstlichen Exponaten vorhanden. Vor allem der vordere und der mittlere Hochlochziegel aus der Ziegelgruppe mit den Öffnungen landseits bzw. nach oben erwiesen sich als besonders effektiv beim Anzeigen von Unterschieden. Keine signifikanten Unterschiede wurden auf den Betonplatten gefunden. Diese können daher als für die Erfassung eines Maureffekts unbrauchbar eingestuft werden. Bemerkenswert ist, dass an den ufernahen Positionen der verbauten Uferabschnitte die Betonplatten sogar höhere Individuendichten aufwiesen, als an den ufernahen Positionen

der naturnahen Abschnitte. Die Gabionen, welche dem *in situ* vorliegenden Substrat am nächsten kamen, waren ebenfalls wenig geeignet: ein signifikanter Unterschied in der ufernahen Zone stand zwei signifikanten Unterschieden uferfern gegenüber. Bei den von Ufermauern beeinträchtigten Metrics handelte es sich vor allem um Metrics der taxonomischen Diversität sowie um störungssensitive Taxa. Aber auch funktionale Metrics wurden beeinflusst. In der ufernahen Zone war der Einfluss der Ufermauern durchweg negativ, d. h. die Metrics deuteten auf „naturfernere“ Bedingungen an TEST-Abschnitten hin als an REF-Abschnitten.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen unserer Untersuchungen konnten wir den Einfluss von Ufermauern auf das Litoral am nördlichen Bodenseeufer nachweisen. Das hier angewendete Untersuchungsdesign („paarweise Vergleiche“) hat sich als sehr geeignet herausgestellt und sollte auch in künftigen Untersuchungen Anwendung finden. Die ausschließlich negativen Unterschiede zwischen verbauten und naturbelassenen Uferstrecken an ufernahen Probenahmestellen bestätigen die starke Beeinträchtigung des Litorals durch Ufermauern: Wir konnten messen, dass Ufermauern die turbulenten Wasserbewegungen in ihrem Vorfeld erhöhen. Ebenso wirkte sich die Ufermauer negativ auf die submersen Makrophyten sowie auf das Makrozoobenthos aus. Die Ergebnisse weisen auf einen naturferneren ökologischen Zustand von Ufern mit Mauern verglichen mit naturbelassenen Ufern hin. Einen Mauereffekt auf die Sedimenttextur konnten wir allerdings nicht nachweisen.

9 Danksagung

Die Untersuchungen fanden im Rahmen des Forschungsprojekts SuBoLakes (https://www.subolakes.de) statt, das durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurde (Projekt 35825/01).

10 Quellenverzeichnis

Angradi, T., Hood, R. (1998): An application of the plaster dissolution method for quantifying water velocity in the shallow hyporheic zone of an Appalachian stream system. Freshwater Biology 39(2): 301-315.

Argillier, C., Carriere, A., Wynne, C., Hellsten, S., Vartia, K., Poikane, S. (2023): Lake hydromorphology assessment in Europe: Where are we 20 years after the adoption of the Water Framework Directive? Science of the Total Environment 855: 158781. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158781.

Brauns, M., Garcia, X. F., Walz, N., Pusch, M. T. (2007): Effects of human shoreline development on littoral macroinvertebrates in lowland lakes. Journal of Applied Ecology 44(6): 1138-1144.

Bauernfeind, E., Humpesch, U. H. (2001): Die Eintagsfliegen Zentraleuropas (Insecta: Ephemeroptera): Bestimmung und Ökologie. Verlag des Naturhistorischen Museums Wien: 239 S.

Brewer, C. A., Parker, M. (1990): Adaptations of macrophytes to life in moving water: upslope limits and mechanical properties of stems. Hydrobiologia 194 (2): 133-142.

Chambers, P. A. (1987): Nearshore occurrence of submersed aquatic macrophytes in relation to wave action. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 44(9): 1666-1669.

Doty, M. S. (1971): Measurement of water movement in reference to benthic algal growth. Botanica Marina 14(1): 32-35.

Dugan, J. E., Emery, K. A., Alber, M., Alexander, C. R., Byers, J. E., Gehman, A. M., McLenaghan, N., Sojka, S. E. (2018): Generalizing ecological effects of shoreline armouring across soft sediment environments. Estuaries and Coasts 41(Suppl. 1):180-196.

Eggers, T. O. & Martens, A. (2001): Bestimmungsschlüssel der Süßwasser-Amphipoda (Crustacea) Deutschlands. Dinkelscherben, Lauterbornia 42: 1-68.

Francis, T. B., Schindler, D. E. (2009): Shoreline urbanization reduces terrestrial insect subsidies to fishes in North American lakes. Oikos 118(12): 1872-1882.

Fulton, C. J., Bellwood, D. R. (2005): Wave-induced water motion and the functional implications for coral reef fish assemblages. Limnology and Oceanography 50(1): 255-264.

Gittman, R. K., Scyphers, S. B., Smith, C. S., Neyland, I. P., Grabowski, J. H. (2016): Ecological consequences of shoreline hardening: a meta-analysis. BioScience 66: 763-773.

Glöer, P. (2017): Süßwassermollusken – Ein Bestimmungsschlüssel für die Muscheln und Schnecken im Süßwasser der Bundesrepublik Deutschland. Göttingen, Deutscher Jugendbund für Naturbeobachtung, 15. Auflage: 135 S.

Heino, J. (2000): Lentic macroinvertebrate assemblage structure along gradients in spatial heterogeneity, habitat size and water chemistry. Hydrobiologia 418: 229-242. https://doi.org/10.1023/A:1003969217686

IGKB (2004): Der Bodensee. Zustand-Fakten-Perspektiven. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Stuttgart: 177 S.

Jokiel, P. L., Morrissey, J. I. (1993): Water motion on coral reefs: evaluation of the 'clod card' technique. Marine Ecology Progress Series 93: 175-181.

Jupp, B., Spence, D. (1977): Limitations of macrophytes in a eutrophic lake, Loch Leven: II. Wave action, sediments and waterfowl grazing. The Journal of Ecology 65: 431-446.

Keddy, P. A. (1982): Quantifying within-lake gradients of wave energy: interrelation-ships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in Axe Lake, Ontario. Aquatic Botany 14: 41-58.

Keddy, P. A. (1983): Shoreline vegetation in Axe Lake, Ontario: effects of exposure on zonation patterns. Ecology 64(2): 331-344.

Keddy, P. A. (1985): Wave disturbance on lakeshores and the within-lake distribution of Ontario's Atlantic coastal plain flora. Canadian Journal of Botany 63(3): 656-660.

Kraus, N. C. & McDougal (1996): The effects of seawalls on the beach: Part 1, An updated literature review. Journal of Coastal Research 12: 691-701.

