

## Ökologische Begleituntersuchungen an drei denkmalpflegerischen Erosionssicherungsmaßnahmen am deutschen und schweizerischen Bodenseeufer

Wolfgang Ostendorp, Michael Dienst, Ingo Kramer und Irene Strang<sup>1</sup>

In drei gefährdeten prähistorischen Unterwasserdenkmälern, davon zwei der UNESCO-Welterbe-Liste, wurden die ökologischen Auswirkungen von Erosionsschutzmaßnahmen untersucht. Die Denkmäler liegen am Überlingersee (Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen; Deutschland) sowie am Untersee (Ermatingen-Westerfeld; Schweiz). Die Maßnahmen bestanden aus Kies- und Geröllschüttungen, die großflächig (2009 in Litzelstetten-Krähenhorn; 1998 in Ermatingen-Westerfeld) oder als Riegel in Form von Waben (2009 in Sipplingen-Osthafen) über siltig-sandigen Seekeiden und Psammiten aufgebracht wurden. Zunächst wurde ein detailliertes Arbeitskonzept (»Ökologische Begleituntersuchungen«, ÖBU) entwickelt, das den Anforderungen einer Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) genügt. Das Konzept wurde 2008 (Voruntersuchungen) und 2010 (Nachuntersuchungen) umgesetzt. Auf den neuen Schüttungsflächen (Litzelstetten-Krähenhorn, Sipplingen-Osthafen) konnte sich aufgrund der geringen Verfüllung des Porenraums mit Feinsediment (Kolmation) noch keine Unterwasservegetation entwickeln. Auf den älteren Flächen (Ermatingen-Westerfeld) war die Armelecheralgen-Vegetation (*Chara* spp.) auf Bereiche mit hohem Feinsedimentanteil beschränkt. Darüber hinaus war hier die Vegetation einem starken Fraßdruck durch Schwäne (*Cygnus cygnus*, *C. olor*) ausgesetzt. Der Ausfall der Unterwasservegetation als Lebensraum führte zu einer beträchtlichen Verringerung der Gesamt-Makrozoobenthos-Dichte, verglichen mit unbeeinflussten, vegetationsbedeckten Standorten der Umgebung. Phytophile und psammophile Taxa wurden negativ beeinflusst, während substrat-indifferente Arten gefördert wurden. Die Fischfauna – überwiegend ubiquitäre pelagische Arten – wurde nicht negativ beeinflusst. Vielmehr dürften räumlich begrenzte Schüttungen die Vielfalt an Lebens- und Nahrungsräumen erhöhen. Wir empfehlen für zukünftige Maßnahmen die Verringerung nachteiliger ökologischer Auswirkungen durch (i) die Förderung der Kolmation durch Verwendung eines Schüttungsmaterials mit beträchtlichem Feinkies- und Grobsandanteil, (ii) die punktförmige Ausbringung von großen Geröllen (>200 mm) als Unterstand für benthisch lebende Fischarten (u.a. Groppe, *Cottus gobio*, Art der Anhangsliste II der FFH-RL), (iii) die Bevorzugung von Wabenschüttungen (wie in Sipplingen-Osthafen) gegenüber Flächenschüttungen.

»Ecological impact assessment of erosion protection measures in three prehistoric underwater monument sites on Lake Constance shore (Germany, Switzerland).«

The ecological effects of erosion protection measures were investigated at three underwater monument sites. The monuments are situated on the littoral platform of Überlingersee (Litzelstetten-Krähenhorn, Sipplingen-Osthafen; Germany) and Untersee (Ermatingen-Westerfeld; Switzerland) which both form parts of Lake Constance. Two sites are included in the UNESCO World Heritage list of »Prehistoric Pile Dwellings around the Alps«. The natural fine sands and silty lake marl were covered with medium sized and coarse pebbles and fine cobbles to form a homogenous extensive fill (Litzelstetten-Krähenhorn in 2009, Ermatingen-Westerfeld in 1998) or a honeycomb-like network of ridges and unaffected inside areas (Sipplingen-Osthafen in 2009). Before the measures were realised, a detailed working concept was developed which met the requirements of environmental impact studies according to corresponding EC directives and national legislation. The fieldwork was carried out in 2008 (pilot survey) and in 2010 (follow-up examination). We found that there was nearly no fill-up of the coarse volume of the pebble/cobble bed with suspended matter (colmation) which impeded the establishment of submerged vegetation from diaspores in Litzelstetten-Krähenhorn and Sipplingen-Osthafen. In the much older Ermatingen-Westerfeld fill stonewort (*Chara* sp.) were confined to sites with a higher content of fine sediment. Here in addition, grazing of swans (*Cygnus cygnus*, *C. olor*) was a significant disturbing factor leading to suspension and transportation of fine matter. The lack of submerged vegetation habitats in Litzelstetten-Krähenhorn and Sipplingen-Osthafen led to a significant reduction in macroinvertebrate density compared with unaffected reference sites. Phytophilous and psammophilous taxa were negatively affected whereas the numbers of substrate-indifferent taxa were enhanced. The fish fauna consisted of ubiquitous pelagic species which were not negatively influenced. The nearly 12 year-old measure at Ermatingen-

<sup>1</sup> Anschrift der Verfasser: Arbeitsgruppe Bodenseeufer (AGBU) e.V., Herostr. 18, 78467 Konstanz, Deutschland: Wolfgang Ostendorp, PD Dr., Diplom-Biologe, wolfgang.ostendorp@uni-konstanz.de; Michael Dienst, Diplom-Biologe, michaeldienst@ds-konstanz.de; Ingo Kramer, Diplom-Biologe, ognikramer@aol.com; Irene Strang, Diplom-Biologin, irene.strang@arcor.de.

Westerfeld showed that the pebble/cobble fills have the potential to enhance the habitat diversity in densely vegetated littoral shoals, thereby attracting benthic fish species like the stone loach, *Barbatula barbatula*. For future erosion protection measures we recommend minimising adverse effects by (i) enhancement of colmation by use of filling material with a broad grain size range including granule and sand, (ii) punctiform deposition of boulders as a potential shelter for benthic fish including bullhead, *Cottus gobio*, species in Appendix II of the EEC Habitats Directive, (iii) the preference of honeycomb fills (as in Sipplingen-Osthafen) over an extensively uniform fill.

**Keywords:** pile dwellings, UNESCO World Heritage, benthic macroinvertebrates, submerged vegetation, environmental impact assessments – EIA.

## 1. Einleitung

Die flächenhafte Erosion an vielen Uferabschnitten des Bodensees und anderer Voralpenseen gefährdet – wie zahlreiche taucharchäologische Untersuchungen gezeigt haben – die Substanz von Unterwasserdenkmalen, von denen etliche Eingang in die UNESCO-Welterbe-Liste »Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen« gefunden haben (UNESCO 2011). Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des Interreg IV-Projekts »Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee (2008–2011)« große Kulturschichtbereiche unter anderem der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (Stadt Konstanz) und Sipplingen-Osthafen (Gem. Sipplingen, beide am Bodensee-Überlingersee) mit einer Kies-/Geröllschüttung abgedeckt (Köninger/Schlichtherle 2013).

Die Maßnahmen bauen auf Erfahrungen auf, die in früheren Jahren gesammelt werden konnten (Brem et al. 2013), beispielsweise an der Kiesschüttung in der Station Ermatingen-Westerfeld (Gem. Ermatingen) am schweizerischen Bodensee-Untersee. Sie wurde im November/Dezember 1998 eingerichtet (Brem et al. 2001), so dass sie nach fast zwölf Jahren die Langzeitentwicklung derartiger Maßnahmen repräsentiert. Demgegenüber konnten die anderen Sicherungsmaßnahmen lediglich im Jahr nach ihrer Fertigstellung untersucht werden.

Die Schüttungen stellen dauerhafte Eingriffe in die sublittoralen Lebensräume dar, die der sorgfältigen Abwägung unter Berücksichtigung der Zielsetzungen des Gewässerschutzes und des Naturschutzes bedürfen. Hierzu dienen »Ökologische Begleituntersuchungen« (ÖBU), die bereits im Vorfeld der Planungen konzeptionell ausgearbeitet und dann schrittweise im Laufe der Jahre 2008 (Voruntersuchungen) und 2010 (Nachuntersuchungen) umgesetzt wurden. Im Vordergrund steht die Frage, wie sich die Erosionssicherungsmaßnahmen auf die Substrateigenschaften, die Unterwasservegetation, die den Seeboden bewohnende Wirbellosenfauna (Makrozoobenthos) und die Fischfauna auswirken und welche Modifikationen im Hinblick auf die Minimierung etwaiger negativer ökologischer Effekte empfohlen werden können.

## 2. Zielsetzungen der »Ökologischen Begleituntersuchungen« von Wasserbaumaßnahmen

»Ökologische Begleituntersuchungen« dienen dazu,

- durch Voruntersuchungen den ökologischen Zustand des Planungssperimeters zu dokumentieren und Hinweise für eine möglichst umweltschonende Planung zu liefern,
- den Umsetzungsprozess zu begleiten und die wasser- bzw. landschaftsbaulichen Eingriffe zu dokumentieren,
- anhand von Kontrolluntersuchungen den Zielerreichungsgrad (Funktionskontrolle) und die tatsächlichen Auswirkungen (Wirkungskontrolle) zu bestimmen, um damit zu einer Optimierung künftiger Maßnahmen beizutragen.

Vorangehen müssen Vorarbeiten, die zur Abklärung des Gesamtrahmens, zur Identifizierung der wesentlichen Schutzgüter und zur Festlegung des Untersuchungsprogramms führen (Ostendorf et al. 2008a). Bei der Konzeption der »Ökologischen Begleituntersuchungen« ist insbesondere auf folgende Punkte zu achten:

- Entscheidungsrelevanz: Bearbeitung der im Hinblick auf Planungsvarianten und Wirkungs- bzw. Funktionskontrolle relevanten Fragestellungen (bei gleichzeitiger Vermeidung nicht relevanter Untersuchungen) mit geeigneten Fachmethoden unter Berücksichtigung der Tiefe, des Umfangs und des Zeitraums der Untersuchungen sowie der Auswertungsmöglichkeiten der Daten (Vertrauensgrenzen, Prüfstatistik, Szenarien u.a.),
- Kohärenz: gegenseitige Abstimmung, gemeinsamer Raumbezug (z.B. Biotoptypen), möglichst ein gemeinsamer Probennahmeplan der einzelnen Teiluntersuchungen,
- Vergleichbarkeit: Durchführung der Kontrolluntersuchungen in grundsätzlich der gleichen Weise (Methodik, Umfang, Untersuchungstiefe) wie die Voruntersuchungen, so dass die Ergebnisse beider Untersuchungsblöcke unmittelbar miteinander vergleichbar sind,
- Methodik und Durchführung der Untersuchungen: nach allgemein anerkannten Verfahren unter Beachtung nationaler Normen, Empfehlungen der Fachverbände und Arbeitsanleitungen der zuständigen Fachbehörden und Dienststellen des Umweltschutzes,
- Qualitätsmanagement: Produktion verlässlicher Ergebnisse durch laborinterne qualitätssichernde Maßnahmen.

Unmittelbare gesetzliche Vorgaben für die Qualität der ÖBU gibt es keine. Die Wahl der Untersuchungsvariablen, der Untersuchungsumfang und die Untersuchungstiefe richten sich vielmehr danach, ob für ein konkretes Vorhaben eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP: [AT, CH, DE]<sup>2</sup>) bzw. eine FFH-Verträglichkeitsprüfung (FFH-VP: [AT, DE]) verlangt wird, oder ob lediglich die nationalen Vorschriften der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung [CH, DE] innerhalb und außerhalb von nationalen Schutzgebieten zu beachten sind (Abb. 1).

2 Abkürzungen der Anliegerstaaten des Bodensees nach ISO 3166.



Abb. 1: Überlappung von Eingriffsprüfung außerhalb und innerhalb von Naturschutzgebieten n. § 22 ff. BNatSchG, FFH-Verträglichkeitsprüfung (NATURA 2000-Schutzgebiete n. § 32 ff. BNatSchG, die nicht notwendigerweise auch § 22-Schutzgebiete sein müssen) und Umweltverträglichkeitsprüfung bei räumlich konkretisierten Vorhaben n. § 3 Abs. 1 u. 1a UVPG [DE].

Die fach(wissenschaft)lichen Anforderungen, die an die Qualität von ökologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit UVP, FFH-VP und Eingriffsregelung gestellt werden, sind zumeist in untergesetzlichen Standards geregelt (Übersicht in Ostendorp et al. 2008a). Sie betreffen

- die Bedeutung einer rechtzeitigen Planung und einer sorgfältigen Festlegung des Untersuchungsrahmens (Scoping),

- die Auswahl der relevanten Schutzgüter und Untersuchungsvariablen,
- die Nutzung der Biotoptypen-Kartierung als gemeinsame Generalisierungsgrundlage,
- die Erhebung entscheidungsrelevanter und zuverlässiger vegetationskundlicher und tierökologischer Daten,
- die Methoden der Datenanalyse und die fachliche Beurteilung (einschl. der Wirkungsprognose),
- die Methoden des Variantenvergleichs,
- Erfolgskontrollen und Monitoring,
- Angaben zur Qualitätssicherung.

Am Beispiel der denkmalpflegerischen Erosionssicherungsmaßnahmen am Bodensee [CH, DE] haben wir die gesetzlichen und fachlichen Voraussetzungen, die Konzepte, Arbeits- und Auswertungsstrategien für »Ökologische Begleituntersuchungen« dargestellt.

