



HyMoBioStrategie

Pfahlbauten, Wellen, Sedimente und Klima in der Flachwasserzone des Bodensees

Seit Jahrzehnten lässt sich eine verstärkte Erosion der Sedimente in der Flachwasserzone des Bodensees beobachten. Diese wird wesentlich auf die zunehmenden Eingriffe des Menschen in den Bodensee zurückzuführen sein. Hafenanlagen, Strandbäder, Straßen, Bahnlinien oder einfach nur Ufermauern verändern nicht nur über dem Wasser das Aussehen der Ufer, sondern haben auch Auswirkungen auf Strömungsverhältnisse, Wellenhöhe und -frequenz in der Flachwasserzone. Ebenso ist der Schiffsverkehr ein erheblicher Auslöser von stärkeren Wellen und veränderten Strömungsverhältnissen, besonders im Sommerhalbjahr. Diese Faktoren wiederum beeinflussen die Flora und Fauna in der Flachwasserzone (Makrophyten und Makrozoobenthos), den Sedimenttransport und damit auch die Erhaltung prähistorischer Pfahlbauten im Uferschlamm unter Wasser.

Renate Ebersbach

Das Projekt: Gewässerstrukturen, Wasserpflanzen, Bodentiere

„HyMoBioStrategie – Auswirkungen hydromorphologischer Veränderungen von Seeufern (Bodensee) auf den Feststoffhaushalt, submerse Makrophyten und Makrozoobenthos-Biozönosen mit dem Ziel der Optimierung von Mitigationsstrategien“: so lautete der vollständige Titel des Projekts, das von 2015 bis 2018 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde.

Im Projekt HyMoBioStrategie wurden die Zusammenhänge zwischen Wellen, Erosion, Verkehr, Uferstrukturen, Wasserlebewesen und Klima untersucht und neue Modelle zu deren Bedeutung und gegenseitiger Beeinflussung entwickelt. Lösungsvorschläge und Strategien zur Verbesserung des ökologischen Zustands der Ufer und Flachwasserzonen in Seen wurden ebenso erarbeitet wie Empfehlungen zum nachhaltigen Management ausgesprochen. Das Projekt war unter der Federführung von Hilmar Hofmann an der Univer-

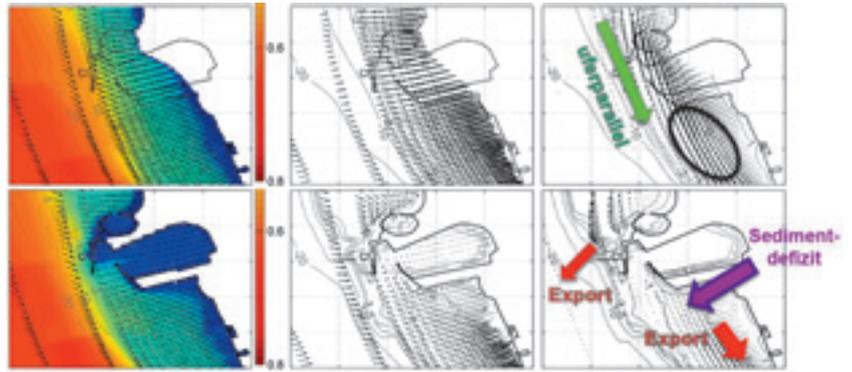
1 Winterliche Zustandskontrolle und Vermessungsarbeiten in der Flachwasserzone bei Hornstaad.



sität Konstanz angesiedelt. Partner in diesem interdisziplinären Verbundprojekt waren die Arbeitsgruppen für Umweltphysik und Aquatische Ökologie des Limnologischen Institutes der Universität Konstanz, das Analyse- und Planungsbüro lana•plan Dr. K. v. d. Weyer GbR, das Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik (IMBT), das Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) und das Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (LAD). Das Vorhaben war an der Schnittstelle zwischen Naturschutz, Wasserschutz und Denkmalschutz platziert und in die Bundesfördermaßnahme ReWaM ("Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz") eingebunden. Im Rahmen des Projekts wurden nicht nur Fallstudien in bekannten Pfahlbaustationen durchgeführt. Das Landesamt für Denkmalpflege konnte auch unmittelbar neue Messtechniken implementieren und im laufenden Monitoringplan Ergebnisse und Techniken aus dem Projekt anwenden (Abb. 1). Einige Aspekte und Ergebnisse des Projekts werden im Folgenden aus dem Blickwinkel der Denkmalpflege näher beleuchtet.