Martin, D., Bertasi, F., Colangelo, M. A., de Vries, M., Frost, M., Hawkins, S. J., Macpherson, E., Moschella, P. S., Satta, M. P., Thompson, R. C. (2005): Ecological impact of coastal defence structures on sediment and mobile fauna.: evaluation and forecasting consequences of unavoidable modifications of native habitats. Coastal Engineering 52: 1027-1051.

Miles, J. R., Russell, P. E., Huntley, D. A. (2001): Field measurements of sediment dynamics in front of a seawall. Journal of Coastal Research 17: 195-410.

Murphy, K., Eaton, J. W. (1983): Effects of pleasure-boat traffic on macrophyte growth in canals. Journal of Applied Ecology: 713-729.

Muus, B. J. (1968): A field method for measuring “exposure” by means of plaster balls: a preliminary account. Sarsia 34(1): 61-68.

Ostendorp, W., 2014. Auswirkungen der Ufermauern am Bodensee-Untersee auf die litorale Fauna und Flora: Ergebnisse szenariobasierter Expertenurteile Mitteilungen des Badischen Landesvereins für Naturkunde und Naturschutz N.F. 21: 371-404.

Ostendorp, W., Hofmann, H., Teufel, L., Miler, O. (2019): Effects of a retaining wall and an artificial embankment on nearshore littoral habitats and biota in a large Alpine lake. Hydrobiologia 847: 365-389.

Petticrew, E. L., Kalff, J. (1991): Calibration of a gypsum source for freshwater flow measurements. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 48(7): 1244-1249.

Poikane, S., Zohary, T., Cantonati, M., (2020): Assessing the ecological effects of hydromorphological pressures on European lakes. Inland Waters 10: 241–255. https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1654800

Porter, E. T., Sanford, L. P., Suttles, S. E. (2000). Gypsum dissolution is not a universal integrator of 'water motion'. Limnology and Oceanography 45(1): 145-158.

R Development Core Team (2024): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RStudio Inc. (2024): RStudio: Integrated development environment for R. RStudio Inc., Boston, MA, U.S.A.

Riis, T., Hawes, I. (2003): Effect of wave exposure on vegetation abundance, richness and depth distribution of shallow water plants in a New Zealand lake. Freshwater Biology 48(1): 75-87.

Runyan, K. Griggs, G. B. (2003): The effects of armoring seacliffs on the natural sand supply to the beaches of California. Journal of Coastal Research 19: 336-347.

Schmedtje, U., Kohmann, F., Burmeister, E.-G. (1992): Bestimmungsschlüssel für die Saprobien-DIN-Arten (Makroorganismen): Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: 274 Seiten.

Schutten, J., Dainty, J., Davy, A. J. (2004): Wave-induced hydraulic forces on submerged aquatic plants in shallow lakes. Annals of Botany 93: 333-341.

Schutten, J., Davy, A. (2000): Predicting the hydraulic forces on submerged macrophytes from current velocity, biomass and morphology. Oecologia 123 (4): 445-452.

Strayer, D. L., Findlay, S. E. (2010): Ecology of freshwater shore zones. Aquatic Sciences 72(2): 127-163.

Tait, G. F., Griggs, G. B. (1991): Beach response to the presence of a seawall. Comparisons of field observations. Final report CERC 91-1 for the Dept. of the Army, US Army Corps of Engineers (ed.).

Teiber-Sießegger, P. (2009): Limnologische Bewertung der Ufer- und Flachwasserzone des Bodensees. Bericht der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) 55: 122 S.

Tolonen, K. T., Hämäläinen, H., Holopainen, I. J., Karjalainen, J. (2001): Influences of habitat type and environmental variables on littoral macroinvertebrate communities in a large lake system. Archiv für Hydrobiologie 152: 39-67. https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/152/2001/39

Trial, P. F., Gelwick, F. P., Webb, M. A. (2001): Effects of shoreline urbanization on littoral fish assemblages. Lake and Reservoir Management 17(2): 127-138.

Vadeboncoeur, Y., McIntyre, P. B., Vander Zanden, M. J. (2011): Borders of biodiversity: life at the edge of the world's large lakes. BioScience 61(7): 526-537.

van de Weyer, K., Schmidt, C., Kreimeier, B., Wassong, D. (2018a): Bestimmungsschlüssel für die aquatischen Makrophyten (Gefäßpflanzen, Armleuchteralgen und Moose) in Deutschland, Band 1: Bestimmungsschlüssel, 2. aktualisierte Auflage: 178 S.

van de Weyer, K., Schmidt, C., Kreimeier, B., Wassong, D. (2018b): Bestimmungsschlüssel für die aquatischen Makrophyten (Gefäßpflanzen, Armleuchteralgen und Moose) in Deutschland, Band 2: Abbildungen, 2. aktualisierte Auflage: 382 S.

van Zuidam, B. G., Peeters, E. T. (2015): Wave forces limit the establishment of submerged macrophytes in large shallow lakes. Limnology and Oceanography 60(5): 1536-1549.

[43] Völker, J., Baumgarten, C., Blondzik, K., Borchardt, D., Hilliges, F., Mathan, C., Naumann, S., Osiek, D., Rechenberg, J., Schmedtje, U., Ullrich, A., Weiß, A., Wolter, R. (2016): Die Wasserrahmenrichtlinie: Deutschlands Gewässer 2015. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Wensink, S. M., Tiegs, S. D. (2016): Shoreline hardening alters freshwater shoreline ecosystems. Freshwater Science 35(3): 764-777.

Wessels, M., Brückner, N., Gaide, S. Wintersteller, P. (2017): Tiefenschärfe – die hochauflösende Vermessung des Bodensees. Wasserwirtschaft (4), 2017: 30-35.

Wetzel, R. G. (2001): Limnology: lake and river ecosystems. Gulf Professional Publishing.