### 3. Konzept der »Ökologischen Begleituntersuchungen« von denkmalpflegerischen Erosionssicherungsmaßnahmen in der Flachwasserzone des Bodensees

Im Rahmen einer Vorstudie wurden zunächst in einer Übersicht die grundlegenden Strukturen einer UVP sowie die Anforderungen an den ökologischen Teil einer Umweltverträglichkeitsstudie [DE] (UV-Erklärung [AT], UVP-Bericht [CH]) in Österreich, Deutschland und der Schweiz herausgearbeitet (Ostendorp et al. 2008a). Die UVP kann auch eine naturschutzrechtliche Eingriffsregelung [CH, DE] innerhalb und außerhalb von nationalen Schutzgebieten und/oder eine

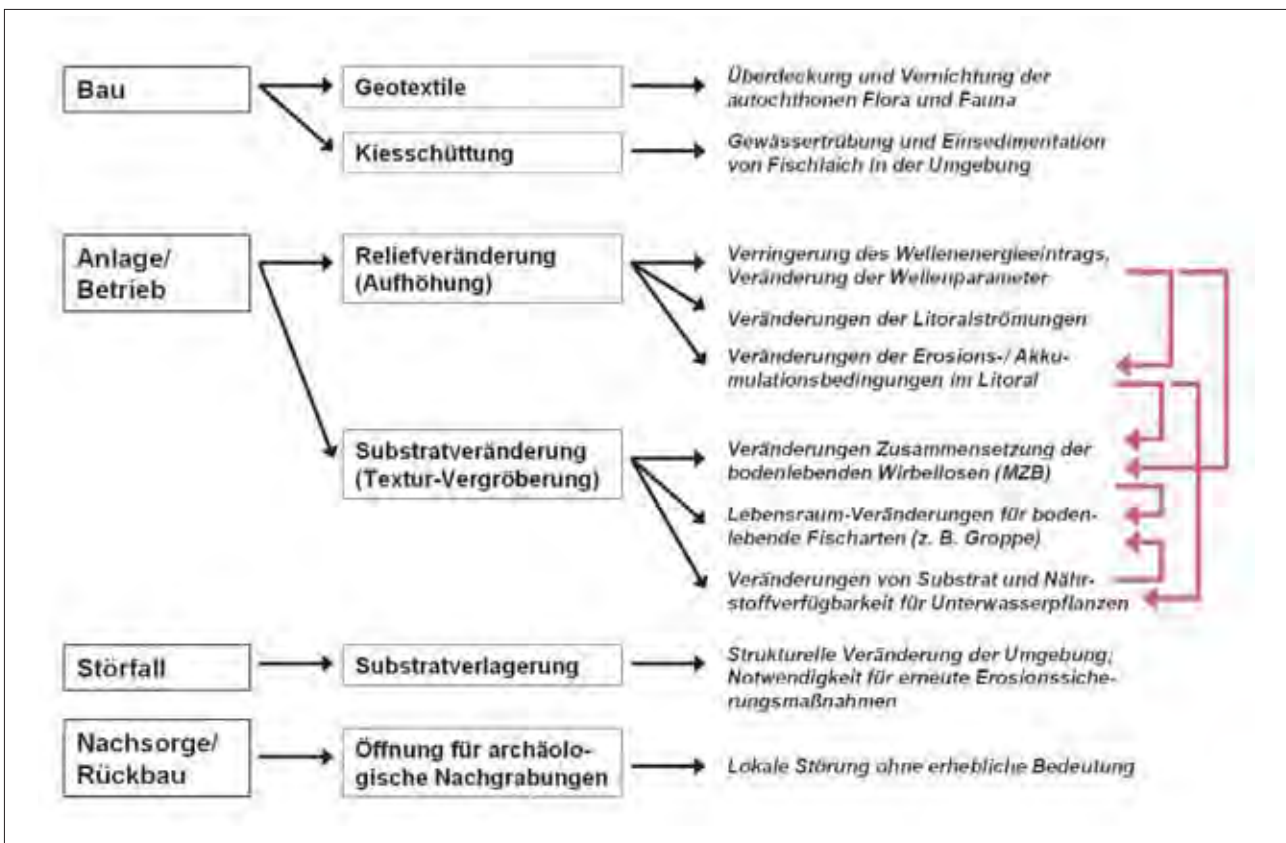


Abb. 2: Verknüpfungsschema für Erosionssicherungsmaßnahmen für Unterwasserdenkmale am Bodensee; einige wichtige Wechselwirkungen sind mit Pfeilen dargestellt (Stand 2008).

		Schutzgüter										
		Boden, Sedimente	Wasser, Gewässer	Luft	Klima	Pflanzen	Tiere	Biologische Vielfalt	Menschen	Kulturgüter	Sonstige Sachgüter	Landschaft
Vorhabenselemente	<b>Errichtung</b>											
	• Bootsverkehr	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	• Taucharbeiten	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	• Einbringen Geotextile u.a.	⊙	○	○	○	●	●	●	○	○	○	○
	• Abschütten des Materials	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○
	<b>Anlage</b>											
	• Geotextile, Baustahlmatten	●	⊙	○	○	⊙	⊙	○	⊙	⊙	○	○
	• Materialbedeckung	●	●	○	○	●	●	●	○	⊙	○	○
	<b>Funktionsstörung</b>											
	• bei Sturm, Seegang	⊙	○	○	○	⊙	⊙	⊙	○	○	○	○
	<b>Nachsorge</b>											
	• Nachbesserungen (Stabilität)	○	○	○	○	⊙	⊙	○	○	○	○	○
	• bei archäol. Nachgrabungen	⊙	○	○	○	⊙	⊙	⊙	○	⊙	○	○

Tab. 1: Relevanzmatrix für Vorhaben der Erosionssicherung für Unterwasserdenkmale; ○ – voraussichtlich keine entscheidungsrelevanten, ⊙ – möglicherweise entscheidungsrelevante, ● – entscheidungsrelevante Auswirkungen (Stand 2008).

FFH-Verträglichkeitsprüfung [AT, DE] enthalten, wenn ein NATURA 2000-Gebiet betroffen ist (Abb. 1). Darauf aufbauend wurde eine grenzübergreifende Konzeption vorgelegt, die als Scoping-Grundlage für die Genehmigungsverfahren und für die Ergebnissicherung der denkmalpflegerischen Erosionsschutz- sowie vergleichbarer wasserbaulicher Maßnahmen herangezogen werden kann. Die ÖBU genügen von Inhalt, Umfang und Bearbeitungstiefe her den Anforderungen an den ökologischen Teil von Umweltverträglichkeitsstudien (UVS), unabhängig davon, ob eine UVP tatsächlich gefordert ist oder nicht. Zweck der UVP ist – im Sinne des Umweltvorsorgeprinzips – eine Sektoren und Umweltmedien übergreifende Einschätzung der (nachteiligen) Umweltfolgen mit dem Ziel ihrer Verminderung. Die konzeptionelle Überlappung von ÖBU und UVS betrifft u.a.

- die Auswahl der Schutzgüter;
- die Anwendung allgemein anerkannter Untersuchungsverfahren, soweit diese zielführend sind, anderenfalls ist zu begründen, warum davon abgewichen wird;
- die Generierung entscheidungsrelevanter Ergebnisse;
- die Verbindung der Ergebnisse mit statistisch ermittelten Aussagewahrscheinlichkeiten (Prognose);
- die Verwirklichung eines internen Qualitätsmanagements.

Die ÖBU gehen aber sachlich und zeitlich über diesen Rahmen hinaus, denn sie sollen nicht nur eine Prognose

über die mit gewisser Wahrscheinlichkeit anzunehmenden erheblichen Auswirkungen auf die ausgewählten Schutzgüter machen, sondern auch nachweisen, ob diese Auswirkungen tatsächlich eingetreten sind (Wirkungskontrolle). Letztendliches Ziel ist die qualitative Verbesserung zukünftiger Planungen von wasserbaulichen Vorhaben wie beispielsweise der Erosionssicherung von Unterwasserdenkmälern in der Flachwasserzone von Seen.

### 3.1. Auswahl der Schutzgüter

Grundsätzlich müssen gemäß dem umweltmedienübergreifenden Ansatz der UVP-RL die Auswirkungen auf alle Schutzgüter berücksichtigt werden. Um daraus die entscheidungserheblichen Informationen herauszufiltern, werden zunächst Wirkfaktoren dargestellt, die sich aus den spezifischen Eigenschaften der Vorhabenselemente im Zusammenspiel mit der Naturraumsituation bzw. den Schutzgütern ergeben (Abb. 2).

Die Wirkfaktoren führen zu Auswirkungen auf bestimmte Schutzgüter (Ursache-Wirkungsgefüge). Dabei können diejenigen Schutzgüter, die mit großer Wahrscheinlichkeit nicht erheblich betroffen sind, vom weiteren Fortgang der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen (UVU) ausgeschlossen werden. Das Ergebnis dieser Betrachtungen sind Wirkungsschemata [CH] bzw. Verknüpfungsschemata [DE] und eine Relevanzmatrix [AT, CH, DE] (Tab. 1).

Auf der Grundlage der vorgelegten – und später umgesetzten – Planungen empfehlen wir die Berücksichtigung der folgenden Schutzgüter (vgl. auch Ostendorp et al. 2008a):

- I Bauphase (beim Einbau der Erosionsschutzabdeckung):
  - Makrophytobenthos, Fische: Dokumentation der Intensität, der Ausdehnung und der Dauer der Gewässertrübung beim Abschütten des Kieses sowie der Ablagerung der Trübstoffe auf den Organen submerser Wasserpflanzen und auf Fischlaich (sofern zur betreffenden Jahreszeit vorhanden) in der näheren und weiteren Umgebung der Testflächen;
- II Betriebsphase (während der bestimmungsgemäßen Funktion der Erosionsschutzabdeckung):
  - a) Gewässer: Veränderungen der Wellenparameter und der Litoralströmungen in Abhängigkeit vom Windfeld und vom Wasserstand;
  - b) Gewässersohle: Veränderungen des Reliefs durch die Schüttungen sowie durch nachfolgende Umlagerungsprozesse, Untersuchung von Indikatoren für die Feststoffdynamik (Suspensionstransport und Sohltransport);
  - c) Sedimente: Veränderung des Korngrößenspektrums, der Porosität und des Gehalts an organischer Substanz der Sedimentoberschicht aufgrund der Schüttung und der nachfolgenden Prozesse;
  - d) Biotoptypen: Veränderung der flächenmäßigen Ausdehnung der Biotoptypen auf der Basis eines akzeptierten Biotoptypenkatalogs;
  - e) Makrophytobenthos: Artenzusammensetzung, Abundanz der einzelnen Arten, räumliche Verteilung der Arten bzw. der Vegetationseinheiten sowie Phytomasse;
  - f) Makrozoobenthos: taxonomische Zusammensetzung (auffällige, gut bestimmbare Gruppen), Individuendichte der höheren Taxa (Familie, Ordnung);
  - g) Fischfauna: Artenzusammensetzung, relative Abundanz, Altersklassenzusammensetzung;
  - h) biologische Vielfalt (Biotoptypen, Makrophytobenthos, Makrozoobenthos, Fische): als Auswertungsschritt der o.g. Untersuchungen;
  - i) naturschutz- und gewässerschutzfachliche Bedeutung (Biotoptypen, Makrophytobenthos, Makrozoobenthos, Fische): als Auswertungsschritt der o.g. Untersuchungen.

Die Schutzgüter »Wechselwirkungen« und »Eigendynamik« können auf der Basis des gewonnenen Datenmaterials und der Literatur verbal-argumentativ dargestellt werden; Prognosen über die ökologischen Auswirkungen beim Versagen der Bauwerke (z.B. schwerer Sturm, Seegang) sowie bei »Störungen« (Öffnung im Zuge archäologischer Nachgrabungen) sind nicht vorgesehen.

### 3.2. Untersuchungsprogramm und Probennahmeplan

Das vorgeschlagene Untersuchungsprogramm soll mit Hilfe allgemein anerkannter sowie speziell für den vorliegenden Zweck weiterentwickelter Methoden möglichst zuverlässige und entscheidungsrelevante Daten an mehreren Bauvarianten erarbeiten. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf

den Planungssperimeter, also auf den unmittelbaren Bereich der Schüttungen; die zusätzliche Berücksichtigung des Wirkungssperimeters erschien zu aufwändig und zu wenig entscheidungsrelevant. Als Beurteilungsbasis dient der Vergleich der Testfläche mit einer bzgl. Relief, Substrat, Wassertiefe, Exposition, Flächengröße u.a. ähnlichen, weitgehend naturbelassenen Referenzfläche der näheren Umgebung. Beide Flächen werden vor und nach der Durchführung der Maßnahme auf der Testfläche untersucht. Als optimales Zeitfenster der Probenahme kommen die Monate Juni bis August (Makrophyten, Makrozoobenthos) und August bis November (Fische) in Frage. Die Untersuchungen sind so zu gestalten, dass im Nachhinein ein Monitoring unter Verwendung dieser Daten möglich ist, z.B. durch eine lage- und höhenmäßige Einmessung. Als interne qualitätssichernde Maßnahme sind die Arbeitsschritte, Methoden und Kalibrationen, nicht zuletzt auch im Hinblick auf ein künftiges Monitoring, detailliert zu dokumentieren. Bei der Wahl der Mess- und Erhebungsgrößen sind solche zu bevorzugen, die eine flächenbezogene Aussage zulassen (z.B. Anzahl Tiere pro m<sup>2</sup>) und die statistischen Analyseverfahren (Prüfstatistik) zugänglich sind, so dass den Prognosen eine gewisse Eintrittswahrscheinlichkeit beigeordnet werden kann.

### 3.3. Probennahmeplan

Gemäß den obigen Vorgaben wird das Untersuchungsprogramm anhand eines faktoriellen Probennahmeplans umgesetzt, der sich auf die folgenden Faktoren stützt, die gleichzeitig Teil des statistischen Modells sind:

- Faktor »Behandlung«: Testfläche (auf der das Vorhaben durchgeführt wird) vs. Referenzfläche (ohne Einflüsse durch das Vorhaben);
- Faktor »Zeit«: Untersuchungssaison 2008 vor Durchführung des Vorhabens vs. Untersuchungssaison 2010 im zweiten Jahre nach Durchführung des Vorhabens.

Insgesamt werden also vier Untersuchungsblöcke ausgewiesen, die jeweils durch mehrere Stichproben repräsentiert werden. Damit können die Ergebnisse durch varianzanalytische Verfahren ausgewertet und dargestellt werden (Abb. 3).

		Fläche (Behandlung)	
		Testfläche	Referenzfläche
Jahrgang	Vorher (JG2008)	<b>A</b> Testfläche „vorher“	<b>B</b> Referenzfläche „vorher“
	Nachher (JG2010)	<b>C</b> Testfläche „nachher“	<b>D</b> Referenzfläche „nachher“

Abb. 3: Probennahmeplan mit Testfläche und Referenzfläche zur Schätzung der interannuellen und räumlichen Effekte.

Die Untersuchungen zur Fischfauna sowie zur Artenzusammensetzung und zur Deckung der Unterwasservegetation werden auf der gesamten Fläche durchgeführt. Die Proben für die Analyse der Sedimente, der Phytomasse und des Makrozoobenthos werden entsprechend dem vorher erarbeiteten Konzept an jeweils den gleichen Positionen entnommen, so dass die Einzelergebnisse aufeinander bezo-

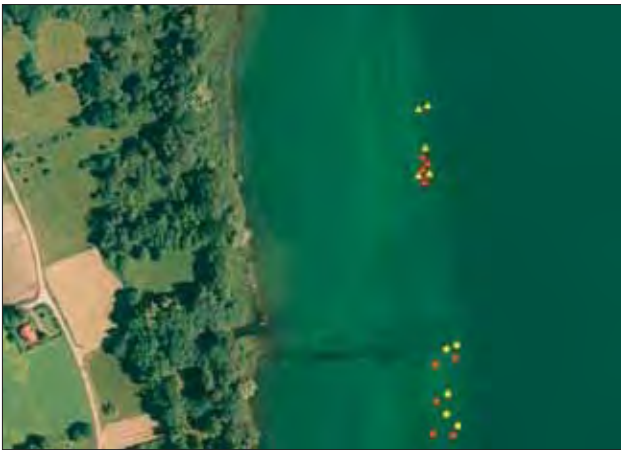


Abb. 4: Lage der Probennahmepunkte der »Ökologischen Begleituntersuchungen« (Sediment- und Makrozoobenthos-Proben) in den Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (oben), Sipplingen-Osthafen (Mitte) und Ermatingen-Westerfeld (unten); Dreiecke – Testflächen, Punkte – Referenzflächen; gelb – 2008, rot – 2010.

gen werden können. Hierbei kommen Forschungstaucher zum Einsatz. Trotz des höheren Personalaufwands darf mit arbeitspraktischen Vorteilen gerechnet werden, die letztlich der Zuverlässigkeit der Daten zugutekommen (z.B. Vermeidung von nicht repräsentativen Probennahmepositionen bzw. von gestörten Proben).