Wellen, Strömung und Sedimenttransport

Wellenschlag in der Flachwasserzone führt zur Umlagerung von Lockersedimenten wie Sanden, Schlick und Seekreide. Der Sedimenttransport in der Flachwasserzone von Seen ist meist uferparallel. Im Jahresdurchschnitt werden weniger als 5 cm durch Abtrag oder Akkumulation verlagert. Jahreszeitlich oder abhängig von Einzelereignissen wie Stürmen oder anlandenden und ablegenden Schiffen kann die Sedimentbilanz aber stark schwanken. In einem einzigen Sturmereignis können in der Flachwasserzone bis zu 2,5 cm mobile Sedimente aufgetragen bzw. erodiert werden. Messungen und Modellierungen von Schiffswellen haben aufgezeigt, dass diese während der Sommersaison eine ganz erhebliche zusätzliche Belastung der Flachwasserzone darstellen, die lokal bis zu 50 Prozent des gesamten Wellenschlags verursachen kann. In Uferabschnitten mit massiven strukturellen Veränderungen durch Hafenanlagen, Schiffsanleger und langgestreckten Ufermauern wird der natürliche, uferparallele Sedimenttransport unterbrochen. Das zum Beispiel durch Bäche eingebrachte Sediment wird insbesondere durch Querbauten ins tiefere Wasser abgeleitet. Auf der anderen Seite der Einbauten entstehen so Sedimentdefizite, die zur Erosion führen. Im Projekt wurde ein Sedimenttransportmodell entwickelt, das diese räumliche und zeitliche Dynamik beschreiben kann. In einer Fallstudie am Hafen von Unteruhldingen konnte



damit berechnet werden, dass genau dieser Mechanismus nach der Hafenerweiterung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu starker Erosion in der UNESCO-Fundstelle Unteruhldingen-Stollenwiesen geführt hat (Abb. 2). Zukünftig wird es mit diesem Sedimentmodell möglich sein, bereits im Vorfeld von Baumaßnahmen darzustellen, welche Auswirkungen diese auf den Sedimenthaushalt in der Flachwasserzone haben werden. Es kann auch zur Berechnung der optimalen Platzierung von denkmalpflegerischen Schutzmaßnahmen in gefährdeten Fundstellen zum Einsatz kommen.

Makrophyten und Makrozoobenthos

Die Zusammensetzung und Dichte von Unterwasservegetation und -fauna sind relevante Qualitätskriterien zur Beurteilung der Wasserqualität in der Flachwasserzone gemäß den Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Im Rahmen des Projekts konnte gezeigt werden, dass ein klarer Zusammenhang zwischen der Uferstruktur und der Arten-Zusammensetzung sowie Abundanz der Makrophyten besteht, während die Besiedlung mit

2 Modellierung von Wellen (links), Strömung (Mitte) und Sedimenttransport (rechts) im Bereich des Hafens von Unteruhldingen in heutiger Form (unten) und ohne Hafenanbauten (oben).

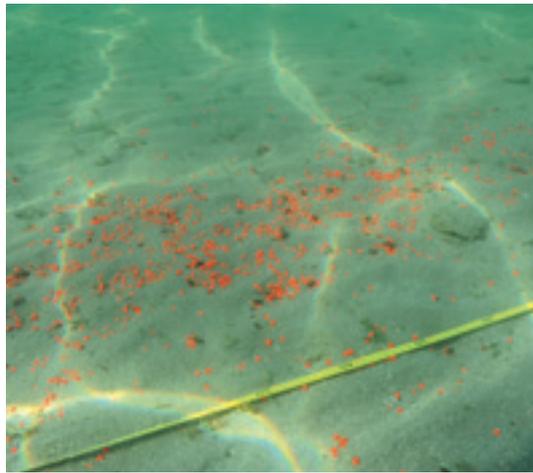
3 Denkmalpflegerische Schutzmaßnahme in Litzelstetten Krähenhorn 2009: Umladen von Kies für Schüttungen auf eine kleine Kiesschute.