White, J., Irvine, K. (2003): The use of littoral mesohabitats and their macroinvertebrate assemblages in the ecological assessment of lakes. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 13: 331-351. https://doi.org/10.1002/aqc.586

Anhang

Auswirkungen von Ufermauern unter dem Einfluss von Wind- und Schiffswellen am nördlichen Bodenseeufer

Jens Peter Armbruster
ORCID: 0000-0003-4137-7675
Limnologisches Institut der Universität Konstanz, AG Umweltphysik, Mainaustr. 252,
78464 Konstanz, Deutschland, jens.armbruster@yahoo.com

Oliver Miler
ORCID: 0000-0002-4781-244X
AquaSciConsulting Dr. Miler, Petershauserstr. 22,
78467 Konstanz, Deutschland, oliver.miler@web.de

Wolfgang Ostendorp
ORCID: 0000-0002-2171-7356
Limnologisches Institut der Universität Konstanz, AG Umweltphysik, Mainaustr. 252,
78464 Konstanz, Deutschland, wolfgang.ostendorp@uni-konstanz.de

S1 – Positionsdaten der Probenahmestellen: Tabelle S1.A
S2 – Störvariablen: Tabelle S2.A
S3 – Turbulente Wasserbewegungen: Tabelle S3.A
S4 – Oberflächensedimente: Tabelle S4.A & S4.B
S5 – Makrophyten: Tabelle S5.A, S5.B & S5.C
S6 – Makroinvertebraten: Tabelle S6.A, S6.B, S6.C, S6.D, S6.E & S6.F

S1 Positionsdaten der Probenahmestellen

Tabelle S1.A: Positionsdaten der insgesamt zwanzig Probenahmestellen, getrennt nach Uferstrecken (UEBW = Überlingen, HAGN = Hagnau, IMSB = Immenstaad, FNSM = Friedrichshafen und NONN = Nonnenhorn), verbauten (TEST) bzw. naturbelassenen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Gelistet sind die Koordinaten in UTM (WGS84 UTM 32N) sowie das Sohlniveau *WD*.

		NS			**OS**		
		Position Probenahmestelle UTM 32N		**Sohlniveau der Probenahme-positionen (*WD*)**	**Position Probenahmestelle UTM 32N**		**Sohlniveau der Probenahme-positionen (*WD*)**
Uferstrecke	**Ufer-abschnitt**	E	N	m NHN	E	N	m NHN
UEBW	TEST	510746	5290608	395,15	510747	5290603	394,64
	REF	509725	5291546	395,05	509719	5291547	394,63
HAGN	TEST	524042	5279965	394,48	524041	5279959	394,15
	REF	524730	5279557	394,42	524726	5279548	394,07
IMSB	TEST	527174	5278788	394,78	527186	5278785	394,29
	REF	527044	5278761	394,77	527049	5278748	394,32
FNSM	TEST	533984	5278016	394,69	533981	5278011	394,46
	REF	533815	5278071	394,69	533813	5278045	394,47
NONN	TEST	545440	5269883	394,47	545441	5269873	394,12
	REF	545291	5270250	394,49	545275	5270268	394,11

S2 Störvariablen

Tabelle S2.A: Übersicht über die Störvariablen Z der Uferstrecken (UEBW = Überlingen, HAGN = Hagnau, IMSB = Immenstaad, FNSM = Friedrichshafen und NONN = Nonnenhorn) getrennt nach verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF). Angegeben sind Länge des Uferabschnitts (*l*), Exposition des Uferabschnitts (*Expo*), Breite der unteren Eulitoral-Zone (*wEul*), Neigung der unteren Eulitoral-Zone (*nEul*), Breite des Sublitorals (*wSub*) und Neigung des Sublitorals (*nSub*). Details zu den Variablen sind in Kapitel 5.2 beschrieben.

		UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Variable	**Einheit**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
l	m	45	120	70	120	38	45	60	60	30	360
Expo	°	192	238	189	220	149	174	210	207	253	244
wEul	m	11	10	3	23	2	13	5	43	3	4
nEul	°	3,4	3,7	14,6	1,6	18,0	2,9	7,4	0,9	14,6	9,2
wSub	m	48	109	201	205	239	258	441	454	196	142
nSub	°	6,2	2,3	1,2	1,3	1,0	0,9	0,5	0,6	1,2	1,7

S3 Turbulente Wasserbewegungen

Tabelle S3.A: Übersicht über die Korrosionsraten *Δm/Δt* der zwanzig Probenahmepositionen getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF) sowie nach ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmestellen (OS). Für jede Probenahmeposition ist der Mittelwert aus drei Gipskörpern angegeben. Details zur Vorgehensweise bei Messung und Berechnung von *Δm/Δt* sind in Kapitel 5.1.1.1 beschrieben.

		NS										**OS**									
		UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**		**UEBW**		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Variable	**Einheit**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Δm/Δt	$g\ m^{-2}\ h^{-1}$	32,2	27,2	26,9	24,9	33,3	28,9	34,7	24,2	32,7	33,1	28,6	23,2	25,0	27,5	30,2	17,1	28,5	33,0	30,1	31,2

S4 Oberflächensedimente

Tabelle S4.A: Übersicht über die Korngrößenverteilung der zwanzig Probenahmestellen, getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturnahen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Angegeben ist der prozentuale Anteil der Fraktionen an der Gesamtprobe. Unterschieden wurden die Fraktionen *U+T* – Silt und Ton < 0,063 mm; *fFS* – Feiner Feinsand 0,063 – 0,112 mm; *gFS* – Grober Feinsand 0,112 – 0,200 mm; *fMS* – Feiner Mittelsand 0,200 – 0,355 mm; *gMS* – Grober Mittelsand 0,355 – 0,63 mm; *fGS* – Feiner Grobsand 0,63 – 1,12 mm; *gGS* – Grober Grobsand 1,12 – 2,0 mm; *fFG* – Feiner Feinkies 2,0 – 3,55 mm; *gFG* – Grober Feinkies 3,55 – 6,3 mm; *fMG* – Feiner Mittelkies 6,3 – 11,2 mm; *gMG* – Grober Mittelkies 11,2 – 20 mm; *fGG* – Feiner Grobkies 20 – 35,5 mm; *gGG* – Grober Grobkies 35,5 – 63 mm; *fX* – Feine Gerölle 63 – 112 mm und *mX* – Grobe Gerölle > 112 mm. Details zur Vorgehensweise bei der Probenahme sind in Kapitel 5.1.2.1 beschrieben.