Auf die Einzelheiten der Probennahme, der Probenaufbereitung, der Analysemethoden, des Datenflusses und der Auswertung und Darstellung der Ergebnisse kann hier nicht näher eingegangen werden (vgl. Ostendorf et al. 2008a).

## 4. Umsetzung der »Ökologischen Begleituntersuchungen«

### 4.1. Untersuchungsgebiete

Das in Kap. 3 dargelegte Konzept der »Ökologischen Begleituntersuchungen« wurde in den Unterwasserdenkmal-Stationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen umgesetzt, die beide in der UNESCO-Welterbe-Liste »Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen« verzeichnet sind (Abb. 4). Hinzu kam die am schweizerischen Ufer des Untersees gelegene Station Ermatingen-Westerfeld.

Die Station Sipplingen-Osthafen liegt vor dem Ortskern von Sipplingen. Sie ist wegen dem in den 1970er Jahren mitten in der Station gebauten Hafen und ihrer über weite Strecken frei an der Oberfläche liegenden Kulturschichten einer der großen denkmalpflegerischen Problemfälle am Bodensee (Brem et al. 2013). Dagegen befindet sich die Station Litzelstetten-Krähenhorn vor einem vom Menschen wenig beeinträchtigten Schilfufer. Die Kulturschichten liegen hier vielfach unter einem Sandschleier und in Seekreiden eingebettet, Erosion greift vor allem in den im Winter trocknen fallenden Arealen.

Beide Stationen liegen in einem NATURA 2000-Schutzgebiet: Sipplingen-Osthafen im FFH-Gebiet 8220342 »Überlinger See und Bodenseeuferslandschaft« und SPA-Gebiet 8220402 »Überlinger See des Bodensees«, Litzelstetten-Krähenhorn im SPA-Gebiet 8220404 »Überlinger See des Bodensees« und im FFH-Gebiet 8220341 »Bodanrück und westlicher Bodensee«. Landseits grenzt das NSG »Bodenseeufer (Konstanz)«, Nr. 3.058 an. Beide Gebiete sind überdies »besonders geschützte Biotope« nach § 32 NatSchG Baden-Württemberg. (Anhang, Ziff. 2.3 »naturnahen Bereiche der Flachwasserzone des Bodensees«). Zu den Schutzgütern des FFH-Gebietes gehört auch der Lebensraumtyp 3140 »Oligo- bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer mit benthischer Vegetation aus Armeleuchteralgen«. Für beide FFH-Flächen werden derzeit (2009–2012) Managementpläne erarbeitet. Die Uferzonenabschnitte, in denen die beiden Stationen liegen, sind nach den »Bodenseeufersplänen« der Regionalverbände Bodensee-Oberschwaben und Hochrhein-Bodensee als »Flachwasserschutzzone II« (mit Bodendenkmalen) ausgewiesen.

Die Station Ermatingen-Westerfeld befindet sich im Bodensee-Untersee am Westrand der Gemeinde Ermatingen vor einem Strandbad und einem Schilfgürtel. Im Unterschied zu den beiden anderen Stationen wurde sie bereits im November und Dezember 1998 mit einer flächigen Kiesschüttung versehen (Brem et al. 2001). Das Areal ist im Zonenplan der Gemeinde Ermatingen als »Zone archäologischer Funde« ausgewiesen. Weitere Schutzbestimmungen sind nicht bekannt. Anlass für die Sicherungsmaßnahme war hier nicht die akute Erosion der Sedimentoberschichten, sondern der beabsichtigte Bau einer Bootssteganlage; bisher wurde die Steganlage aber noch nicht realisiert.

## 4.2. Bauvarianten

Der flächenhaften Erosionsgefahr wurde in allen drei Stationen mit einer Abdeckung der gefährdeten Kulturschichten begegnet. Von der Abdeckung wird erwartet, dass sie die weitere (Litzelstetten-Krähenhorn, Sipplingen-Osthafen) bzw. die evtl. neu hinzukommende (Ermatingen-Westerfeld) Erosion und Ausspülung verhindert, andererseits aber die Kulturschichten nicht beschädigt. Hierfür wurden neben anderen die folgenden Varianten umgesetzt (Brem et al. 2001; Königer/Schlichtherle 2013):

- Litzelstetten-Krähenhorn: Abdeckung mit Kies und Geröll (Korngrößengemische aus 8/16 mm und 32/x mm Rundkorn) mit einer Mächtigkeit von 0,20 bis 0,25 m in einer Vollfläche von 905 m<sup>2</sup>; die Bekiesung der Fläche konnte im Oktober 2009 nicht ganz abgeschlossen werden und wurde in 2010 zu 1.240 m<sup>2</sup> Fläche ergänzt.
- Sipplingen-Osthafen: Anlage von »Sedimentationswaben« aus ca. 5 bis 6 m breiten Schüttungsriegeln mit ca. 5 × 5 bzw. 15 × 15 m großen Innenflächen im Oktober 2009. Die Riegel aus den gleichen Korngrößengemischen wie in Sipplingen-Osthafen haben eine Mächtigkeit von 0,20 bis 0,32 m und schließen eine Fläche von 1.830 m<sup>2</sup> ein. Die Wabeninnenflächen blieben unbeeinflusst. Es wird erwartet, dass sich hier auf natürliche Weise Feinsedimente ablagern.

- Ermatingen-Westerfeld: Abdeckung einer ca. 75 × 20 m großen Fläche mit untergelegtem Geotextil, das mit Stahlmatten beschwert wurde, und einer etwa 0,1 bis 0,2 m mächtigen Kiesschüttung aus gewaschenem Kies (8 bis 16 mm) im November und Dezember 1998. Das Kiesmaterial wurde von Land mit Druckluft über eine schwimmende Rohrleitung von etwa 100 m Länge bis zur Schüttungsposition gepumpt. Durch kontrolliertes Verschieben der Öffnung der Rohrleitung wurde eine gleichmäßige Schüttung erreicht. Größere Unebenheiten wurden von Tauchern mit Schaufeln eingeebnet.

## 4.3. Probennahmeplan und Arbeitsmethoden

In allen drei Stationen wurden gemäß den Vorgaben (vgl. Kap. 3.3) je eine Testfläche (TEST) und eine Referenzfläche (REF) ausgewiesen. Innerhalb jeder Fläche wurden 5 oder 6 (Sedimente, Makrozoobenthos) bzw. bis zu 15 Stichproben (Makrophyten) entnommen. Lediglich die Befischung erfolgte auf andere Weise, so dass hier jeweils nur ein Stichprobenwert vorliegt.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen durch einen Vergleich der Mittelwerte der einzelnen Mess- und Erhebungsgrößen von Referenzfläche und Testfläche vor (JG2008) und nach der Schüttung (JG2010). In Ermatingen-Westerfeld

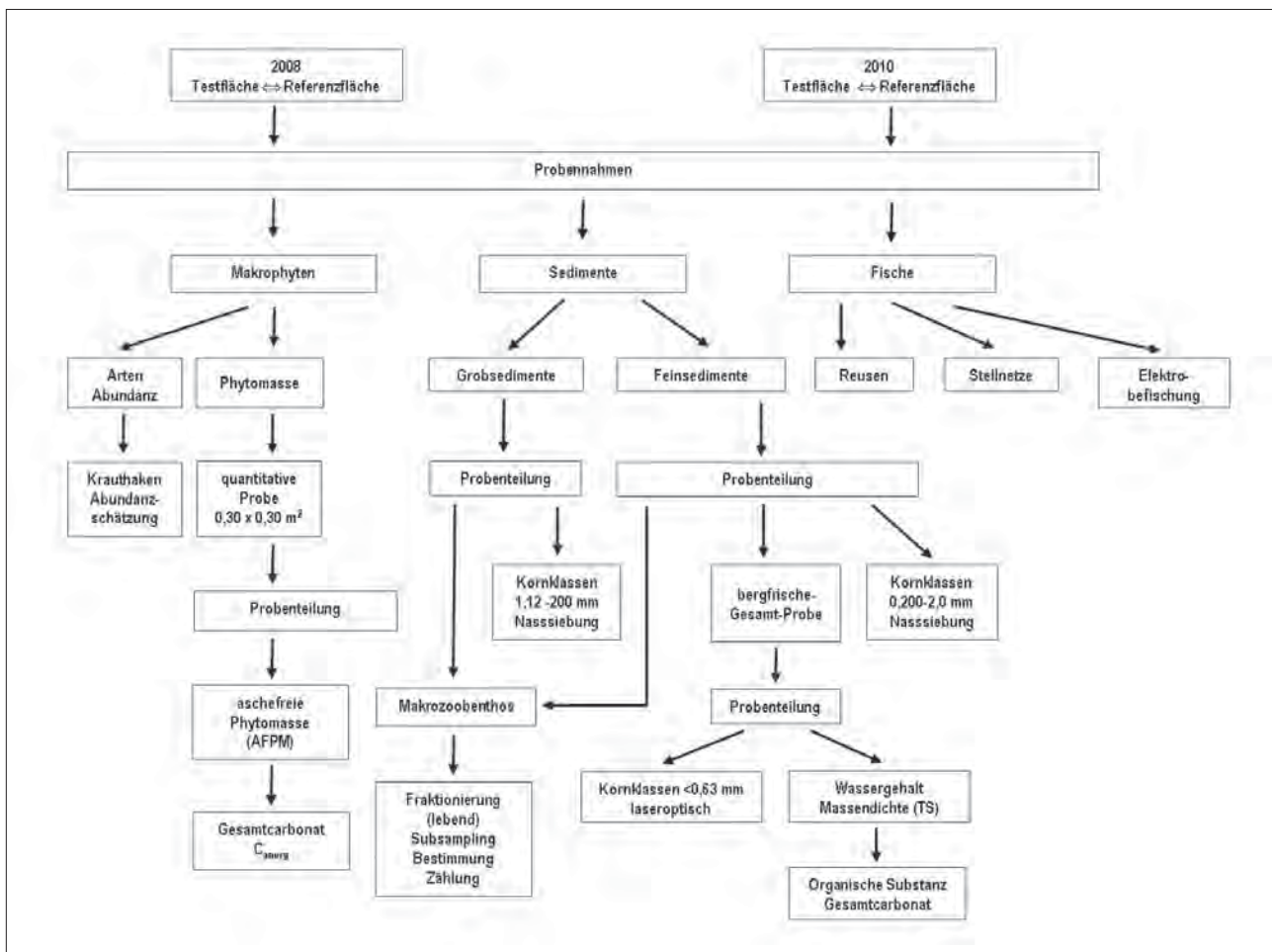


Abb. 5: Übersicht des Probennahmeplans sowie der wichtigsten Probennahme-, Aufarbeitungs- und Auswertungsschritte.

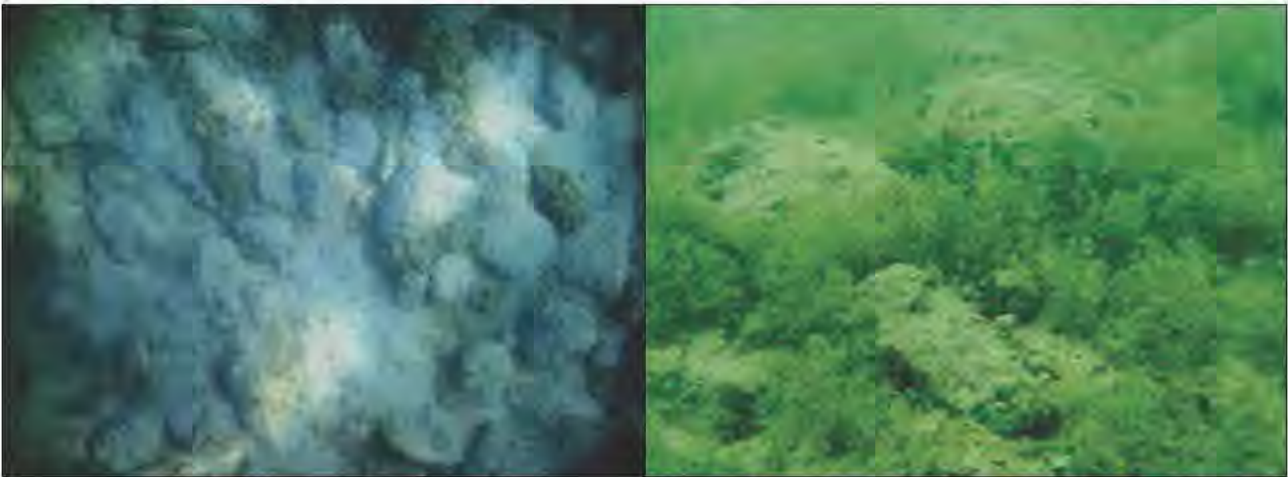


Abb. 6: Station Litzelstetten-Krähenhorn, Testfläche am 27.08.2008 (links): Geröll-Auflage in der Sedimentoberfläche. Man erkennt deutlich, dass die Gerölle über die Sedimentoberfläche hinausragen. – Station Sipplingen-Osthafen, Referenzfläche am 24.7.2010 (rechts) mit kleinwüchsiger Armeleuchteralgen-Vegetation auf dem Feinsediment, dazwischen Gesteinstrümmer, die mit einem Sedimentschleier bedeckt sind, vereinzelt sind eingesedimentierte Dreikantmuscheln zu erkennen (Foto: M. Wendlberger).

wurden seinerzeit keine vergleichbaren Voruntersuchungen durchgeführt, so dass sich die Auswertung auf den Vergleich von TEST und REF von 2010 beschränkt. Da mit Ausnahme der fischbiologischen Untersuchungen mehrere Stichproben je Fläche vorliegen, können auch die Variabilität berechnet und Signifikanztests durchgeführt werden.

In Sipplingen-Osthafen teilte sich die Testfläche (»Sedimentationswabe«) in die Schüttungsriegel (CONT) und in die unbeeinflussten Wabeninnenflächen (WIF) auf. In Litzelstetten-Krähenhorn und in Ermatingen-Westerfeld bestanden die Testflächen nur aus der flächigen Kiesüberdeckung. Die Test- und Referenzflächen von Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen wurden vom 24. bis 26.07.2008 (Voruntersuchung) sowie am 22. und 24.07.2010 (Nachuntersuchungen) untersucht (Sedimente, Makrophyten, Makrozoobenthos), die fischereibiologischen Untersuchungen folgten am 25. bis 29.08.2008 bzw. am 04. bis 06.08.2010. Die Erhebungen und Probenahmen in Ermatingen-Westerfeld fanden am 14.07. (Makrophyten) und am 23.07.2010 (Sedimente, Makrozoobenthos) statt. Die fischfaunistischen Untersuchungen wurden mit Rücksicht auf den Badebetrieb des nahe gelegenen Strandbades erst am 01. September 2010 durchgeführt.