4 *Klassische Erosionsmarker: Eichenpflocke mit Markierungen, an denen die Erosion/Akkumulation abgelesen wird.*

5 *Kontrolle der Streuung von Tracern (künstliche Steine mit farbiger Markierung) in den dynamischen Flachwasser-Sedimenten vor Litzelstetten.*



Makrozoobenthos mehr durch das Substrat, Wasserspiegelschwankungen und Wellenexposition beeinflusst wird. In renaturierten Uferabschnitten und Bereichen mit denkmalpflegerischen Erosionsschutzeinbauten ist die Wiederbesiedlung durch Makrozoobenthos sehr schnell, wohingegen Makrophyten diese aufgrund der fehlenden Feinsedimente erst nach einigen Jahren wieder vollständig besiedeln. Daraus ergeben sich neue Empfehlungen für die möglichst umweltverträgliche Gestaltung von denkmalpflegerischen Schutzeinbauten. Die gefährdeten Bereiche einer Fundstelle werden seit den 1990er Jahren mit Geotextil und Kieschüttungen gesichert (Abb. 3). Um die Ansiedlung von Unterwasservegetation zu beschleunigen und die Einwanderung ortsfremder Arten zu verhindern, sollte dabei in Zukunft kein ortsfremdes Material mehr verwendet werden und die Körnung der Schüttungen stark gemischt sein mit einem gewissen Anteil der feinen Fraktion von 8 bis 16 mm.

Neue Techniken und autonome Messsysteme

Im Rahmen des Projekts wurden neue Methoden und Geräte zur Messung des Feststofftransportes entwickelt, die auch der Denkmalpflege zugutekommen. Vom Limnologischen Institut der Univer-

sität Konstanz speziell entwickelte farbige Kies- und Gerölltracer erlauben eine einfache Beurteilung der Stabilität von Schutzeinbauten. Auf den ersten Blick wird sichtbar, ob, wohin und wie weit sich die eingebauten Materialien im Wasser verfrachten (Abb. 5). Neben den klassischen Erosionsmarkern (Abb. 4) lassen sich auch andere, zum Beispiel akustische Verfahren zur flächigen Messung von Erosion oder Akkumulation einsetzen. Gleichzeitig wird die ermittelte Datenmenge und Datendichte wesentlich größer werden, was im Vergleich zu den bisherigen Punktinformationen von einzelnen Erosionsmarkern eine deutlich bessere, weil flächige Datenqualität zum Erosions- und Akkumulationsgeschehen ergeben wird. Das Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik entwickelte mit dem „Hydrocrawler“ ein autonom auf dem Wasser fahrendes Trägerfahrzeug für verschiedenste Messsysteme mit sehr genauer räumlicher Positionierung im Zentimeterbereich (Abb. 6). Es kann zur hochauflösenden, flächendeckenden Vermessung der Seebodentopografie und Sedimentstratigrafie mit verschiedensten Techniken oder zur filmischen, fotografischen und vermessungstechnischen Inspektion von Pfahlfeldern oder Schutzeinbauten eingesetzt werden. Die Anwendung solcher Techniken wird in der nahen Zukunft dazu führen, dass mit weniger Aufwand mehr und höher aufgelöste dreidimensionale Daten zu den Denkmälern unter Wasser und den dynamischen Veränderungen im Umfeld gewonnen werden können.

Systematische Bestandsaufnahme der prähistorischen Ufersiedlungen

Während des Projekts zeigte sich, dass unser Wissen über den Erhaltungszustand der einzelnen Unterwasserdenkmale am Bodensee sehr unterschiedlich ist. In manchen Stationen wird seit Jahren regelmäßig der Zustand kontrolliert und es liegen umfangreiche Messreihen von den dort installierten Erosionsmarkern vor; andere wurden seit 30 Jahren nicht mehr überprüft. Die letzte sys-

Glossar

Abundanz

Anzahl der Individuen einer Art bezogen auf ihren charakteristischen Aufenthaltsort, ihr Habitat.