		NS										OS									
		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Variable	**Einheit**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
U+T	%	0,18	0,13	0,05	0,20	0,07	0,10	0,21	2,98	0,02	0,46	1,61	2,59	4,12	0,24	0,13	4,10	0,11	0,92	0,03	0,01
fFS	%	0,32	0,14	0,04	0,17	0,05	0,05	0,10	2,62	0,01	0,18	0,94	0,71	0,98	0,19	0,25	6,35	0,12	0,18	0,02	0,00
gFS	%	1,62	0,25	0,06	0,35	0,03	0,22	0,17	3,94	0,03	1,54	5,19	0,76	1,21	0,56	0,72	9,53	0,12	0,27	0,16	0,01
fMS	%	5,02	0,87	0,12	0,82	0,02	1,05	0,63	5,21	0,11	5,27	16,40	3,29	1,94	2,52	1,28	13,70	0,26	0,27	0,31	0,00
gMS	%	1,14	1,74	0,33	0,74	0,02	1,74	1,28	7,74	1,16	1,81	5,77	3,06	2,37	3,66	1,18	21,97	0,83	0,64	0,75	0,01
fGS	%	0,38	0,91	0,66	0,70	0,01	0,32	3,11	2,02	1,05	0,64	1,60	0,21	1,11	1,32	0,66	1,06	0,61	0,85	0,46	0,00
gGS	%	0,38	0,75	0,87	0,93	0,02	0,19	2,83	3,05	1,48	0,37	1,36	0,21	0,90	0,74	1,11	0,31	0,77	0,63	0,29	0,00
fFG	%	0,55	0,58	1,11	1,24	0,07	0,28	3,63	4,97	1,64	0,28	2,47	1,11	1,47	1,23	2,73	0,70	1,65	1,17	0,40	0,00
gFG	%	1,14	0,92	2,35	2,56	0,11	0,37	5,01	7,62	1,35	1,25	5,01	1,35	2,41	2,25	7,67	1,21	2,31	3,28	0,79	0,00
fMG	%	9,68	1,63	4,30	2,60	0,72	1,09	7,39	7,09	1,26	2,78	8,58	2,51	4,25	4,78	13,24	2,20	4,38	4,77	2,00	0,00
gMG	%	42,32	2,34	9,15	7,31	4,95	1,47	12,88	6,52	2,40	7,83	13,69	3,63	8,92	10,00	18,95	8,73	9,51	11,48	4,54	0,00
fGG	%	18,39	4,17	15,44	2,52	17,97	3,48	8,92	6,74	3,25	14,97	9,64	6,44	22,82	14,13	14,53	19,39	17,75	11,29	8,18	1,81
gGG	%	2,69	47,24	23,55	33,38	29,43	15,66	16,68	9,58	14,64	41,31	26,15	20,86	23,45	6,07	12,77	10,77	22,04	24,88	3,83	74,39
fX	%	7,38	12,29	29,06	46,49	0,87	49,50	3,01	29,93	28,85	11,97	1,59	34,14	24,06	36,44	24,78	0,00	20,85	39,37	27,88	15,11
mX	%	8,81	26,04	12,89	0,00	45,65	24,49	34,15	0,00	42,75	9,34	0,00	19,13	0,00	15,85	0,00	0,00	18,69	0,00	50,36	8,64

Tabelle S4.B: Übersicht über die Flächendeckung der Gerölle im Sediment (*COC*), getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturnahen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Details zur Vorgehensweise bei Probenahme und Berechnung von *COC* sind in Kapitel 5.1.2.2 beschrieben.

		NS										**OS**									
		UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**		**UEBW**		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Variable	**Einheit**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
COC	$m^2\ m^{-2}$	0,1	0,9	0,9	0,6	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	1,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,2	0,4	0,5	0,8	0,7

S5 Makrophyten

Tabelle S5.A: Übersicht über den Deckungsgrad der submersen Makrophyten auf dem Seeboden (*SMC*), die aschefreie Phytomassendichte (*AFPM*) sowie die Artenzahl innerhalb der Probenahmefläche, getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturnahen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Details zur Vorgehensweise bei der Probennahme bzw. der Geländeerfassung sowie zur Berechnung sind in Kapitel 5.1.3 beschrieben.

		NS										OS									
		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Variable	**Einheit**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
SMC	%	15	10	2	45	1	40	0	10	0	0	100	98	70	55	95	97	95	30	0	10
AFPM²	g m^{-2}	0,60	4,97	0,60	41,21	0,31	44,39	0,01	16,09	0	0	252,10	259,90	67,56	54,51	99,34	240,46	143,11	68,57	0	1,75
SNSM	Arten	1	2	4	1	3	3	2	2	0	0	1	1	1	1	4	1	1	2	0	5

Tabelle S5.B: Prozentuale Anteile der nachgewiesenen Makrophyten-Arten an der Vegetation innerhalb der zwanzig Probenahmeflächen, getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturnahen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Nachgewiesen wurden die Arten *Chara aspera* WILLD. (*%Cha_as*), *Chara contraria* KÜTZ. (*%Cha_co*), *Chara globularis* THUILL. (*%Cha_gl*), *Najas marina* L. (*%Naj_ma*), *Potamogeton friesii* RUPR. (*%Pot_fr*), *Potamogeton lucens* L. (*%Pot_lu*), *Potamogeton perfoliatus* L. (*%Pot_pe*), *Stuckenia pectinata* (L.) BÖRNER (*%Stu_pe*) und *Myriophyllum spicatum* L. (*%Myr_sp*). Details zur Vorgehensweise bei der Probennahme sowie der Artbestimmung sind in Kapitel 5.1.3.3 beschrieben.

		NS										**OS**									
		UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**		**UEBW**		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Familie	**Taxon-Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Characeae	*%Cha_as*	100	90	0	100	0	0	50	99	0	0	100	100	100	100	0	0	100	67	0	25
	%Cha_co	0	0	0	0	0	97	0	0	0	0	0	0	0	0	79,8	100	0	0	0	0
	%Cha_glo	0	0	15	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrocharitaceae	*%Naj_mar*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	10
Potamogetonaceae	*%Pot_fr*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
	%Pot_lu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
	%Pot_pe	0	0	35	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	10
	%Stu_pe	0	10	30	0	19	2,9	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0
Haloragaceae	*%Myr_spi*	0	0	20	0	80	0,1	50	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0

Tabelle S5.C: Übersicht über die Sohlniveaus der Oberen Makrophytengrenze *OMG* der Uferstrecken (UEBW = Überlingen, HAGN = Hagnau, IMSB = Immenstaad, FNSM = Friedrichshafen, NONN = Nonnenhorn) getrennt nach verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF). Angegeben sind die Sohlniveaus der Oberen Makrophytengrenzen (*OMGmin* – uferliniennächstes Vorkommen von Unterwasserpflanzen, *OMG10* – Position und Sohlniveau bei Erreichen einer durchschnittlichen Vegetationsdeckung von 10 % & *OMG50* – Position und Sohlniveau bei Erreichen einer durchschnittlichen Vegetationsdeckung von 50 %). Details zur Vorgehensweise bei den Geländeerfassungen sind in Kapitel 5.1.3.4 beschrieben.

		UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Variable	**Einheit**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
OMGmin	m NHN	k. A.	395,30	394,50	395,30	394,76	395,54	394,67	394,97	393,44	394,24
OMG10	m NHN	394,84	395,00	394,25	394,80	394,56	395,24	394,59	394,96	393,44	394,24
OMG50	m NHN	394,75	394,98	394,17	394,54	394,49	395,01	394,59	394,62	393,22	393,04

S6 Makroinvertebraten

Tabelle S6.A: Individuendichten (Ind. m^{-2}) der nachgewiesenen Makrozoobenthos-Taxa in den standörtlich vorliegenden Substraten (*in-situ*) getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Details zur Vorgehensweise bei der Probenahme sind in Kapitel 5.1.4.1 beschrieben.