Die Arbeitstechniken orientierten sich allgemein an den Vorgaben der ÖBU-Konzeption (vgl. Kap. 3 und Ostendorp et al. 2008a). Da die grobe Textur des Schüttungsmaterials in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen keine ungestörte Probenahme erwarten ließ, wurden anlässlich der Schüttungsarbeiten Container (0,35 × 0,26 × 0,14 m, L × B × H) in den Schüttungskörper eingesetzt, die vorher mit originalem Schüttungsmaterial gefüllt worden waren (Ostendorp 2013). Sedimentologische sowie Makrozoobenthos-Analysen (MZB) der Testflächen wurden anhand der Container-Inhalte durchgeführt (CONT). Alle Arbeitsschritte sind in den Projektberichten detailliert dokumentiert (Abb. 5; Ostendorp et al. 2010; 2011).

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Substrate

Im Ausgangszustand bestanden die Oberflächensedimente in den Stationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen aus einer fein- bis mittelsandigen Matrix (0,063 bis 0,63 mm Äquivalentdurchmesser) mit einer Auflage aus glazialen Grobkiesen und Geröllen (20 bis 112 mm, Abb. 6a). In Litzelstetten-Krähenhorn wurde die Matrix aus umgelagerten Seekreiden mit entsprechend hohem Gesamt-Carbonatgehalt gebildet, in Sipplingen-Osthafen dagegen aus Zerfalls- und Umlagerungsprodukten der oberflächennah anstehenden Oberen Meeresmolasse (Abb. 6b). Die natürliche Sedimentoberfläche in der Westerfelder Bucht bestand aus feinsandig-siltigen Seekreiden im Korngrößenbereich zwischen etwa 0,006 mm und 0,2 mm.

Eine lockere einlagige Schicht aus glazialen Schottern (Residualsediment, »Geröllpflaster«) auf der Sedimentoberfläche tritt wie in Litzelstetten-Krähenhorn auch an zahlreichen anderen Uferabschnitten des westlichen Bodensees auf. Ihre Entstehungsweise ist noch nicht geklärt. In Sipplingen-Osthafen wurde das Grobmaterial dagegen überwiegend aus kantigen Molassefels-Bruchstücken sowie aus Gesteinsbruchstücken (Hitzeesteine u.a.) der oberflächlich frei liegenden Kulturschichten gebildet. In der Westerfelder Bucht (Ermatingen-Westerfeld) wurden keine natürlichen Geröllauflagen angetroffen.

Die sedimentchemischen Ergebnisse waren unauffällig und entsprachen den Verhältnissen an den betreffenden Uferabschnitten. Die Massenanteile der organischen Substanz (OS) waren mit durchschnittlich 10 bis 30 mg/g niedrig. Sie ließen erkennen, dass es zu keiner Akkumulation von OS kommt, was mit dem Bild tendenziell erosionsgefährdeter Uferabschnitte übereinstimmt. Die Gesamt-Carbonat-Massenanteile (GC) der Station Litzelstetten-Krähenhorn waren mit 6,12 bis 6,80 mmol/g mehr als doppelt so hoch wie in Sipplingen-Osthafen (2,79 bis 3,39 mmol/g). In Ermatingen-Westerfeld lagen die Massenanteile mit 5,97 mmol/g



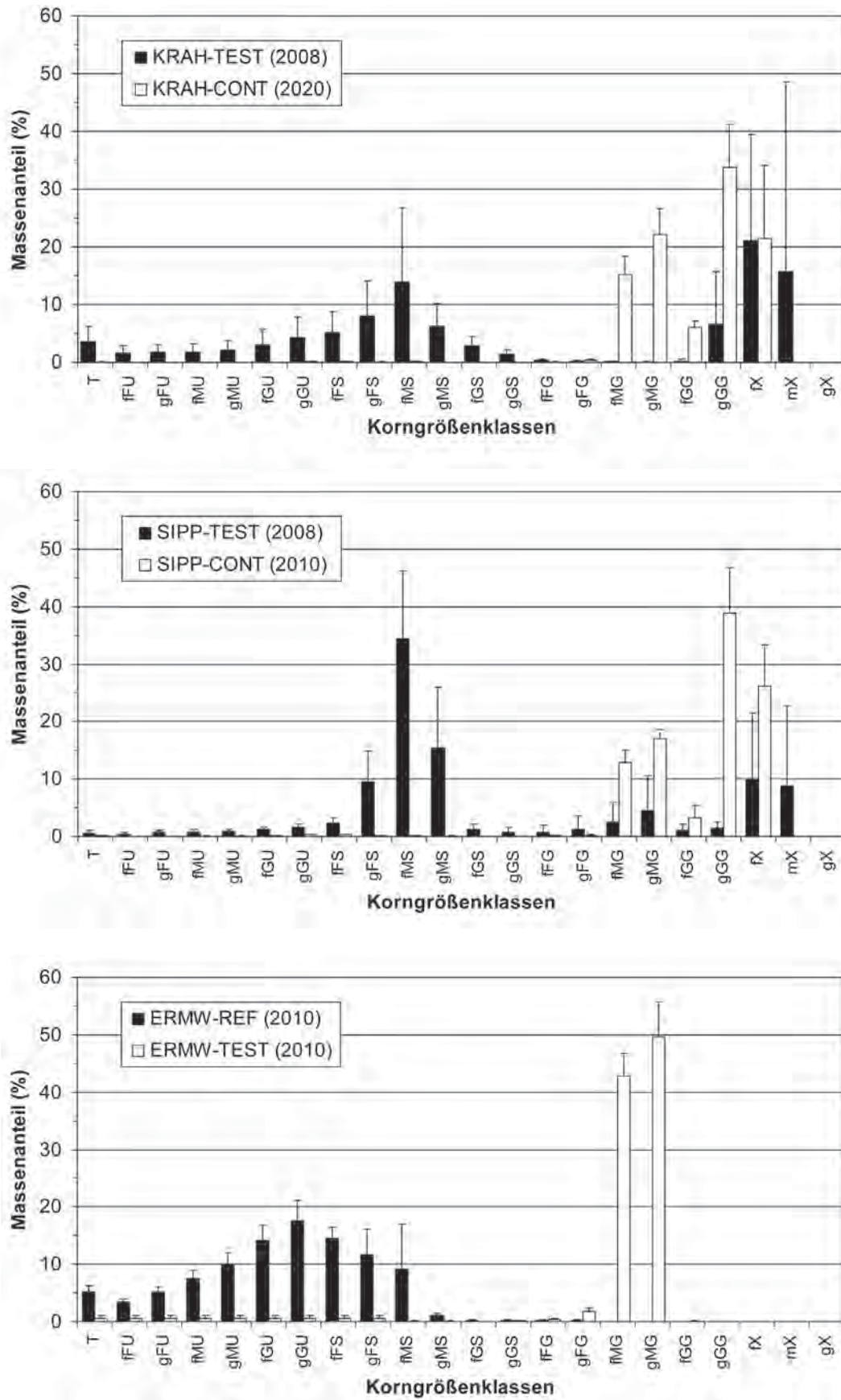


Abb. 7: Korngrößenklassen-Verteilung der Oberflächensedimente (0 bis 35 mm Tiefe) in den Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH), Sipplingen-Osthafen (SIPP) und Ermatingen-Westerfeld (ERMW); für Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen sind die Massenanteile der Testflächen vor (TEST 2008) und nach der Abdeckung (CONT 2010) dargestellt, für Ermatingen-Westerfeld die einer nahe gelegenen Referenzfläche (REF 2010); Bezeichnung der Korngrößenklassen n. Ostendorf/Blum 1998, Tab. 6a und 6b in Anlehnung an DIN 4022 bzw. der EN ISO 14688 und EN ISO 14689-1.

nur wenig unter denen von Litzelstetten-Krähenhorn. Diese Befunde stimmen mit den bei Müller 1967 wiedergegebenen Verteilungskarten der Sedimentfazies überein. Am südwestlichen Ufer des Überlinger Sees hat also ebenso wie in der Westerfelder Bucht zumindest in der Vergangenheit eine intensive Seekreide-Bildung stattgefunden. Demgegenüber waren in der Station Sipplingen die Ablagerungen von biogenen Carbonaten bedeutend geringer, die überdies teilweise aus subrezentem Molluskenschill herrühren. In Sipplingen dürfte die Zusammensetzung der Sedimente in früheren Jahrhunderten durch Hangprozesse (Schichtfluten, Rutschungen) und Delta-Sedimentation bestimmt worden sein, die die kalkärmeren Molasse-Bestandteile in die Uferzone gebracht haben.

Der Schüttungskörper, dessen Material aus Kiesgruben im Bodenseegebiet stammt, setzte sich aus gewaschenen glazialen Kiesen und Geröllen der Korngrößenklassen 6,3 bis 20 mm und 35 bis 112 mm (Litzelstetten-Krähenhorn, Sipplingen-Osthafen) bzw. 6,3 bis 20 mm (Ermatingen-Westerfeld) zusammen (Abb. 7). Die Sand- und Silt-Anteile waren verschwindend gering. Bedingt durch das weitgehende Fehlen von Feinsediment waren auch die flächenbezogenen Konzentrationen an organischer Substanz und Gesamt-Carbonat bedeutend geringer als auf den naturbelassenen Referenzflächen.

Durch die Aufbringung einer ca. 0,1 bis 0,3 m mächtigen Schüttung aus Kiesen und Geröllen wurde also das vormals vorhandene Substrat erheblich verändert. Diese Veränderungen betreffen die Textur sowie sedimentchemische Eigenschaften, außerdem das Relief, das hier nicht untersucht wurde (vgl. Köninger/Schlichtherle 2013).

## 5.2. Wasserbauliche Stabilität (Funktionskontrolle)

Das Schüttungsmaterial wurde in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen mit Hilfe eines speziell konstruierten Pontons aus etwa 1 bis 1,5 m Höhe im freien Fall durch die Wassersäule gleichmäßig aufgebracht (Köninger/Schlichtherle 2013). Das zunächst noch lockere und homo-

gene Kies-/Geröll-Gemisch hat sich innerhalb der neunmonatigen Beobachtungszeit leicht entmischt, wobei die Mittelkiese in den Porenraum gerutscht sind, so dass an der Oberfläche die Gerölle und Grobkiese zu Tage lagen (vgl. Ostendorp 2013). Im Übrigen verhielten sich die Schüttungskörper im Beobachtungszeitraum wasserbaulich stabil, d.h. es kam zu keiner Umlagerung bzw. Verlagerung des Grobmaterials in die Umgebung. Wir gehen davon aus, dass die Schüttungen auch in den kommenden Jahrzehnten ihren Zweck erfüllen werden.

Zwischenzeitlich trat eine gewisse Kolmation des Schüttungskörpers durch den Eintrag von Suspensionsfracht im Kornklassenbereich Ton (T, <0,002 mm) bis feiner Mittelsand (fMS, 0,200-0,355 mm) ein. Die Messungen an den Container-Proben ergaben eine hochgerechnete Sedimentationsrate von 2,99 kg TS/m<sup>2</sup> in der westexponierten Station Sipplingen und 1,86 kg TS/m<sup>2</sup> in der ostexponierten Station Krähenhorn innerhalb von rund 9 Monaten (Ostendorp 2013). Es ist zu erwarten, dass die Kolmation in den nächsten Jahren voranschreitet, so dass die grobporigen Hohlräume des Schüttungskörpers schrittweise mit Feinsediment gefüllt werden. Das in den Containern abgelagerte Feinmaterial stammte aus Molluskenschill (Schnecken- und Dreikantmuschelschalen) und den kalkreichen Überzügen der Armelecheralgen, deren Reste offenbar einem fortwährenden Zerfall unterliegen. Die Bioproduktion (Makrophyten, Mollusken) dürfte also einen erheblichen Anteil an der Sedimentbildung und am Feststoffhaushalt der Flachwasserzone des Bodensees haben.

Auch die Schüttung in Ermatingen-Westerfeld hat sich innerhalb ihrer knapp zwölfjährigen Existenz im Wesentlichen als stabil erwiesen. So wurden nach eigenen Beobachtungen keinerlei Kiese in die nur wenig weiter stromabwärts gelegene Referenzfläche verdriftet. Allerdings wurde auf der Testfläche ein unruhiges Relief aus unregelmäßigen Hügeln oder Rücken und daneben liegenden Vertiefungen angetroffen, wobei letztere bis auf das Baustahlgewebe bzw. das Geotextil hinunter reichten (Abb. 8).



Abb. 8: Station Ermatingen-Westerfeld: links – vegetationsbedeckte Referenzfläche; rechts – Testfläche mit fleckhafter Armelecheralgen-Vegetation und unruhigem Relief mit freiliegender Baustahlmatte und Geotextil (Fotos 14.07.2010).



Abb. 9: Singschwäne (*Cygnus cygnus*) am Bodensee-Untersee (Allensbach) bei der Nahrungsaufnahme: links – Schwan mit Armelechtermalgen im Schnabel, rechts – Altvogel und Jungtier beim Gründeln (Fotos: M. Granitza, 09.01.2011).

Eine Entstehung durch Wellen bzw. Strömungen ist sehr unwahrscheinlich. Vielmehr muss angenommen werden, dass gründelnde Schwäne auf der Nahrungssuche das Kiesmaterial mit dem Schnabel aufgenommen und umgelagert haben. Im Ermatinger Becken halten sich ganzjährig etwa 500 bis 1.000 Höckerschwäne auf, die im seichten Wasser nach unterirdischen Turionen (vegetative Vermehrungskörper) und Rhizomen von Laichkraut-Arten suchen; im Winter kommen etwa 100 Singschwäne hinzu (S. Werner, mdl. Mitt.). Auch Armelechtermalgenrasen bzw. das darin befindliche Makrozoobenthos werden gefressen. Dabei erzeugen die Schwäne ovale Löcher von rund 0,3 m Durchmesser und bis zu 0,2 m Tiefe. Die Tiere können mit ihrem langen Hals Wassertiefen von rund einem Meter erreichen (Abb. 9). Das Schüttungssubstrat in Ermatingen-Westerfeld liegt in einer Tiefe von etwa 1,1 m unter mMW, so dass die Fläche im Frühling und Spätsommer sowie im Winterhalbjahr als Nahrungsraum zur Verfügung steht. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass auf der dicht bewachsenen Referenzfläche keine Beweidungsspuren oder gar bis zum Sediment reichende »Löcher« in der Vegetationsdecke be-

obachtet wurden. Offenbar stellten die Kiese der Testfläche eine bessere oder leichter zu nutzende Nahrungsquelle dar. Die Wühl- und Fraßaktivitäten der Schwäne haben auch dazu geführt, dass der Kolmationsprozess immer wieder unterbrochen wurde und von neuem beginnen musste. Anlässlich der Probenahmen im Juli 2010 lag der Feinsedimentanteil (T+U+S) bei  $5,5 \pm 4,5$  % (Mittelwert  $\pm$  einf. Standardabweichung,  $n = 5$ ) und damit nicht wesentlich höher als bei den erst einjährigen Schüttungen in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen (1 % bzw. 2 %). Ein »Alterungseffekt« war demnach nicht festzustellen.