Akkumulation

Anhäufung, in diesem Fall von Sediment, zum Beispiel Seekreiden oder Sande.

Biozönose

Lebensgemeinschaft von Pflanzen und Tieren in einem bestimmten Biotop.

6 *Der Hydrocrawler bei einer Testfahrt in Unteruhldingen.*

7 *Ablese von Erosionsmarkern mit GPS im Winter bei Niedrigwasser.*



tematische Übersicht entstand 2009 bei der Antragstellung der Prähistorischen Pfahlbauten zur Aufnahme als UNESCO-Welterbe. Das Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie hat zusammen mit dem Pfahlbauten-Informationszentrum deshalb einen über fünf Jahre angelegten Monitoringplan entwickelt (2018–2022). In diesem Zeitraum wird für alle bekannten Seeufersiedlungen eine systematische Bestandsaufnahme durchgeführt, die als Grundlage für die weitere Gefährdungsbeurteilung der Fundstellen dient. Das Ziel dieser Erhebungen sind einheitliche, nach Möglichkeit dreidimensionale Rauminformationen über den geologischen Untergrund und die Höhenverhältnisse des jeweiligen Uferabschnittes sowie die Lage und Ausdehnung der bekannten Kulturschichtreste und Pfahlfelder. Beobachtungen zu den die Schichten abdeckenden und schützenden Decksedimenten und deren Erosion oder Akkumulation werden durch die Messreihen der Erosionsmarker ergänzt (Abb. 7). Überprüft und kartiert werden auch Erosionskanten und -flächen sowie der Zustand eingebauter Schutzmaßnahmen wie zum Beispiel Abdeckungen. Schließlich ist die Dokumentation der Makrophyten und Unterwasserfauna wichtig, denn diese ist in den letzten Jahren starken Veränderungen unterworfen. So konnte sich die invasive Quagga-Muschel (*Dreissena rostriformis*) innerhalb weniger Jahre flächig über den Bodensee ausbreiten und hat inzwischen auch mehrere Pfahlbauten flächendeckend besiedelt. Zum Programm gehören auch Drohnenaufnahmen der entsprechenden Uferabschnitte, die ebenfalls einen Eindruck über die Ausdehnung von Pfahlfeld, Schilfgürtel oder Unterwasserbewuchs vermitteln (Abb. 8). In einigen Stationen sind neue Vermessungen notwendig. Auch kleine Sondierschnitte werden in Einzelfällen angelegt, um die Anzahl der Kulturschichten zu überprüfen und im Idealfall datierbare Funde oder Holzproben für die dendrochronologischen Datierungen zu gewinnen. Die betreffenden Informationen werden auf einer Datenbank-basierten GIS-Plattform zusammengeführt und ausgewertet. Dabei werden auch alle älteren Informationen zum Zustand der Fundstellen integriert wie zum Beispiel von taucharchäologischen Untersuchungen aus dem 20. Jahrhundert oder historischen Luftbildern. Auf dieser Grundlage können anschließend Uferabschnitte oder einzelne Fundstellen identifiziert werden, die besonders stark von Erosion oder Umweltveränderungen betroffen sind und deshalb in Zukunft in den Fokus unserer Untersuchungen und Schutzmaßnahmen gerückt werden müssen. Mittel- und langfristig ist nicht nur die – oft schleichende – Erosion von schützenden Decksedimenten eine Gefahr für die Fundstellen, sondern auch die Lage zum Beispiel in Strandbädern oder Häfen, in denen