Standörtliche Substrate			NS										OS									
			UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Hydrozoa	Hydrozoa	*HYD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Porifera	Porifera	*POR*	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Nematoda	Nematoda	*NEM*	0	216	492	48	73	16	0	0	0	32	128	0	16	56	318	67	8	8	0	8
Bivalvia	*Dreissena rostriformis bugensis* ANDRUSOV 1897	*DBU*	24	72	597	2061	0	714	336	96	16	8	688	336	1907	7229	927	289	2153	6396	996	26267
	Dreissena polymorpha PALLAS 1771	*DPO*	8	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	8	0	8	0	0	8	16	80	592
	Corbicula fluminea O. F. MÜLLER 1774	*CFL*	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	16	16	0	0	0	0	0	592
	Sphaeriidae	*SPH*	0	24	0	72	0	67	0	0	8	72	64	240	16	72	0	0	0	8	0	88
Gastropoda	*Bithynia tentaculata* LINNAEUS 1758	*BTE*	0	48	32	104	16	8	8	8	0	0	104	40	8	88	64	16	0	64	0	8
	Radix spec.	*RAD*	0	0	64	0	8	0	0	0	0	8	0	0	40	16	0	0	0	8	0	0
	Ancylus fluviatilis O. F. MÜLLER 1774	*AFL*	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	24	16	0	0	0	40	0	8
	Potamopyrgus antipodarum J. E. GRAY 1843	*PAN*	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0	16	64	16	24	26	0	0	0	0	56
	Planorbidae	*PLA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	8	0	0	0	0
	Lymnaea stagnalis LINNAEUS 1758	*LST*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Physella acuta DRAPARNAUD 1805	*PAC*	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	16	0
	Valvata spec.	*VAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Gastropoda	*GAS*	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0
Oligochaeta	*Eiseniella tetraedra* SAVIGNY 1826	*ETE*	0	40	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Oligochaeta	*OLI*	310	3250	421	3555	1818	4471	1145	6387	152	216	1382	1132	1350	944	3178	2280	1704	381	336	1656
Hirudinea	*Hirudinea*	*HIR*	8	16	8	0	0	40	16	80	0	0	8	16	8	0	0	0	0	8	0	8
Arachnida	Hydracarina	*HAC*	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0

Fortsetzung Tabelle S6.A:

Standörtliche Substrate			NS										OS									
			UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Malacostraca	*Dikerogammarus villosus* SOWINSKY, 1894	*DVI*	352	208	1159	7951	1139	2165	823	216	288	372	528	1525	3257	3223	0	856	1632	951	572	2958
	Gammarus roeselii GERVAIS 1835	*GRO*	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Amphipoda	*AMP*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1192	0	0	0	8	0
	Mysida	*MYS*	8	48	16	8	0	32	16	24	104	336	56	64	16	0	32	56	16	176	136	144
Isopoda	*Asellus aquaticus* LINNAEUS 1758	*AAQ*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maxillopoda	Ostracoda	*OST*	0	8	8	8	0	0	0	0	0	0	16	72	16	0	0	0	0	0	0	0
	Branchiura	*BRA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Collembola	Collembola	*CBA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Insecta	*Caenis* spec.	*CAE*	0	1098	8	224	0	0	144	328	0	16	56	128	304	136	48	8	384	1246	32	400
	Baetis spec.	*BAE*	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0
	Ecdyonurus spec.	*ECD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ephemera spec.	*EPH*	0	0	0	8	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	Heteroptera	*HET*	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sialis spec.	*SIA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Elmis spec. (Larve)	*ELM*	0	0	0	0	0	0	8	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	16	120
	Haliplus spec. (Larve)	*HAL*	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	32	0	0	0
	Oulimnius spec. (Larve)	*OUL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	16	16
	Coleoptera indet. (Imago)	*COL*	8	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
	Goera pilosa FABRICIUS 1775	*GPI*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Trichoptera	*TRI*	0	16	0	8	0	8	0	0	8	16	24	56	0	8	8	8	24	208	0	16
	Chironomidae	*CHI*	2858	4398	4706	3038	1212	2009	1995	8117	1453	3840	7834	9100	1192	1400	1456	1290	1771	4920	2396	2958
	Tipulidae	*TIP*	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	8	0	0	0	0
	Tabanidae	*TAB*	0	16	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle S6.B: Individuendichten (Ind. m^{-2}) der auf den Betonplatten nachgewiesenen Makrozoobenthos-Taxa, getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Details zur Vorgehensweise bei der Probenahme sind in Kapitel 5.1.4.2 beschrieben.

Betonplatte			**NS**										**OS**									
			UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**		**UEBW**		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Hydrozoa	Hydrozoa	*HYD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Porifera	Porifera	*POR*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nematoda	Nematoda	*NEM*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bivalvia	*Dreissena rostriformis bugensis* ANDRUSOV 1897	*DBU*	46	27	46	98	46	9	267	9	9	249	0	116	249	427	151	0	1484	329	107	809
	Dreissena polymorpha PALLAS 1771	*DPO*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	98
	Corbicula fluminea O. F. MÜLLER 1774	*CFL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sphaeriidae	*SPH*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
Gastropoda	*Bithynia tentaculata* LINNAEUS 1758	*BTE*	0	0	0	0	34	0	9	9	0	0	0	0	36	0	9	0	9	0	0	89
	Radix spec.	*RAD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	71	0	0	0	0	0	0	9
	Ancylus fluviatilis O. F. MÜLLER 1774	*AFL*	0	0	0	107	0	0	0	0	0	0	0	0	71	116	0	0	0	9	0	0
	Potamopyrgus antipodarum J. E. GRAY 1843	*PAN*	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	36	0	27	0	0	0	0	36	0	0
	Planorbidae	*PLA*	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	0	0
	Lymnaea stagnalis LINNAEUS 1758	*LST*	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0
	Physella acuta DRAPARNAUD 1805	*PAC*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Valvata spec.	*VAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Gastropoda	*GAS*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	418	0	0	0	0	0	0	0
Oligochaeta	*Eiseniella tetraedra* SAVIGNY 1826	*ETE*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Oligochaeta	*OLI*	0	0	23	240	3931	3440	9	0	107	560	9	9	71	1227	427	4818	53	0	80	124
Hirudinea	*Hirudinea*	*HIR*	11	0	0	0	0	0	53	0	0	0	0	80	0	0	0	18	0	9	18	0
Arachnida	Hydracarina	*HAC*	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
Malacostraca	*Dikerogammarus villosus* SOWINSKY, 1894	*DVI*	0	0	34	133	823	329	222	133	44	0	0	9	116	187	160	116	267	9	142	382

Fortsetzung Tabelle S6.B:

Betonplatte			Ufernahe Probenahmestelle (NS)										Uferferne Probenahmestelle (OS)									
			UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Malacostraca	*Gammarus roeselii* GERVAIS 1835	*GRO*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	Sonstige Amphipoda	*AMP*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	Mysida	*MYS*	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	9	18	53
Isopoda	*Asellus aquaticus* LINNAEUS 1758	*AAQ*	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maxillopoda	Ostracoda	*OST*	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0
	Branchiura	*BRA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Collembola	Collembola	*CBA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Insecta	*Caenis* spec.	*CAE*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Baetis spec.	*BAE*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ecdyonurus spec.	*ECD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ephemera spec.	*EPH*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Heteroptera	*HET*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sialis spec.	*SIA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Elmis spec. (Larve)	*ELM*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Haliplus spec. (Larve)	*HAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Oulimnius spec. (Larve)	*OUL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0
	Coleoptera indet. (Imago)	*COL*	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Goera pilosa FABRICIUS 1775	*GPI*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Trichoptera	*TRI*	11	0	0	0	0	0	0	0	18	27	18	9	0	9	0	0	44	0	18	36
	Chironomidae	*CHI*	2171	862	251	133	320	667	1947	1707	2249	1218	98	222	604	258	284	2044	453	1582	1600	987
	Tipulidae	*TIP*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tabanidae	*TAB*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle S6.C: Tabelle S6.C: Individuendichten (Ind. m^{-2}) der auf den vorderen Ziegeln mit der Öffnung landseits nachgewiesenen Makrozoobenthos-Taxa, getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Positionen an denen keine Probenahme möglich war, weil alle drei Ziegelgruppen-Replikate während der Exposition zerstört wurden, sind durch ein „X“ gekennzeichnet. Details zur Vorgehensweise bei der Probenahme sind in Kapitel 5.1.4.2 beschrieben.

„Ziegel Vorne“ (Öffnung landseits)			**NS**										**OS**									
			UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**		**UEBW**		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Hydrozoa	Hydrozoa	*HYD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Porifera	Porifera	*POR*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Nematoda	Nematoda	*NEM*	0	0	0	3	0	0	8	33	13	36	8	6	0	0	8	24	25	3	X	7
Bivalvia	*Dreissena rostriformis bugensis* ANDRUSOV 1897	*DBU*	16	54	43	43	9	34	9	33	0	29	8	6	83	77	8	8	478	114	X	80
	Dreissena polymorpha PALLAS 1771	*DPO*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	13	3	X	7
	Corbicula fluminea O. F. MÜLLER 1774	*CFL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	X	0
	Sphaeriidae	*SPH*	0	13	0	9	0	0	0	0	0	29	0	6	3	0	0	0	0	0	X	7
Gastropoda	*Bithynia tentaculata* LINNAEUS 1758	*BTE*	0	6	22	26	9	11	0	55	0	22	25	3	9	9	25	0	0	54	X	44
	Radix spec.	*RAD*	0	0	0	9	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	3	X	0
	Ancylus fluviatilis O. F. MÜLLER 1774	*AFL*	0	3	0	23	0	23	0	0	0	0	0	0	49	9	0	0	0	9	X	0
	Potamopyrgus antipodarum J. E. GRAY 1843	*PAN*	0	52	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	6	3	0	0	0	0	X	15
	Planorbidae	*PLA*	0	9	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	X	7
	Lymnaea stagnalis LINNAEUS 1758	*LST*	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	X	0
	Physella acuta DRAPARNAUD 1805	*PAC*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Valvata spec.	*VAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Gastropoda	*GAS*	0	0	0	0	0	0	0	22	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Oligochaeta	*Eiseniella tetraedra* SAVIGNY 1826	*ETE*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Oligochaeta	*OLI*	16	27	7	9	80	227	54	131	0	7	25	14	17	11	125	82	50	17	X	7
Hirudinea	*Hirudinea*	*HIR*	8	0	0	0	18	102	0	77	0	0	0	20	0	0	25	24	50	6	X	7
Arachnida	Hydracarina	*HAC*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	X	0

Fortsetzung Tabelle S6.C:

„Ziegel Vorne“ (Öffnung landseits)			NS										OS									
			UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Malacostraca	*Dikerogammarus villosus* SOWINSKY, 1894	*DVI*	56	81	109	140	398	79	177	186	54	116	16	117	86	37	100	106	201	103	X	153
	Gammarus roeselii GERVAIS 1835	*GRO*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Amphipoda	*AMP*	0	0	22	23	0	0	0	0	0	0	0	0	14	14	0	0	0	0	X	0
	Mysida	*MYS*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	3	X	22
Isopoda	*Asellus aquaticus* LINNAEUS 1758	*AAQ*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Maxillopoda	Ostracoda	*OST*	0	0	7	17	0	0	0	0	0	0	0	6	6	3	0	0	0	0	X	0
	Branchiura	*BRA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Collembola	Collembola	*CBA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Insecta	*Caenis* spec.	*CAE*	0	3	0	6	0	23	8	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	3	X	0
	Baetis spec.	*BAE*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Ecdyonurus spec.	*ECD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Ephemera spec.	*EPH*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Heteroptera	*HET*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sialis spec.	*SIA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Elmis spec. (Larve)	*ELM*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Haliplus spec. (Larve)	*HAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Oulimnius spec. (Larve)	*OUL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Coleoptera indet. (Imago)	*COL*	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Goera pilosa FABRICIUS 1775	*GPI*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Trichoptera	*TRI*	0	3	0	0	0	0	8	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	X	22
	Chironomidae	*CHI*	281	822	507	206	239	715	723	438	80	349	722	123	103	200	424	383	201	94	X	306
	Tipulidae	*TIP*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Tabanidae	*TAB*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0

Tabelle S6.D: Individuendichten (Ind. m^{-2}) der auf den mittleren Ziegeln mit der Öffnung nach oben nachgewiesenen Makrozoobenthos-Taxa, getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Positionen an denen keine Probenahme möglich war, weil alle drei Ziegelgruppen-Replikate während der Exposition zerstört wurden, sind durch ein „X“ gekennzeichnet. Details zur Vorgehensweise bei der Probenahme sind in Kapitel 5.1.4.2 beschrieben.