### 5.3. Unterwasservegetation und Phytomasse

Die Referenzflächen der untersuchten Stationen waren 2008 und 2010 mit teils dichten Unterwasserrasen bedeckt (Tab. 2). In Sipplingen-Osthafen betrug die mittlere Gesamtdeckung 90 % und mehr, in Ermatingen-Westerfeld 100 %. In Sipplingen-Osthafen dominierten Armelechtermalgen, v.a. *Chara aspera*, in Ermatingen-Westerfeld traten neben *Chara contraria* auch Laichkräuter, v.a. *Potamogeton pectinatus* auf (Abb. 8 und 10 links). In Litzelstetten-Krähenhorn wurden



Abb. 10: links – Krauthaken mit Armelechtermalgen (*Chara aspera*) vor Sipplingen-Osthafen (25.07.2008); rechts – dünner Schleier aus niedrigwüchsigen Armelechtermalgen in Litzelstetten-Krähenhorn (26.08.2008).

		KRAH		SIPP			ERMW	
		TEST	REF	TEST	WIF	REF	TEST	REF
mittl. Artenzahl	2008	1,7	1,7	1,9		1,4	n. b.	n. b.
	2010	0	2,6	0	1,7	1,5	1,6	2,4
mittlere Deckung (%)	2008	3	2	98		90	n. b.	n. b.
	2010	0	22	0	80	60	19	100
<i>Chara aspera</i> (BW: 2 [a]; CH: NT [c])	2008	1,2	0,7	4,9		4,8	n. b.	n. b.
	2010	0,0	2,0	0	4,4	4,0	2,6	0,1
<i>Chara contraria</i> (BW: 3 [a]; CH: - [c])	2008	2,8	2,6	0,9		0,5	n. b.	n. b.
	2010	0,0	2,1	0	0,7	0,2	0,3	5,0
<i>Chara globularis</i> (BW: - [a]; CH: VU [c])	2008	0,1	0,0	0,1		0,0	n. b.	n. b.
	2010	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Chara tomentosa</i> (BW: 1 [a]; CH: EN [c])	2008	0,0	0,0	0,0		0,0	n. b.	n. b.
	2010	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
<i>Nitellopsis obtusa</i> (BW: 3 [a]; CH: - [c])	2008	0,0	0,2	0,0		0,0	n. b.	n. b.
	2010	0,0	0,2	0,0	0,0		0,2	0,0
<i>Potamogeton pectinatus</i> (BW: - [b]; CH: - [c])	2008	0,0	0,4	0,0		0,0	n. b.	n. b.
	2010	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	3,2
<i>Potamogeton pusillus</i> (BW: - [b]; CH: VU [c])	2008	0,0	0,0	0,0		0,0	n. b.	n. b.
	2010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
<i>Potamogeton perfoliatus</i> (BW: - [b]; CH: - [c])	2008	0,0	0,0	0,0		0,0	n. b.	n. b.
	2010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
<i>Potamogeton trichoides</i> (BW: - [b]; CH: CR [c])	2008	0,0	0,0	0,0		0,0	n. b.	n. b.
	2010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
<i>Najas intermedia</i> (BW: V [b]; CH: VU [c])	2008	0,0	0,0	0,1		0,1	n. b.	n. b.
	2010	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 2: Unterwasservegetation in den Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH), Sipplingen-Osthafen (SIPP) und Ermatingen-Westerfeld (ERMW); dargestellt sind mittlere Artenzahlen und mittlere Deckung (%) der Gesamt-Vegetation in 10 bis 14 Proben je Fläche (TEST – Testfläche mit Kies-/Geröllschüttung, REF – unbeeinflusste Referenzfläche, WIF – Innenfläche der Wabenschüttung) sowie Abundanzen der einzelnen Arten (Abundanz: 1 – vereinzelt; 2 – selten; 3 – mehrfach; 4 – häufig; 5 – dominant); in Klammern Rote-Liste-Status Baden-Württemberg: – nicht gefährdet, 1 – vom Aussterben bedroht, 2 – stark gefährdet, 3 – gefährdet, V – Vorwarnliste, [a] – Schmidt u.a. 1996, [b] – Breunig/Demuth 1999; Rote Liste der Schweiz: – nicht gefährdet, NT – potentiell gefährdet, VU – verletzlich, EN – stark gefährdet, CR – vom Aussterben bedroht, [c] – BUWAL 2002.

dagegen nur schütterere Armelechteraigenrasen angetroffen, die eine Gesamt-Deckung von 5 % nicht überschritten (Abb. 10 rechts).

Sechs der gefundenen Arten stehen auf mindestens einer der nationalen Roten Listen, davon vier Armelechteraigen (Tab. 2). Die Unterwasservegetation in Sipplingen-Osthafen und Litzelstetten-Krähenhorn steht als Lebensraumtyp 3140 »Oligo- bis mesotrophe kalkhaltige Gewässer mit benthischer Vegetation aus Armelechteraigen« unter dem Schutz der FFH-RL. Die Unterwasservegetation in Ermatingen-Westerfeld ist in der »Verordnung über den Natur- und Heimatschutz« der Schweiz (erlassen am 16. Juni 1991, Stand am 10.07.2001) als »schützenswerter Lebensraum« (Charion, Armelechteraigenrasen; Potamion Laichkrautgesellschaften) aufgeführt.

Durch die Erosionssicherungsmaßnahmen, die in den drei Stationen jeweils im Winterhalbjahr stattfanden, wurden die Diasporen der Unterwasserpflanzen überschüttet, so dass sie im folgenden Jahr nicht mehr zur Entwicklung kommen konnten. Bei den Armelechteraigen, die auf den Flächen dominierten, handelt es sich um einjährige Arten mit hoher Oosporen-Produktion, so dass mit einer raschen Wiederbesiedlung der Schüttungsfläche gerechnet wurde. Tatsächlich aber hat sich die Unterwasservegetation bei keiner der untersuchten Stationen wieder vollständig hergestellt; die Gründe sind allerdings unterschiedlich.

Auf den Schüttungsflächen der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen fehlten ein knappes Jahr nach ihrer Herstellung die Makrophyten vollständig. Lediglich die Grünalge *Chaetophora incassata* wurde in der Station Litzelstetten-Krähenhorn mehrmals als Aufwuchs auf Steinen gefunden. Der Zeitraum seit der Schüttung im Oktober 2009 genügte also nicht, um eine zumindest geringe Wiederbesiedlung mit Makrophyten einzuleiten. Hintergrund ist wahrscheinlich der grobe Porenraum des Schüttungskörpers in Verbindung mit der geringen Verfüllung mit Feinmaterial (Kolmation; vgl. Kap. 5.1). Die über den Suspensionstransport eingetragenen Oosporen sinken wahrscheinlich durch den Porenraum hindurch in tiefere, sauerstoffarme Schichten des Materials ab.

In Ermatingen-Westerfeld betrug die mittlere Gesamt-Deckung 19 %. Auf dem nährstoffarmen Substrat konnten sich die oligotraphenten Arten *Chara aspera* und *Chara tomentosa* ansiedeln. Zwar hat sich *Chara aspera* in den letzten 20 Jahren infolge der Reoligotrophierung des Sees fast am ganzen südlichen Unterseeufer ausgebreitet, jedoch gibt es im weiteren Untersuchungsgebiet eine kleine Verbreitungslücke. Insofern stellt die Ansiedlungsmöglichkeit auf der Kiesschüttung eine Ausnahmesituation an diesem Uferabschnitt dar. Zur dennoch sehr schütterten Vegetationsbedeckung haben wahrscheinlich zwei Faktoren beigetragen: das für die Makrophytenansiedlung eher ungünstige Kiessubstrat ohne nennenswerten Feinsedimentanteil sowie die Fraß- und Störungstätigkeit der Schwäne. Da die Aktivitäten der Schwäne und ihre unmittelbaren Aus-

wirkungen nicht vor Ort beobachtet werden konnten, fällt es schwer, die beiden Faktoren entsprechend ihrer relativen Bedeutung zu gewichten. Im Vergleich mit den Testflächen in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen deutet sich in Ermatingen-Westerfeld ein »Alterungseffekt« an, der aber ab und an durch die Aktivitäten der Schwäne unterbrochen wird und von neuem beginnen muss.

#### 5.4. Phytomasse

Die Menge an aschefreier Phytomasse der submersen Makrophyten pro Quadratmeter entspricht weitgehend dem Deckungsgrad der Unterwasservegetation, da die Höhe der Vegetation einheitlich bei etwa 0,1 bis 0,2 m lag. So war die Phytomasse auf Litzelstetten-Krähenhorn-REF kaum messbar und lag unter 10 g aschefreie TS/m<sup>2</sup>. Die Station Sipplingen besaß hingegen deutlich dichtere Armelechteraigenrasen, die etwa  $68 \pm 35$  bis  $118 \pm 56$  g/m<sup>2</sup> (2010 bzw. 2008; Mittelwert  $\pm$  einf. Standardabweichung,  $n = 5$  bis 6) erreichten. In Ermatingen-Westerfeld wurden sogar  $210 \pm 43$  g/m<sup>2</sup> ( $n = 5$ ) ermittelt; wahrscheinlich spielt hier die verbesserte Nährstoffversorgung aufgrund der Rheinströmung eine gewisse Rolle.

Auf die völlig fehlende Makrophytenbesiedlung der Schüttungssubstrate wurde bereits hingewiesen. Andererseits lag die Phytomasse in den Wabeninnenflächen von Sipplingen-Osthafen, die funktionell der Erosionssicherungsmaßnahme zugerechnet werden muss, mit  $117 \pm 27$  g aschefreie TS deutlich über dem Referenzwert für 2010.

Die Makrophyten besitzen nicht nur als Lebensraum für Makrozoobenthos und für Fische eine hohe Bedeutung (vgl. Kap. 5.5 und 5.6), sondern auch für die Sedimentbildung und die lokale Feststoffbilanz. Die Gesamt-Carbonatproduktion der Armelechteraigen auf den naturbelassenen Referenzflächen der Station Sipplingen-Osthafen erreichte etwa 0,2 bis 0,3 kg/m<sup>2</sup>/a (Ostendorp 2013) entsprechend einer Sedimentzuwachsrate von etwa einem Millimeter pro Jahr. Die Schüttungsflächen lieferten dagegen einen weitaus geringeren Beitrag, der überdies aus der Produktion von Molluskenschill stammte.

#### 5.5. Makrozoobenthos (MZB)

##### 5.5.1. Einflussfaktoren der MZB-Dichte

Der gesamte Datensatz der MZB-Dichten<sup>3</sup> zeigte Abhängigkeiten von verschiedenen Faktoren, die teils vorher vermutet und daher in den Probennahmeplan integriert worden waren, teils aber auch unbekannt und neu waren:

- i Makrophytenbesiedlung: Die MZB-Individuendichte ( $p_z$ ) war signifikant positiv mit der Phytomasse korreliert. Dieser grundsätzliche Zusammenhang war bereits von anderen Untersuchungen her bekannt und Anlass dafür, dass

3 Da die Individuendichten des MZB ( $z_i$ , Ind./m<sup>2</sup>) typischerweise log-normal verteilt sind, wird in den folgenden Erläuterungen auf die log-transformierten Werte  $p_z = \log(z_i+1)$  zurückgegriffen. Auch die statistische Auswertung stützt sich auf die transformierten Dichten.

	KRAH-REF	SIPP-REF	ERMW-REF
Individuendichte ( $p_z$ )	2008: 4,65 ± 0,29 2010: 4,41 ± 0,16	2008: 4,82 ± 0,16 2010: 4,66 ± 0,16	n. b. 2010: 4,14 ± 0,23
Anteil der Individuen in den Makrophytenrasen (PHYT)	2008: 0 ± 0 % 2010: 8 ± 11 %	2008: 53 ± 26 % 2010: 55 ± 25 %	n. b. 2010: 66 ± 12 %
phytophile Taxa (Anteil im Habitat PHYT)	Isopoda, Asseln: 94 ± 9 %; $p < 0,0001$ ; $n = 15$ Amphipoda, Flohkrebse: 79 ± 22 %; $p < 0,0001$ ; $n = 16$ Harpacticoida, Ruderfusskrebse: 73 ± 34 %; $p < 0,05$ ; $n = 11$ Hydrozoa, Hydropolypen: 70 ± 40 %; n.s.; $n = 11$ Ephemeroptera, Eintagsfliegen: 72 ± 36 %; $p < 0,05$ ; $n = 17$ Ostracoda, Muschelkrebse: 65 ± 27 %; $p < 0,05$ ; $n = 18$ Trichoptera, Köcherfliegen: 65 ± 33 %; $p < 0,10$ ; $n = 18$		
psammophile Taxa (Anteil im Habitat PHYT)	Oligochaeta, Wenigborster: 32 ± 24 %; $p < 0,01$ ; $n = 18$ Chironomidae, Zuckmücken: 49 ± 25 %; n. s.; $n = 18$		
Regression mit der Phytomasse (PM, g aschefreie TS/m <sup>2</sup> )	$pZ_{ges(PHYT)} = 3,07 + 0,72 \times \log_{10}(PM)$ ; $n=21$ , $r^2 = 0,280$ , $p = 0,010$ $pZ_{ges(AHAB)} = 4,18 + 0,31 \times \log_{10}(PM)$ ; $n=21$ , $r^2 = 0,225$ , $p = 0,013$		

Tab. 3: Charakterisierung der Makrozoobenthos-Besiedlung der Referenzflächen (REF) der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH), Sipplingen-Osthafen (SIPP) und Ermatingen-Westerfeld (ERMW). – Individuendichte, -anteile: Mittelwerte ± einf. Standardabweichungen (jeweils  $n = 5$  bis  $6$ ). – Lebensraumpräferenz: mittlerer prozentualer Anteil der Gesamt-Population eines Taxons, der in der PHYT-Teilprobe gefunden wurde (Mittelwert ± einf. Standardabw.; 100 % entspr. PHYT + SED) sowie die Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Tests (Stichprobenumfang, d.h. Anzahl Proben, bei denen das Taxon sowohl in der PHYT- als auch in der SED-Probe enthalten war; Irrtumswahrscheinlichkeit  $p$  für den Erwartungswert 50 %, d.h. PHYT- und SED-Probe enthalten jeweils gleiche Anteile der Population); beide Jahrgänge vereinigt. – Abhängigkeit von der Phytomasse: Regressionsgleichung, Stichprobenumfang  $n$ , Bestimmtheitsmaß  $r^2$ , Irrtumswahrscheinlichkeit  $p$ .