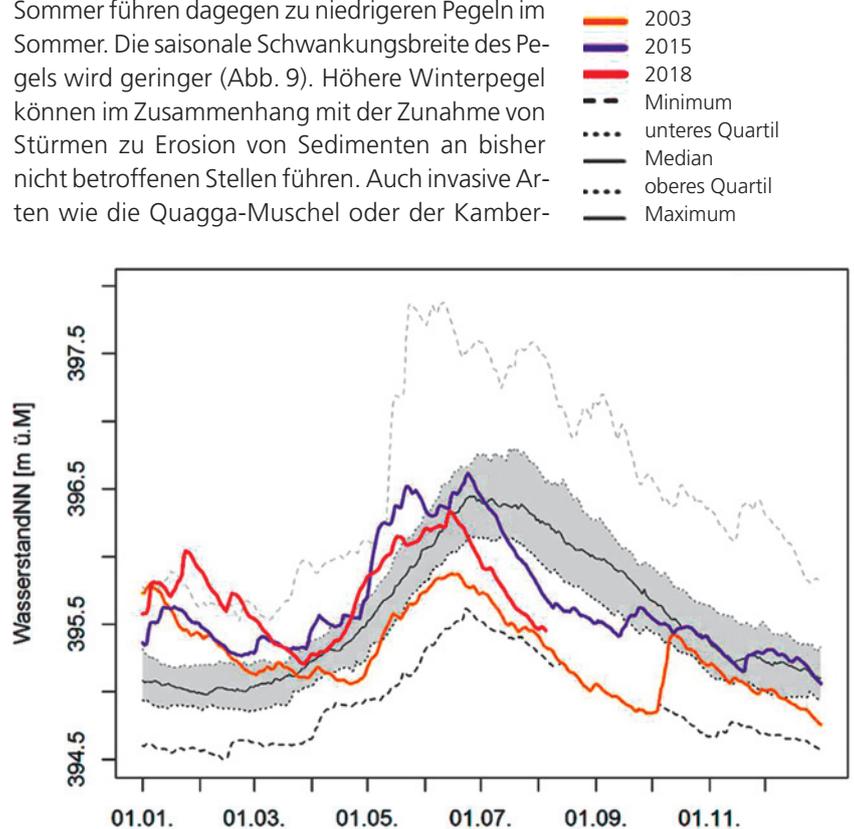
intensiver Publikumsverkehr herrscht und immer wieder Baumaßnahmen stattfinden müssen, zum Beispiel die Ausbaggerung von Fahrrinnen oder Sprungbecken.

Steigende Temperaturen und veränderte Seepiegel

Zu berücksichtigen bei der Gefährdungsbeurteilung sind zukünftig auch Auswirkungen von klimatischen Veränderungen auf den Bodensee und insbesondere die Flachwasserzone. In den letzten Jahren konnten steigende Wassertemperaturen und sich verändernde Seepiegel beobachtet werden. Durch die wärmeren Winter ist der Pegel im ersten Viertel des Jahres durchschnittlich höher als früher, da weiterhin aus dem alpinen Einzugsgebiet viel Wasser in den See kommt. Heiße, trockene Sommer führen dagegen zu niedrigeren Pegeln im Sommer. Die saisonale Schwankungsbreite des Pegels wird geringer (Abb. 9). Höhere Winterpegel können im Zusammenhang mit der Zunahme von Stürmen zu Erosion von Sedimenten an bisher nicht betroffenen Stellen führen. Auch invasive Arten wie die Quagga-Muschel oder der Kamber-

8 Drohnenaufnahme der Flachwasserzone vor Litzelstetten 2020. Man erkennt gut die eingebrachten Schutzschüttungen (vgl. Abb. 3).

9 Saisonale Entwicklung des Bodensee-Pegels bei Romanshorn während der Hitzejahre 2003, 2015 und 2018.





10a und b Ausbreitung von Helvetischem Laichkraut im Konstanzer Trichter. Links: 2011, rechts: 2018.

Hydrocrawler

Ein autonom fahrendes Messfahrzeug, das vom Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik (Saarbrücken) unter der Leitung von Christian Degel im Rahmen des Projekts entwickelt wurde.

Hydromorphologie

Beschreibt die tatsächlich vorhandenen Gewässerstrukturen und das davon abhängende Abflussverhalten in Raum und Zeit.

Makrophyten

Wasserpflanzen, die aufgrund ihrer Größe als einzelnes Individuum mit bloßem Auge erkennbar sind.