„Ziegel Aufrecht“ (Mitte)			**NS**										**OS**									
			UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**		**UEBW**		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Hydrozoa	Hydrozoa	*HYD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Porifera	Porifera	*POR*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Nematoda	Nematoda	*NEM*	9	16	6	6	19	3	0	0	0	0	0	6	25	9	12	0	0	0	X	0
Bivalvia	*Dreissena rostriformis bugensis* ANDRUSOV 1897	*DBU*	195	31	58	494	6	19	71	29	0	22	6	184	145	438	54	395	327	93	X	71
	Dreissena polymorpha PALLAS 1771	*DPO*	9	10	0	0	0	0	3	0	0	25	0	0	29	0	0	0	0	6	X	9
	Corbicula fluminea O. F. MÜLLER 1774	*CFL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sphaeriidae	*SPH*	0	31	19	52	0	6	9	0	12	0	3	0	0	31	22	0	9	0	X	37
Gastropoda	*Bithynia tentaculata* LINNAEUS 1758	*BTE*	27	20	19	26	12	12	12	22	0	6	3	92	58	0	3	3	12	65	X	62
	Radix spec.	*RAD*	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0	6	3	0	0	0	0	X	3
	Ancylus fluviatilis O. F. MÜLLER 1774	*AFL*	0	0	0	6	0	0	0	3	0	0	0	0	3	3	0	0	0	12	X	6
	Potamopyrgus antipodarum J. E. GRAY 1843	*PAN*	0	0	0	26	0	3	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	0	X	25
	Planorbidae	*PLA*	0	3	0	26	0	0	0	0	0	0	6	16	0	0	0	0	0	0	X	0
	Lymnaea stagnalis LINNAEUS 1758	*LST*	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	X	0
	Physella acuta DRAPARNAUD 1805	*PAC*	0	0	0	0	3	3	0	29	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	X	0
	Valvata spec.	*VAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	9
	Sonstige Gastropoda	*GAS*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Oligochaeta	*Eiseniella tetraedra* SAVIGNY 1826	*ETE*	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Oligochaeta	*OLI*	106	133	135	130	133	105	16	162	12	65	34	275	305	63	98	72	149	6	X	0
Hirudinea	*Hirudinea*	*HIR*	0	3	0	0	3	0	0	9	0	0	3	19	0	0	0	0	3	0	X	3
Arachnida	Hydracarina	*HAC*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0

Fortsetzung Tabelle S6.D:

„Ziegel Aufrecht“ (Mitte)			NS										OS									
			UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Malacostraca	*Dikerogammarus villosus* SOWINSKY, 1894	*DVI*	18	31	77	52	363	140	381	118	154	65	31	46	364	125	54	287	56	146	X	143
	Gammarus roeselii GERVAIS 1835	*GRO*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Amphipoda	*AMP*	0	9	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Mysida	*MYS*	0	0	0	0	0	3	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	X	28
Isopoda	*Asellus aquaticus* LINNAEUS 1758	*AAQ*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Maxillopoda	Ostracoda	*OST*	0	0	3	78	12	6	0	15	0	0	0	0	0	63	11	0	28	0	X	6
	Branchiura	*BRA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Collembola	Collembola	*CBA*	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Insecta	*Caenis* spec.	*CAE*	0	0	0	52	0	0	0	15	0	0	0	6	0	0	0	0	0	3	X	0
	Baetis spec.	*BAE*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Ecdyonurus spec.	*ECD*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	3
	Ephemera spec.	*EPH*	364	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Heteroptera	*HET*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sialis spec.	*SIA*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Elmis spec. (Larve)	*ELM*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Haliplus spec. (Larve)	*HAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Oulimnius spec. (Larve)	*OUL*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Coleoptera indet. (Imago)	*COL*	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Goera pilosa FABRICIUS 1775	*GPI*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Trichoptera	*TRI*	0	0	0	26	0	3	0	0	0	3	3	6	9	0	0	0	0	0	X	0
	Chironomidae	*CHI*	364	959	319	156	96	34	96	250	142	93	344	1331	872	31	163	54	131	37	X	53
	Tipulidae	*TIP*	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0	0	0	0	0	0	X	0
	Tabanidae	*TAB*	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	X	0

Tabelle S6.E: Individuendichten (Ind. m^{-2}) der auf den hinteren Ziegeln, mit der Öffnung seeseits, nachgewiesenen Makrozoobenthos-Taxa, getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Positionen an denen keine Probenahme möglich war, weil alle drei Ziegelgruppen-Replikate während der Exposition zerstört oder beschädigt wurden, sind durch ein „X“ gekennzeichnet. Details zur Vorgehensweise bei der Probenahme sind in Kapitel 5.1.4.2 beschrieben.

„Ziegel Hinten“ (Öffnung seeseits)			**NS**										**OS**									
			UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**		**UEBW**		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Hydrozoa	Hydrozoa	*HYD*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Porifera	Porifera	*POR*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Nematoda	Nematoda	*NEM*	0	14	X	0	10	13	0	12	7	18	3	5	0	0	31	35	25	19	X	0
Bivalvia	*Dreissena rostriformis bugensis* ANDRUSOV 1897	*DBU*	21	23	X	109	10	40	74	12	0	35	6	26	46	263	41	375	529	84	X	327
	Dreissena polymorpha PALLAS 1771	*DPO*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	X	8
	Corbicula fluminea O. F. MÜLLER 1774	*CFL*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	X	0
	Sphaeriidae	*SPH*	0	0	X	0	0	0	0	0	7	27	0	0	0	6	0	0	0	0	X	23
Gastropoda	*Bithynia tentaculata* LINNAEUS 1758	*BTE*	7	6	X	29	3	0	3	42	0	9	20	3	23	6	10	23	0	45	X	31
	Radix spec.	*RAD*	0	3	X	0	0	0	0	0	0	9	3	6	0	3	0	0	0	0	X	0
	Ancylus fluviatilis O. F. MÜLLER 1774	*AFL*	0	0	X	26	0	0	0	0	0	0	0	0	23	14	0	0	0	0	X	0
	Potamopyrgus antipodarum J. E. GRAY 1843	*PAN*	0	0	X	0	10	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	X	0
	Planorbidae	*PLA*	0	3	X	0	0	0	0	3	0	0	3	9	0	0	0	0	0	0	X	0
	Lymnaea stagnalis LINNAEUS 1758	*LST*	0	0	X	3	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	0	0	0	X	0
	Physella acuta DRAPARNAUD 1805	*PAC*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Valvata spec.	*VAL*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Gastropoda	*GAS*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	3
Oligochaeta	*Eiseniella tetraedra* SAVIGNY 1826	*ETE*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Oligochaeta	*OLI*	0	9	X	11	199	53	10	78	13	9	6	36	6	11	41	117	63	26	X	30
Hirudinea	*Hirudinea*	*HIR*	0	3	X	0	3	9	15	66	0	9	0	21	0	0	0	35	63	16	X	15
Arachnida	Hydracarina	*HAC*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0

Fortsetzung Tabelle S6.E:

„Ziegel Hinten“ (Öffnung seeseits)			NS										OS									
			UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Malacostraca	*Dikerogammarus villosus* SOWINSKY, 1894	*DVI*	64	64	X	51	498	132	103	215	81	106	6	82	23	31	246	539	113	109	X	205
	Gammarus roeselii GERVAIS 1835	*GRO*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Amphipoda	*AMP*	0	0	X	6	0	0	0	0	0	0	0	0	17	20	0	0	0	0	X	0
	Mysida	*MYS*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	X	23
Isopoda	*Asellus aquaticus* LINNAEUS 1758	*AAQ*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Maxillopoda	Ostracoda	*OST*	0	23	X	0	0	0	0	0	0	0	6	10	9	6	0	0	0	0	X	0
	Branchiura	*BRA*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Collembola	Collembola	*CBA*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
Insecta	*Caenis* spec.	*CAE*	0	0	X	3	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	23	0	39	X	0
	Baetis spec.	*BAE*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Ecdyonurus spec.	*ECD*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Ephemera spec.	*EPH*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Heteroptera	*HET*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sialis spec.	*SIA*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Elmis spec. (Larve)	*ELM*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Haliplus spec. (Larve)	*HAL*	0	14	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Oulimnius spec. (Larve)	*OUL*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Coleoptera indet. (Imago)	*COL*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Goera pilosa FABRICIUS 1775	*GPI*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Sonstige Trichoptera	*TRI*	0	0	X	0	0	0	0	0	7	18	0	0	0	0	0	0	0	6	X	15
	Chironomidae	*CHI*	50	309	X	177	269	527	418	496	317	230	375	237	140	177	452	727	289	257	X	350
	Tipulidae	*TIP*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
	Tabanidae	*TAB*	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0

Tabelle S6.F: Individuendichten (Ind. m^{-2}) der auf den Gabionen nachgewiesenen Makrozoobenthos-Taxa, getrennt nach Uferstrecken (UEBW – Überlingen, HAGN – Hagnau, IMSB – Immenstaad, FNSM – Friedrichshafen, NONN – Nonnenhorn), verbauten (TEST) und naturbelassenen Uferabschnitten (REF) sowie ufernahen (NS) und uferfernen Probenahmepositionen (OS). Positionen an denen keine Probenahme möglich war, weil alle drei Gabionen-Replikate zerstört wurden, sind durch ein „X“ gekennzeichnet. Details zur Vorgehensweise bei der Probenahme sind in Kapitel 5.1.4.2 beschrieben.

Gabione			**NS**										**OS**									
			UEBW		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**		**UEBW**		**HAGN**		**IMSB**		**FNSM**		**NONN**	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Hydrozoa	Hydrozoa	*HYD*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Porifera	Porifera	*POR*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nematoda	Nematoda	*NEM*	5	22	3	15	5	0	11	4	X	3	13	12	17	3	9	2	11	5	6	2
Bivalvia	*Dreissena rostriformis bugensis* ANDRUSOV 1897	*DBU*	89	92	47	954	363	80	429	448	X	30	15	81	354	663	162	486	2431	2591	850	1236
	Dreissena polymorpha PALLAS 1771	*DPO*	0	0	0	0	11	0	0	0	X	0	0	2	2	2	0	0	0	0	30	95
	Corbicula fluminea O. F. MÜLLER 1774	*CFL*	0	3	0	0	0	0	0	0	X	102	0	0	0	0	2	0	0	0	15	95
	Sphaeriidae	*SPH*	0	3	0	2	2	3	0	5	X	8	9	10	2	5	6	2	0	0	15	11
Gastropoda	*Bithynia tentaculata* LINNAEUS 1758	*BTE*	0	13	34	34	5	0	0	0	X	8	51	14	41	8	76	11	6	18	0	96
	Radix spec.	*RAD*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	8	5	0	0	0	0	0	15	11
	Ancylus fluviatilis O. F. MÜLLER 1774	*AFL*	0	0	2	8	0	0	0	0	X	0	0	0	12	2	0	0	0	2	0	21
	Potamopyrgus antipodarum J. E. GRAY 1843	*PAN*	0	0	9	0	0	0	25	0	X	2	0	0	0	0	0	5	0	0	30	96
	Planorbidae	*PLA*	0	26	0	0	0	0	0	0	X	0	0	6	0	2	2	0	0	0	0	11
	Lymnaea stagnalis LINNAEUS 1758	*LST*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Physella acuta DRAPARNAUD 1805	*PAC*	0	3	0	2	0	0	0	0	X	0	13	0	2	3	0	0	0	2	0	0
	Valvata spec.	*VAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Gastropoda	*GAS*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
Oligochaeta	*Eiseniella tetraedra* SAVIGNY 1826	*ETE*	0	12	0	0	0	0	0	0	X	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Oligochaeta	*OLI*	44	127	39	235	385	29	657	244	X	38	164	28	74	55	750	156	192	507	61	169
Hirudinea	*Hirudinea*	*HIR*	0	16	0	3	3	6	4	55	X	5	4	87	11	11	11	2	11	7	15	20
Arachnida	Hydracarina	*HAC*	0	0	0	0	3	0	0	0	X	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Fortsetzung Tabelle S6.F:

Gabione			NS										OS									
			UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN		UEBW		HAGN		IMSB		FNSM		NONN	
Höhere Taxa	**Taxon**	**Code**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**	**TEST**	**REF**
Malacostraca	*Dikerogammarus villosus* SOWINSKY, 1894	*DVI*	33	20	17	813	99	80	328	142	X	456	13	18	213	273	650	165	473	394	137	528
	Gammarus roeselii GERVAIS 1835	*GRO*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Amphipoda	*AMP*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mysida	*MYS*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	5	2	6	0	0	0	0	0	0	0	2
Isopoda	*Asellus aquaticus* LINNAEUS 1758	*AAQ*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maxillopoda	Ostracoda	*OST*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	4	4	0	0	2	0	0	0	0	0
	Branchiura	*BRA*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Collembola	Collembola	*CBA*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
Insecta	*Caenis* spec.	*CAE*	0	7	0	8	0	0	51	20	X	0	2	18	5	3	3	2	14	38	0	11
	Baetis spec.	*BAE*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ecdyonurus spec.	*ECD*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ephemera spec.	*EPH*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Heteroptera	*HET*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sialis spec.	*SIA*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Elmis spec. (Larve)	*ELM*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	Haliplus spec. (Larve)	*HAL*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Oulimnius spec. (Larve)	*OUL*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	Coleoptera indet. (Imago)	*COL*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Goera pilosa FABRICIUS 1775	*GPI*	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sonstige Trichoptera	*TRI*	0	0	3	8	2	0	0	0	X	2	0	4	0	3	0	3	6	8	2	3
	Chironomidae	*CHI*	289	751	82	219	627	103	1869	1567	X	319	484	203	123	94	775	110	166	648	288	106
	Tipulidae	*TIP*	0	0	0	2	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tabanidae	*TAB*	0	7	0	0	0	0	0	0	X	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0