- bei der Probennahme die Habitate SED (Sedimentoberfläche) und PHYT (Makrophytenrasen) sowie die Vereinigungsmenge aller Habitate (AHAB) unterschieden wurde.
- ii unterschiedliche Habitat-Präferenzen der MZB-Taxa: Einige Taxa bevorzugen als Lebensraum die Oberflächen-sedimente, andere wiederum verhalten sich indifferent oder bevorzugen Makrophytenrasen. Zur Verfeinerung der Analyse wurden daher eine phytophile und eine psammophile sowie eine substrat-indifferente Taxa-Gruppe unterschieden, die die restlichen Taxa enthält.
  - iii zeitliche Variabilität: Die MZB-Dichten der naturbelassenen Habitate SED und AHAB der Stationen Sipplingen-Osthafen und Litzelstetten-Krähenhorn zeigten eine signifikante Abhängigkeit vom Jahrgang (Voruntersuchungen JG2008 vs. Nachuntersuchungen JG2010); die Dichten zahlreicher Taxa waren 2008 größer als 2010. Für die Analyse der Auswirkungen der Erosionssicherungsmaßnahmen bedeutete dies, dass ein Vergleich der Testfläche nach der Schüttung 2010 mit dem Ausgangszustand von 2008 nur eingeschränkt sinnvoll ist, da sich zwei unterschiedliche Effekte überlagern. In Ermatingen-Westerfeld konnte ohnehin nur der Jahrgang 2010 untersucht werden.
  - iv kleinräumige Variabilität: Die MZB-Dichten der jeweiligen Test- und Referenzflächen von Sipplingen-Osthafen und Litzelstetten-Krähenhorn unterschieden sich 2008 nicht signifikant voneinander. Es darf daher angenommen werden, dass die strukturellen und sonstigen Gegebenheiten

innerhalb eines Paares von Test- und Referenzflächen nicht nur 2008 ähnlich waren, sondern auch 2010 gewesen wären. Damit gehen die 2010 festgestellten Unterschiede der MZB-Besiedlung zwischen den Test- und Referenzflächen sehr wahrscheinlich allein auf die Erosionssicherungsmaßnahmen zurück.

Die Ergebnisse aus (iii) und (iv) sind von tragender Bedeutung für die eigentlich interessierende Analyse der Auswirkungen der Erosionssicherungen. Demzufolge können die geschütteten Testflächen streng genommen nur mit den zeitgleichen Referenzflächen verglichen werden. Weiterhin traten schwach signifikante Unterschiede zwischen Sipplingen-Osthafen, Litzelstetten-Krähenhorn und Ermatingen-Westerfeld auf, so dass die genannten Stationen getrennt diskutiert werden.

### 5.5.2. Ausgangszustand

Die Gesamt-Individuendichten des Makrozoobenthos in und auf den Sedimenten der naturbelassenen Referenzflächen der drei Stationen lagen im Mittel bei  $p_z = 4,14$  bis  $4,91$ , also bei rund 15.200 bis 97.800 Tiere pro Quadratmeter (Tab. 3). Werte in dieser Größenordnung wurden auch in anderen Studien festgestellt, die mit der gleichen Methodik gearbeitet haben (Ostendorp et al. 2008b). Von den insgesamt 22 taxonomischen Gruppen traten lediglich vier (Ermatingen-Westerfeld) bis zehn Taxa (Sipplingen-Osthafen) mit mitt-

	Referenzfläche (REF) JG 2010			Schüttungsfläche (CONT, TEST) JG 2010			Wabeninnenfläche (WIF) JG 2010		
	SED	PHYT	AHAB	SED	PHYT	AHAB	SED	PHYT	AHAB
<b>KRAH</b>	Seekreide (Fein- bis Mittelsand) Vegetation <i>Chara</i> ; 5 ± 8 g af TS/m <sup>2</sup>			Flächenschüttung 2009 (Grobkies, Geröll) keine; 0 g af TS/m <sup>2</sup>			entfällt		
Substrat									
phytophile Taxa	23	2	25	18	0	18			
psammophile Taxa	11	2	12	10	0	10			
indifferente Taxa	56	7	63	51	0	51			
alle Taxa	90	10	100	78	0	78			
<b>SIPP</b>	Seekreide + Molassesand (Fein- bis Mittelsand) Vegetation <i>Chara</i> ; 68 ± 35 af TS/m <sup>2</sup>			Riegelschüttung 2009 (Grobkies, Geröll) keine; 0 af TS/m <sup>2</sup>			Seekreide + Molassesand (Fein- bis Mittelsand) <i>Chara</i> ; 117 ± 27 af TS/m <sup>2</sup>		
Substrat									
phytophile Taxa	13	41	54	13	0	13	29	69	97
psammophile Taxa	10	3	13	3	0	3	16	2	18
indifferente Taxa	17	17	34	39	0	39	18	14	32
alle Taxa	40	60	100	55	0	55	63	84	147
<b>ERMW</b>	Seekreide (Mittelsilt bis Feinsand) Vegetation <i>Chara</i> + <i>Potamogeton</i> ; 221 ± 41 af TS/m <sup>2</sup>			Flächenschüttung 1998 (Mittelkies) <i>Chara</i> ; 11 ± 15 af TS/m <sup>2</sup>			entfällt		
Substrat									
phytophile Taxa	24	40	64	14	2	16			
psammophile Taxa	10	10	19	27	1	29			
indifferente Taxa	2	15	17	32	17	50			
alle Taxa	35	65	100	73	21	94			

Tab. 4: Übersicht der Makrozoobenthos-Dichte auf den Referenz- und den Testflächen der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH), Sipplingen-Osthafen (SIPP) und Ermatingen-Westerfeld (ERMW) des Untersuchungsjahrgangs 2010. Dargestellt sind die mittleren MZB-Dichten der phytophilien, psammophilen und indifferenten Taxagruppe sowie als Summe daraus die Gesamt-MZB-Dichte in den Habitaten Sediment (SED), Makrophytenrasen (PHYT) sowie in der Vereinigung aller Habitats (AHAB). Die Daten wurden auf die mittlere Gesamt-MZB-Dichte der jeweiligen Referenzfläche (100 %) bezogen (KRAH: 100 % = 27.040, SIPP: 100 % = 48.570, ERMW: 100 % = 15.210 Ind./m<sup>2</sup>; jeweils Mittelwerte für n = 5); weiterhin sind Substrat-Merkmale sowie Angaben über die dominanten Makrophyten-Taxa und die mittlere Phytomasse (g aschefreie Biomasse/m<sup>2</sup>) enthalten (weitere Erläuterungen s. Text).

leren Individuendichten von mehr als 1000 Ind./m<sup>2</sup> auf. Nur die Muschelkrebse (Ostracoda), die Muscheln (Bivalvia; hier überwiegend die Dreikantmuschel *Dreissena polymorpha*), die Ruderfußkrebse der Ordnung Harpacticoidea und die Zuckmückenlarven (Chironomidae) erreichten in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen Dichten von jeweils 10.000 Tieren und mehr je Quadratmeter. In Ermatingen-Westerfeld waren diese Taxa nur in deutlich geringeren Dichten vertreten.

Etwas mehr als die Hälfte aller Tiere kam in den Makrophytenrasen vor, wobei die Gesamt-Individuendichten signifikant positiv mit der aschefreien Phytomasse korreliert waren (Tab. 3). Sechs der häufigeren Taxa zeigten eine signifikante Präferenz für Makrophytenrasen als Lebensraum (»phytophiles MZB«) und nur zwei Taxa kamen in höherer Dichte im und auf dem Sediment vor (»psammophiles MZB«). Das Vorkommen von dichten Makrophytenrasen wirkte sich auch auf die Individuendichte einzelner psammophiler Taxa im Sediment-Lebensraum aus: Zuckmückenlarven, in ihrer Mehrheit Detritus- und Sedimentfresser, profitierten offenbar vom Angebot an organischer Substanz, die von den Makrophyten geliefert wird, während Schnecken als typische Weidegänger die mit Armeleuchteralgenrasen überwachsenen Sedimente mieden. Diese Ergebnisse zeigen die besondere Bedeutung der Makrophytenrasen als Habitate für das Makrozoobenthos. Sie belegen aber auch die komplexen Interaktionen zwischen Substrattextur, Makrophytenbesiedlung und MZB-Individuendichten.

### 5.5.3. Auswirkungen der Erosionssicherungsmaßnahmen

Die Tab. 4 gibt eine Übersicht der MZB-Dichten der Test- und Referenzflächen von Litzelstetten-Krähenhorn, Sipplingen-Osthafen und Ermatingen-Westerfeld wieder, jeweils differenziert nach Habitats und nach phytophiler, psammophiler und indifferenter Taxa-Gruppe. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, sind die Daten in Prozent der mittleren Gesamt-MZB-Dichte der jeweiligen Referenzfläche dargestellt.

Die Daten der Station Litzelstetten-Krähenhorn spiegeln die Situation wider, wenn ein Uferabschnitt, der von Natur aus in sehr geringem Umfang von Makrophyten besiedelt wird, mit einer flächigen Kies-/Geröllschüttung abgedeckt wird. Im Ausgangszustand (REF) setzte sich die Gesamt-MZB-Population (AHAB, 100 %) überwiegend aus substrat-indifferenten Taxa zusammen (63 %), während phytophile Taxa aus naheliegenden Gründen nur schwach vertreten waren. Fast alle MZB-Organismen kamen in bzw. auf der Sedimentoberfläche (Habitat SED) vor, lediglich 10 % der Individuen waren in den spärlichen Makrophytenrasen zu finden. Auf der Schüttungsfläche fielen die Makrophytenrasen als Lebensraum für das MZB völlig weg. Durch den leichten Rückgang der Dichte der indifferenten Taxa und der phytophilen Taxa im Sediment-Habitat lag die MZB-Dichte mit 78 % deutlich unter dem Vergleichswert von 90 %.

Im Einzelnen zeigten die Muscheln (v.a. Dreikantmuschel), die Wenigborster, die Eintagsfliegenlarven und die Köcherfliegenlarven eine gewisse Abnahme, während

Schnecken, Ruderfußkrebse und Flohkrebse von den neuen Strukturen profitieren konnten. Die geringere Dichte der Dreikantmuscheln könnte mit dem noch jungen Alter der Schüttungen zu tun haben, das noch keine vollständige Nutzung aller potentiell besiedelbaren Oberflächen ermöglichte. Die Wenigborster sind in ihrer Mehrzahl typische Weichbodenbewohner; für sie war das grobe Schüttungsmaterial offenbar ungeeignet. Eintagsfliegen- und Köcherfliegenlarven bevorzugten Makrophytenrasen als Lebensraum, die auf den Schüttungssubstraten vollständig fehlten. Allerdings waren auch die naturbelassenen Referenzflächen nur sehr spärlich besiedelt, so dass die Unterschiede nicht signifikant waren. Schnecken als typische Weidegänger, die den Biofilm auf festen Oberflächen abweiden, profitierten vom Schüttungssubstrat; die Kiese und Gerölle boten ihnen offenbar eine bessere Nahrungsgrundlage als die feineren Sedimente der Referenzfläche, die zudem vom Wellenschlag umgelagert werden können.

In der Station Sipplingen-Osthafen wurde im Unterschied zu Litzelstetten-Krähenhorn eine Wabenschüttung untersucht, in der zwei unterschiedliche Testflächen auftreten: die eigentlichen Schüttungsriegel sowie die Wabeninnenflächen (ca. 15 × 15 m) mit naturbelassenen Substraten. Sipplingen-Osthafen spiegelt eine Situation wider, bei der ein dicht mit Makrophyten bewachsener Uferstreifen abgedeckt wird. So steuerten die Makrophytenrasen der Referenzfläche im Mittel rund 60 % der gesamten MZB-Besiedlung bei, während auf das Sedimentsubstrat nur 40 % entfallen (Tab. 4). In den Makrophytenrasen überwogen naturgemäß die phytophil Taxa (41 %), während im und auf dem Sediment die substratindifferenten Formen dominierten und die psammophilen Taxa mit nur 10 % vertreten waren. Die Bedeutung der Makrophyten wird dadurch unterstrichen, dass 54 % der gesamten MZB-Fauna aus phytophil Formen bestehen.

Durch die Erosionssicherungsmaßnahme fielen die Makrophytenrasen in der darauf folgenden Vegetationsperiode vollständig weg, so dass die Gesamt-MZB-Dichte auf rund 55 % des Referenzwerts absank. Diese Abnahme war allerdings um 15 Prozentpunkte geringer als es aufgrund der Besiedlung der Makrophytenrasen auf der Referenzfläche (60 %) zu erwarten gewesen wäre. Die Abnahme der Gesamt-MZB-Dichte ging im Wesentlichen auf die drastische Abnahme der phytophil und der psammophilen Taxa-Gruppe zurück, während sich der Anteil der substrat-indifferenten Taxa-Gruppe geringfügig erhöhen konnte. Hier waren es wieder die Schnecken, die als typische Weidegänger auf dem Kies-/Geröllsubstrat höhere Dichten erreichten.

Die Wabeninnenflächen wiesen gegenüber der Referenzfläche eine fast doppelt so hohe Makrophyten-Besiedlung auf. Auch die Dichten der phytophil und der psammophilen Taxa-Gruppe waren im Vergleich zur Referenzfläche deutlich erhöht (Tab. 4). Eine besondere Förderung erfuhren die phytophil Taxa in beiden Habitaten, wodurch sich ihre Dichte nahezu verdoppelte. Die psammophilen Taxa in den Oberflächensedimenten waren ebenfalls leicht erhöht.

Die phytophil Taxa profitierten offenbar von der nahezu doppelt so hohen Phytomasse-Konzentration auf den Wabeninnenflächen, während die Zunahme der psammophilen Taxa mit dem höheren Masseanteil an organischer Substanz in den Oberflächensedimenten in Verbindung stehen könnte.

Ähnlich wie in Sipplingen-Osthafen steuerten auch in der Station Ermatingen-Westerfeld die Makrophytenrasen mit 65 % aller Individuen den größten Teil zur Gesamt-MZB-Dichte bei. Die Schüttungsfläche enthielt zwar nur wenige Makrophyten-Flecken, war aber im Unterschied zu Sipplingen-Osthafen und Litzelstetten-Krähenhorn nicht völlig vegetationsfrei, so dass der Beitrag der Makrophytenpolster auf lediglich 21 % zurückging. Ursache war der Einbruch der phytophil Taxa nicht nur in der Makrophytenvegetation, sondern auch in und auf der Kiesoberfläche. Dagegen erfuhren insbesondere die indifferenten Taxa eine bedeutende Förderung, indem ihr Anteil an der Gesamt-MZB-Dichte von 17 auf 50 % stieg. Auch der Anteil der psammophilen Taxa nahm zu, so dass schließlich die Gesamt-MZB-Dichte ein ähnliches Niveau erreichte wie auf der Referenzfläche.

Die mutmaßlichen Störungen durch Schwäne können grundsätzlich die MZB-Dichte und die Zusammensetzung der MZB-Biozönose beeinflussen. Allerdings dürfte der unmittelbare Einfluss in den Wochen vor der Probenahme aufgrund der großen Wassertiefe eher gering gewesen sein. Einstweilen wird also davon ausgegangen, dass die MZB-Biozönose im Wesentlichen die strukturellen Gegebenheiten der Kiesschüttung abbildet.

## 5.6. Fische

Insgesamt konnten in den drei Stationen 13 Fischarten nachgewiesen werden; die häufigste Art war in allen Stationen der Flussbarsch, weiterhin in Litzelstetten-Krähenhorn der Stichling und in Ermatingen-Westerfeld die Schmerle (Tab. 5).