Makrozoobenthos

Alle am Gewässerboden lebenden Tiere bis zu einer Größe, die mit dem bloßen Auge noch erkennbar ist.

Mitigationsstrategie

Eine Strategie zur Abschwächung/Milderung von Auswirkungen, in diesem Fall Auswirkungen der hydromorphologischen Veränderungen an Seeufern.

krebs können Auswirkungen auf die Erhaltung der jahrtausendealten Kulturschichtreste haben (vgl. Beitrag Goldhammer S. 234 in diesem Heft). Deren Ausbreitung und Auswirkungen müssen deshalb engmaschig beobachtet werden. Quagga-Muscheln etwa setzen sich an aus dem Seegrund herausragenden Pfählen fest, was zu einer Vergrößerung der Oberfläche und damit zu einer stärkeren Gefährdung durch Wellenschlag und Strömung führt. Andererseits bedecken sie auch die mobilen Sedimente am Seeboden flächig mit festen Krusten, was wiederum die Erosion dieser Sedimente verringert – aber auch die taucharchäologischen Untersuchungen erschwert. In den letzten Jahren konnte auch eine flächige Ausbreitung des helvetischen Laichkrautes (*Potamogeton helveticus*) im Konstanzer Trichter beobachtet werden (Abb. 10). Diese mehrere Meter hohe Unterwasserpflanze bedeckt den Seeboden in Teppichen, was zu einer starken Reduktion von bodennaher Strömung und damit auch von Erosion am Seeboden führt.

Der Druck auf den See wächst

Und schließlich wird der Druck auf den See und seine Ufer durch die wachsende Bevölkerung und die intensive touristische Nutzung immer größer. Intensiver Bootsverkehr, besonders in Ufernähe, führt auch im Sommer zu immer höheren Belastungen der Ufer mit Wellenschlag. Viele Seegemeinden versuchen, neue Baugebiete in unmittelbarer Ufernähe zu erschließen. Neuentdeckungen prähistorischer Siedlungsbefunde in unmittelbarer Wassernähe wie zuletzt in Bodman oder bei Hegne zeigen an, dass sich direkt hinter der heutigen Uferlinie weitere Denkmale im Boden befinden. Zudem wissen wir bisher nur von wenigen Seeufersiedlungen genau, wie weit sich diese landwärts erstrecken. Die Areale oberhalb der Mittelwasserzone und weiter hangaufwärts werden deshalb mittel-

fristig ebenfalls in den Fokus eines planmäßigen denkmalpflegerischen Monitorings rücken müssen.

Literatur

Renate Ebersbach/Martin Mainberger/Julia Goldhammer/Wolfgang Ostendorp: Archäologische Denkmalpflege in der Uferzone des Bodensees, in: Seeufer: Wellen – Erosion – Schutz – Renaturierung. Handlungsempfehlungen für den Gewässerschutz – Ergebnisse aus dem ReWaM-Verbundprojekt HyMo-BioStrategie (2015–2018), hg. v. Hilmar Hofmann und Wolfgang Ostendorp, Konstanz 2019, S. 119–126. <https://dx.doi.org/10.18148/KOPS/HMBS>. 2018.001 (Zugriff am 07. 10. 2021).

Praktischer Hinweis

Weitere Informationen zum Projekt unter: www.hymbiostrategie.de; Zu den Pfahlbauten generell: www.palafittes.org (international), www.unesco-pfahlbauten.de (in Deutschland); Zu Klimawandel und invasiven Arten: www.igkb.org/aktuelles/klimbo-klimawandel-am-bodensee/oder www.neozoen-bodensee.de/aktuelles. Museum mit Nachbauten im Freilichtareal am Federsee: www.federseemuseum.de Freilichtmuseum Unteruhldingen am Bodensee: www.pfahlbauten.de Weitere Informationen zu Pfahlbauten (und zu vielem anderem) im Raum Bodensee-Federsee-Schweiz: www.bodensee.eu/de/was-erleben/kultur/unesco-weltkulturerbe

Dr. Renate Ebersbach
Landesamt für Denkmalpflege
im Regierungspräsidium Stuttgart
Dienstszitz Hemmenhofen