Keine der nachgewiesenen Fischarten unterliegt dem besonderen Schutz der FFH-Richtlinie, dem deutschen Bundesnaturschutzgesetz oder der Bundesartenschutzverordnung. Mit Ausnahme des Aals gelten alle Arten in der Schweiz und Baden-Württemberg als nicht »gefährdet« (Dussling/Berg 2001; Kirchofer et al. 2007). Die im Überlinger See vor allem vor Sipplingen und Bodman vorkommende Groppe (Anhangsliste II der FFH-RL) konnte auf den Versuchsflächen nicht nachgewiesen werden.

Bei den in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen nachgewiesenen Fischen handelt es sich um wenig anspruchsvolle, überwiegend pelagische Ubiquisten, die einen großen Aktionsradius weit über die Versuchsflächen hinaus haben und von geringem indikatorischen Wert sind. Sie haben allgemein keine große Affinität zu den dichten, strukturell wenig gegliederten Armelechteralgen-Beständen. Lediglich wenige junge Trüschchen hielten sich in oder zwischen den Armelechteralgen-Beständen auf (Abb. 11 links). Die teilweise vorhandenen Unterschiede zwischen Referenz- und Testfläche rührten auch daher, dass bei den Bestands-



		KRAH		SIPP		ERMW	
		TEST	REF	TEST	REF	TEST	REF
Artenzahl	2008	6	5	5	3	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	3	5	3	4	8	9
Individuenzahl	2008	10	6	11	20	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	24	24	38	42	147	85
Jungfischanteil [%]	2008	60	50	64	85	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	12	12	89	88	96	79
Flussbarsch	2008	1	2	6	17	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	4	6	34	37	29	52
Aal	2008	1	1	2	2	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	1	1	0	0	3	2
Hecht	2008	1	0	1	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	1	0	0	2	5
Brachse	2008	0	0	1	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	0	0	1	0	0
Trüsche	2008	3	1	1	1	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	0	0	0	0	0
Döbel	2008	3	1	0	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	1	2	0	1	4
Hasel	2008	0	1	0	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	0	0	0	0	0
Karpfen	2008	1	0	0	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	0	0	0	2	0
Rotfeder	2008	0	0	0	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	0	0	0	1	1
Schleie	2008	0	0	0	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	0	0	0	7	15
Schmerle	2008	0	0	0	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	0	0	0	102	4
Stichling	2008	0	0	0	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	19	15	2	3	0	0
Ukelei	2008	0	0	0	0	<i>n. b.</i>	<i>n. b.</i>
	2010	0	0	0	1	0	1

Tab. 5: Fischnachweise auf den Test- und Referenzflächen der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH), Sipplingen-Osthafen (SIPP) und Ermatingen-Westerfeld (ERMW) 2008 (Voruntersuchungen: nur KRAH und SIPP) und 2010 (Nachuntersuchungen: alle Stationen); Zusammenfassung der Elektro-, Netz- und Reusenfänge; SIPP-TEST – Schüttungsfläche und Wabeninnenfläche wurden zusammenfassend beprobt.



Abb. 11: Fischökologische Untersuchungen: links – Litzelstetten-Krähenhorn-TEST, bei der Elektrofischung sind einige junge Trübschen in das Netz der Anode geschwommen (25.08.2008); rechts – Ermatingen-Westerfeld-TEST: juvenile und adulte Schmerlen (01.09.2010).

erhebungen zufällig schwarmweise umherziehende Fische gefangen wurden oder besondere Einzelstrukturen auf der Fläche vorhanden waren.

Hingegen ergaben sich in Ermatingen-Westerfeld deutliche Unterschiede zwischen REF und TEST. Die absoluten Fangzahlen waren auf der Testfläche erheblich höher, wobei sich die Population hier zum größten Teil aus Jungfischen zusammensetzte, während die Fangzahlen von Altfischen auf der Referenzfläche höher waren. Als wichtigster Faktor hierfür ist die fast fehlende Vegetationsbedeckung zu nennen. Schleien, Flussbarsche und der Kamberkrebs (*Orconectes limosus*) bevorzugten die dichte Vegetation mit schlammigem Grund. Dagegen konnten die Schmerlen als benthisch lebende Kleinfische von der Kiesschüttung profitieren. So wurden auf der Testfläche 102 Exemplare gefangen, auf der Referenzfläche nur vier Tiere (Abb. 11 rechts).

Negative Effekte der denkmalpflegerischen Erosionssicherungsmaßnahmen auf Fische waren somit in keiner der drei Stationen festzustellen. Allerdings lassen die geringe Anzahl der nachgewiesenen Fische und deren große Mobilität keine statistische Auswertung zu. Außerdem gibt es viele Faktoren unbestimmter Art und Größe, die auf den Fischbestand einwirken und die Effekte, die durch die Aufschüttung zur Erosionssicherung verursacht werden könnten, überlagern. Wir gehen gleichwohl davon aus, dass die Kies-/Geröllschüttungen neue Lebensräume schaffen und die strukturelle Diversität des Seebodens erhöhen. Dies gilt insbesondere dort, wo der großflächige, dichte Armeleuchteralgenrasen durch die Aufschüttungen unterbrochen und aufgelockert wird.

## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Untersuchung der Erosionsschutzmaßnahmen in den drei Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (2009 ausgebrachte flächige Kies-/Geröllschüttung), Sipplingen-Osthafen (2009 ausgebrachte, wabenförmige Kies-/Geröllschüttung) und

Ermatingen-Westerfeld (1998 ausgebrachte flächige Mittelkies-Schüttung über Baustahlmatte mit Geotextil) haben gezeigt, dass

- i die Maßnahmen wasserbaulich im Wesentlichen stabil sind und ihren Zweck erfüllen,
- ii der großvolumige Porenraum des Schüttungsmaterials nur langsam verfüllt wird (Kolmation),
- iii sich die Biozönosen (hier: Unterwasserpflanzen, Makrozoobenthos) auf den Schüttungsflächen in ihrer taxonomischen Zusammensetzung, ihrer Abundanz und ihrer Biomasse-Produktion (Unterwasserpflanzen) gegenüber dem unbeeinflussten Referenzzustand erheblich verändern,
- iv es Arten(-gruppen) gibt, die von den Erosionssicherungsmaßnahmen profitieren, andererseits auch solche, die aufgrund anderer Lebensraumsprüche das Kies- bzw. Geröllsubstrat meiden,
- v artenbezogene und gebietsbezogene Schutzziele kaum nachteilig tangiert werden, sofern die negativen Auswirkungen (z.B. mittelfristiger Ausfall der Unterwasservegetation) nur kleinflächig ausgebildet sind.

### 6.1. Wasserbauliche Einschätzung

In dem begrenzten Zeitraum ihrer Existenz haben sich die Schüttungen in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen als wasserbaulich stabil erwiesen. Es kam augenscheinlich zu keiner nennenswerten Verlagerung von Kies- oder Geröllen innerhalb der Schüttungen bzw. aus den Schüttungsflächen heraus. Feinmaterial war in dem Schüttungsmaterial nur in sehr geringen Anteilen enthalten, so dass auch in diesem Punkt keine Verluste auftreten konnten. Es ist zu erwarten, dass sich beide Maßnahmen auch zukünftig als stabil und zweckdienlich erweisen.

Auch die Abdeckung in Ermatingen-Westerfeld hat sich in den knapp zwölf Jahren ihres Bestehens kaum verändert. Weder kam es zu einer nennenswerten Verlagerung des Kiesmaterials noch zu einer Überdeckung mit Feinsedi-

ment. Das unruhige Relief aus flachen Kieshaufen und Vertiefungen wurde vermutlich durch Nahrung suchende Höcker- und Singschwäne hervorgerufen. Offenbar reichten die Wellenkräfte zwischenzeitlich nicht aus, um das Relief wieder einzuebnen. An vielen Stellen gingen die Gruben bis auf das Baustahlgewebe bzw. das Geotextil hinunter. Möglicherweise haben Baustahl und Geotextil die unterliegenden Sedimente und Kulturschichten vor tiefer reichender Ausräumung durch Schwäne geschützt. Abgesehen davon hat sich die Maßnahme aus wasserbaulicher Sicht als stabil erwiesen.

### 6.2. Kolmation

In bescheidenem Umfang kam es in Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen zu einer Verfüllung des groben Porenraums mit Feinmaterial, das reich an organischer Substanz und Carbonat ist. Das Material stammte wahrscheinlich aus der Phytomasse-Produktion der Armelechtermalgen der Umgebung. Die Kolmation dürfte sich noch viele Jahre hinziehen, bevor der Porenraum mit Feinsedimenten annähernd aufgefüllt ist. In Ermatingen-Westerfeld wurde die Kolmation phasenweise durch die Wühl- und Fraßtätigkeit der Schwäne unterbrochen, so dass auch hier – zwölf Jahre nach Einrichtung des Erosionsschutzes – der Feinsedimentanteil in der Kiesschüttung sehr gering ist. Vermutlich wäre ohne die Tätigkeit der Schwäne die Kiesabdeckung längst mit einem Schleier aus feinsandig-siltiger Seekreide bedeckt.

### 6.3. Auswirkungen auf Unterwasserpflanzen, Makrozoobenthos und Fische

Die ökologischen Auswirkungen der Aufschüttungen basieren primär auf einem Korngrößeneffekt: die natürlicherweise vorkommenden fein- und mittelsandigen Sedimente wurden mit Kiesen und kleinen Geröllen abgedeckt. Dadurch entstand ein Substrat mit großvolumigen Poren, die sedimentiertes Feinmaterial, darunter auch Diasporen von Wasserpflanzen in tiefere Schichten durchsickern lassen. So war es beispielsweise den Armelechtermalgen bisher nicht möglich, sich auf den neu geschaffenen Substraten von Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen anzusiedeln. Die Schüttungsflächen blieben völlig frei von submersen Makrophyten, lediglich die Grünalge *Cladophora incrassata* konnte sich auf den Grobkiesen und Geröllen festsetzen. Eine direkte Folge des Fehlens von Wasserpflanzen ist, dass ein wichtiger Lebensraum für Makrozoobenthos-Organismen wegfällt, der auf den vegetationsbedeckten Referenzflächen mehr als die Hälfte aller MZB-Organismen des Standorts beherbergt. Die Gesamt-MZB-Dichte nimmt im Vergleich zu solchen Referenzflächen drastisch ab. Werden dagegen Seebodenflächen überschüttet, die auch im Ausgangszustand nur eine sehr geringe Vegetationsbedeckung aufweisen, sind die Auswirkungen auf das MZB weitaus geringer.

In Ermatingen-Westerfeld wurden dagegen auf der Testfläche punktuell gut entwickelte Armelechtermalgenrasen an-

getroffen; es handelt sich dabei wahrscheinlich um Restbestände, die sich in Senken mit größerem Feinsedimentanteil haben entwickeln können. Die Gesamt-Individuendichte des Makrozoobenthos liegt auf der Testfläche in der gleichen Größenordnung wie auf der Referenzfläche; allerdings ist auch hier das Formenspektrum beträchtlich verändert.

Auch für das Artenspektrum der Fischfauna dürfte das Verschwinden der dichten Armelechtermalgen auf den Schüttungsflächen von Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen der maßgebende Faktor gewesen sein, obgleich die geringen Fangzahlen keine statistisch gesicherte Aussage zulassen. In Ermatingen-Westerfeld war hingegen eine deutliche Reaktion der Fischfauna festzustellen, z.B. durch das häufige Auftreten der benthisch lebenden Schmerle, für die die vegetationsarmen Kiesflächen interessante Habitate sowohl für den Aufenthalt als auch zur Nahrungssuche darstellen.

### 6.4. Gewinner und Verlierer

Einige Arten(-gruppen) reagieren positiv auf die Maßnahmen, indem sie die Schüttungsflächen mit höherer Individuendichte besiedeln als die Referenzflächen, andere wiederum meiden das Kies-/Geröllsubstrat.

Auf der Verliererseite stehen drei Armelechtermalgen-Arten und das Mittlere Nixkraut, die zumindest im ersten Jahr nach der Fertigstellung die Schüttungssubstrate von Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen noch nicht wieder besiedeln konnten. Wie die wesentlich ältere Schüttungsfläche in Ermatingen-Westerfeld zeigt, könnten mittelfristig Trittstein-Lebensräume für oligotrophente Arten, z.B. die Armelechtermalge *Chara tomentosa* geschaffen werden.

Auch für viele Makrozoobenthos-Taxa sind die neu geschaffenen Substrate wenig geeignet. Hierzu gehören die phytophilien Taxa, z.B. die Eintagsfliegen- und die Köcherfliegen-Larven sowie die psammophilen Taxa wie Wenigborster und Zuckmücken-Larven; die einen, weil die Makrophytenrasen als Lebensraum wegfallen, die letzteren, weil das grobkörnige Substrat ihren Lebensraumansprüchen nicht entgegenkommt. Dagegen werden insbesondere die Schnecken gefördert, da sie als Weidegänger Festsubstrat-Oberflächen bevorzugen, weiterhin Ruderfußkrebse (p.p.), Egel und Wasserasseln.

Die Wabeninnenflächen, die in der Station Sipplingen-Osthafen untersucht wurden, gleichen den naturbelassenen Referenzflächen. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Armelechtermalgen sowie das phytophile Makrozoobenthos hier sogar eine gewisse Förderung erfahren.

Die Fische können mit wenigen Ausnahmen (z.B. Schleie und junge Flussbarsche in Ermatingen-Westerfeld) als potentielle Gewinner der Maßnahmen zu Erosionssicherung angesehen werden, da der dichte Bewuchs mit strukturell einförmigen Armelechtermalgenrasen auf begrenzter Fläche unterbrochen wird und der Kies- und Geröllgrund als neues und für einige Arten, z.B. die Schmerle, besser nutzbares Substrat für die Nahrungssuche zur Verfügung steht.

### 6.5. Rote Liste-Arten und Schutzstatus

In den untersuchten Stationen kommen insgesamt sechs Wasserpflanzen-Arten vor, die in einer der nationalen Roten Listen verzeichnet sind. Auch die zugehörigen Vegetationseinheiten stehen nach EG-Recht und deutschem Recht (FFH-RL) bzw. Schweizer Recht unter Schutz. Allerdings gehören zwei der aufgeführten Armleuchteralgen-Arten (*Chara aspera*, *Ch. contraria*) inzwischen wieder zu den häufigsten Wasserpflanzen im Bodensee, so dass kleinflächige Bestandsabnahmen, etwa im Zuge der räumlich begrenzten Erosionsschutzmaßnahmen, den Erhalt dieser Arten im Bodensee nicht gefährden.

Über das eventuelle Vorkommen gefährdeter Makrozoobenthos-Arten kann derzeit keine Aussage gemacht werden, weil das Material nicht bis zur Art bestimmt wurde.

Fischarten der Roten Liste und der FFH-Richtlinie (Anhangslisten) konnten auf den untersuchten Flächen nicht angetroffen werden. Einzige Ausnahme war der Aal, der mit zwei Exemplaren vor Litzelstetten nachgewiesen wurde. Er gilt im Bodensee-Gebiet gemäß der Roten Listen Deutschlands und der Schweiz als stark gefährdet.

### 6.6. Indirekte Auswirkungen

Neben den o.g. unmittelbaren Effekten werden indirekte ökologische Effekte sichtbar, an die zunächst nicht gedacht worden war. Offenbar stellt die Kiesschüttung in Ermatingen-Westerfeld mit ihrem lockeren Armleuchteralgen-Bewuchs und ihrer Dominanz an großen Makrozoobenthos-Formen ein bevorzugtes Nahrungshabitat für gründelnde Schwäne dar.

In allen Stationen ist die lokale Sedimentbildungsrate erheblich verringert, da die fehlenden oder schütterten Armleuchteralgenrasen auf den Testflächen weit weniger Kalk ausfällen als die dichten und hoch gewachsenen Bestände der Referenzfläche. Welche Bedeutung diesen beiden Effekten zukommt, kann derzeit nicht abschließend beurteilt werden.

### 6.7. Alterungseffekte

Bei der Planung der denkmalpflegerischen Erosionssicherungsmaßnahmen war erwartet worden, dass sich die Schüttungsflächen mittelfristig den umgebenden Referenzflächen angleichen, was Unterwasservegetation und Makrozoobenthos angeht. Die Untersuchung der knapp zwölf Jahre alten Station in Ermatingen-Westerfeld hat gezeigt, dass dazu eine wahrnehmbare Tendenz besteht. Allerdings wurde hier die Entwicklung durch Einflüsse ganz anderer Art, die Fraß- und Wühltätigkeit der Schwäne, periodisch unterbrochen. Ob solche Einflüsse auch an anderen Uferabschnitten von Bedeutung sind, selbst dann, wenn das Schüttungsmaterial deutlich gröber ist, kann beim momentanen Stand der Untersuchungen nicht beurteilt werden.

### 6.8. Fazit

Zusammenfassend kommen wir zu dem Schluss, dass denkmalpflegerische Erosionssicherungsmaßnahmen dieser Aus-

führungsart wegen des vergleichsweise geringen Ausmaßes ökologisch verträglich sind, obschon sie deutliche Veränderungen in der biozönotischen Struktur von Unterwasserpflanzen und Makrozoobenthosfauna hervorrufen, während die Fische kaum betroffen sind. Von Nachteil ist besonders die gegenüber der Referenzfläche fehlende Vegetationsbedeckung, die sich auch auf andere ökologische Funktionen (Eignung als Nahrungshabitat, Sedimentbildung) auswirkt. Sofern die Maßnahmen räumlich begrenzt sind, tragen sie zur strukturellen Diversifizierung bzw. zur Lebensraumvielfalt für Makrozoobenthos und Fische bei.

### 7. Empfehlungen

Insgesamt halten wir die bisherigen Maßnahmen für ökologisch verträglich, solange sie auf nur kleinen Flächen eines großen Uferabschnitts durchgeführt werden. Grundsätzlich empfehlen wir, die nachfolgenden Verbesserungsvorschläge zu prüfen, um nachteilige ökologische Effekte auf Unterwasserpflanzen und bodenlebende Wirbellose zu minimieren und um neue Ansiedlungsmöglichkeiten für gefährdete Fischarten zu schaffen.

Durch eine rasche Kolmation sollte sich das Schüttungs-substrat möglichst rasch an die Verhältnisse naturbelassener Sedimentoberflächen angleichen, so dass die Nachteile, v.a. die fehlende Wasserpflanzen-Bedeckung, gefolgt von einer verringerten Makrozoobenthos-Dichte, minimiert werden können.

Die Kolmation kann beispielsweise durch die Wahl des Schüttungssubstrates verbessert werden. In den vorliegenden Fällen wurde eine Kies-/Geröllmischung hergestellt und ausgebracht, die im Wesentlichen aus zwei Korngrößenklassen (Mittelkies, ca. 6,3 bis 20 mm, grober Grobkies bis kleine Gerölle, ca. 35 bis 112 mm) bestand. Zu bevorzugen wäre eine Mischung aus drei oder vier Kornklassen, die neben den genannten Korngrößenklassen auch reichlich Material im Feinkies- und Grobsandbereich enthält. Diese Korngrößenklassen werden weder in Sipplingen-Osthafen noch in Litzelstetten-Krähenhorn durch Wellengang suspendiert und als Suspensionsfracht fortgetragen (vgl. Ostendorp/Härter 2013), so dass sich Materialverluste in Grenzen halten sollten. Die Auswahl der Korngrößenklassen bzw. die beim Lieferanten angeforderten Mischungsverhältnisse sollten vorher durch Korngrößenanalysen, Schüttungs- und Rüttler-Experimente im Labor ermittelt werden, um sicherzustellen, dass sich das gewünschte Ergebnis in der Praxis tatsächlich einstellt.

Eine alternative Möglichkeit besteht grundsätzlich darin, sogenannten »ungewaschenen Wandkies« mit einem breiten Korngrößenspektrum zu verwenden. Die Vorteile liegen auf der Kostenseite, die Nachteile darin, dass eine bestimmte Korngrößenzusammensetzung vom Lieferanten wahrscheinlich nicht zugesichert bzw. nicht eingehalten werden kann. Überdies könnte es zu Feinmaterialverlusten während des Schüttungsvorgangs bzw. später durch den Wellenangriff kommen. Es ist damit auch nicht auszuschließen, dass das

ausgeschwemmte Feinmaterial an anderer Stelle zu unerwünschten Auflandungen führt.

Als zusätzliche Maßnahme sollten auf der Oberfläche des Schüttungskörpers punktuell grobe Gerölle (Kaliber 200 mm und größer) abgelegt werden, um neue Lebensräume für benthisch lebende Fischarten zu schaffen: bei Sipplingen und Überlingen gibt es Vorkommen der nach FFH-Richtlinie geschützten Groppe (*Cottus gobio*) (Haberbosch 2004; Phillipson/Teiber 2003). Nach Haberbosch (2004) besteht der typische Lebensraum der Groppe im Bodensee aus ca. 30 % Flächenanteil kleiner Steine (63–150 mm Durchmesser) und ca. 5–25 % großer Steine (150–300 mm Durchmesser). Wenn die Erosionssicherung auf diese Weise erfolgt, könnten Groppe, Schmerle, Trüsche und eventuell auch der Aal einen klaren Vorteil daraus gewinnen. Die großen Gerölle hätten überdies wahrscheinlich einen positiven Effekt auf die Wellenenergiedissipation und würden damit dem Zweck der Maßnahme entgegenkommen.

Eine weitere Überlegung ist, ob bei großflächigen Vorhaben nicht vorrangig mit Wabenschüttungen anstatt mit Flächenschüttungen gearbeitet werden kann. Dies hätte neben Kostenvorteilen auch ökologische Vorteile, da die Makrophyten- und die Makrozoobenthos-Besiedlung in den Wabeninnenflächen denen der naturbelassenen Flächen ähnlich ist. Für einen Teil der Gesamtmaßnahme könnten also die oben beschriebenen negativen ökologischen Folgen vermieden werden. Gleichwohl ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine abschließende Aussage nicht möglich, da die weitere Entwicklung der Wabeninnenflächen nicht bekannt ist. Erwartet wird, dass die Erosion auch in den naturbelassenen Wabeninnenflächen zumindest zum Stillstand kommt; in diesem Fall wären die ökologischen Auswirkungen zu vernachlässigen. Im günstigen Fall käme es zu einer gewissen Verfüllung der Waben mit Feinmaterial, das wahrscheinlich reicher an Carbonat und organischer Substanz ist, so dass sich eine Förderung der Unterwasservegetation und des Makrozoobenthos ergibt. Im schlechtesten Fall würde die Erosion in den Wabeninnenflächen nicht aufgehalten. Aus ökologischer Sicht würde sich damit am gegenwärtigen Zustand wenig ändern, allerdings wäre die Maßnahme aus denkmalpflegerischer Sicht wenig effizient, so dass schließlich die Innenflächen nachträglich verfüllt werden müssten.

## 8. Danksagung

An den Freiland-Probennahmen und den Laborarbeiten waren zahlreiche Kollegen und Helfer beteiligt, denen wir für ihre Einsatzbereitschaft, Ausdauer und Sorgfalt herzlich danken möchten. Die Taucharbeiten zur Makrophyten- und Makrozoobenthos-Probennahme wurden von Martin Mainberger geleitet, unterstützt durch Marco Wendlberger. Joachim Königer hat die Befüllung und das Einsetzen der Container-Proben besorgt. Über Wasser waren Christian Schmidt und Sebastian Kramer dabei. Die Laborarbeiten sowie die Makrozoobenthos-Zählungen wurden von Thomas Gretler organisiert. Ihm standen Christine Assmann, Gabriele

Dederer, Amanda Duckworth, Almut Hanselmann, Bettina Hodapp, Markus Pehr, Stefan Rimmele, Katja Schmidt und Simon Wieser zur Seite. Die Korngrößenanalysen der Feinsediment-Fraktionen wurden am Institut für Seenforschung der LUBW Langenargen unter der Leitung von Martin Wesels durchgeführt. Beim Amt für Archäologie des Kt. Thurgau, Frauenfeld und beim Landesamt für Denkmalpflege beim Regierungspräsidium Stuttgart, Arbeitsstelle Hemmenhofen, bedanken wir uns für die finanzielle Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.

## Literatur- und Quellenverzeichnis

Brem et al. 2001:

H. Brem/M. Schnyder/U. Leuzinger, Archäologische Schutzmassnahmen in den Seeufersiedlungen von Ermatingen TG-Westerfeld. Jahrbuch der Schweizerischen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte 84, 2001, 7–28.

Brem et al. 2013:

H. Brem/B. Eberschweiler/H. Schlichtherle, Gefährdetes Kulturgut im Bodensee und Zürichsee. In: H. Brem/B. Eberschweiler/G. Grabher/H. Schlichtherle/G. Schröder (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms »Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein« zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser. Vorarlberg Museum Schriften 1 (Bregenz 2013) 15–24.

Breunig/Demuth 1999:

Th. Breunig/S. Demuth, Rote Liste der Farn- und Samenpflanzen in Baden-Württemberg (Karlsruhe 1999) 246 S.

BUWAL 2002:

D. M. Moser/B. Bäuml/R. Palese/N. Wyler, Rote Liste der gefährdeten Arten der Schweiz. Farn- und Blütenpflanzen. BUWAL (Bern 2002) 118 S.

Dussling/Berg 2001:

U. Dussling/R. Berg (Bearb.), Fische in Baden-Württemberg. Hinweise zur Verbreitung und Gefährdung der freilebenden Neunaugen und Fische. Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (Langenargen 2001, 2. erw. und aktualisierte Auflage) 176 S.

Haberbosch 2004:

R. Haberbosch, Bestandssituation und Lebensraumansprüche der Groppe (*Cottus gobio*) im Bodensee-Obersee. Aquakultur- und Fischereieinformatoren. Informationsschrift der Fischereibehörden, des Fischgesundheitsdienstes und der Fischereiforschungsstelle Baden-Württemberg 2004, Heft 2, 22–24.

Kirchhofer et al. 2007:

A. Kirchhofer/M. Breitenstein/B. Zaugg, Rote Liste Fische und Rundmäuler. Rote Liste der gefährdeten Arten der Schweiz. BAFU (Bern 2007) 64 S.

Köninger/Schlichtherle 2013:

J. Köninger/H. Schlichtherle, Schutzmaßnahmen für Pfahlbausiedlungen am baden-württembergischen Bodenseeufer. Verfahrenstechniken, Bestand, Erfahrungen und Ausblick. In: H. Brem/B. Eberschweiler/G. Grabher/H. Schlichtherle/G. Schröder (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms »Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein« zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser. Vorarlberg Museum Schriften 1 (Bregenz 2013) 113–126.

Müller 1967:

G. Müller, Die Sedimentbildung im Bodensee. Die Naturwissenschaften 53, 1967, 237–250.

Ostendorp 2013:

W. Ostendorp, Erosionsinstabile Sedimentfraktionen in den Unterwasserdenkmal-Stationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen am Bodensee. In: H. Brem/B. Eberschweiler/G. Grabher/H. Schlichtherle/G. Schröder (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms »Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein« zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser. Vorarlberg Museum Schriften 1 (Bregenz 2013) 67–77.

Ostendorp et al. 2008a:

W. Ostendorp/M. Dienst/I. Kramer/M. Mainberger, Konzeption ökologischer Begleituntersuchungen bei der Sicherung von Unterwasserdenkmälern am Bodensee (UED-ÖBU). Bericht der Arbeitsgruppe Bodenseeufer (AGBU) e.V. für das Landesamt für Denkmalpflege beim RP Stuttgart und das Amt für Archäologie des Kt. Thurgau, Konstanz 2008, 93 S.

Ostendorp et al. 2008b:

W. Ostendorp/T. Gretler/M. Mainberger/M. Peintinger/K. Schmieder, Effects of mooring management on submerged vegetation, sediments and macro-invertebrates in Lake Constance, Germany. Wetlands Ecology and Management 17, 2009, 525–541.

Ostendorp et al. 2010:

W. Ostendorp/M. Dienst/I. Kramer/I. Strang, Ökologische Untersuchungen an der Erosionsschutzmassnahme Ermatingen-Westerfeld. Bericht für das Amt für Archäologie des Kt. Thurgau, Konstanz 2010, 40 S. + Anhänge.

Ostendorp et al. 2011:

W. Ostendorp/M. Dienst/I. Kramer/I. Strang, Ökologische Begleituntersuchungen an Erosionsschutzmaßnahmen im INTERREG IV-Projekt »Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee«. Abschlussbericht für das Landesamt für Denkmalpflege beim Reg.-Präs. Stuttgart, Konstanz 2011, 78 S. + Anhänge.

Ostendorp/Blum 1998:

W. Ostendorp/H. Blum, Hemmenhofener Methoden – Sedimentologische und paläolimnologische Methoden in der Siedlungsarchäologie. Siedlungsarchäologie im Alpenvorland VI. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 68 (Stuttgart 1998) 243–299.

Ostendorp/Härter 2013:

W. Ostendorp/C. S. Härter, Sohltransport in der Flachwasserzone des Bodensees: Methodenentwicklung und erste Ergebnisse. In: H. Brem/B. Eberschweiler/G. Grabher/H. Schlichtherle/G. Schröder (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms »Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein« zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser. Vorarlberg Museum Schriften 1 (Bregenz 2013) 79–93.

Phillipson/Teiber 2003:

S. Phillipson/P. Teiber, Bestandsaufnahmen von Fischen und Makrozoobenthos in renaturierten Bereichen des Bodenseeufer bei Sipplingen und Friedrichshafen. – Abschlussbericht im Auftrag der Gewässerdirektion Donau/Bodensee – Bereich Ravensburg, 2003.

Schmidt et al. 1996:

D. Schmidt/A. Garniel/U. Geissler/A. Gutowski/L. Kies/W. Krause/A. Melzer/R. Samietz/W. Schütz/K. Van de Weyer/H.-C. Vahle/M. Vöge/P. Wolff, Rote Liste der Armeleuchteralgen (Charophyceae) Deutschlands. 2. Fassung. Schriftenreihe für Vegetationskunde 28 (Bonn-Bad Godesberg 1996) 547–576.

UNESCO 2011:

UNESCO World Heritage Convention, Prehistoric Pile dwellings around the Alps. [whc.unesco.org/en/list/1363](http://whc.unesco.org/en/list/1363) [Juli 2011].