

Seeufer: Wellen - Erosion - Schutz - Renaturierung

Handlungsempfehlungen für den Gewässerschutz -
Ergebnisse aus dem ReWaM-Verbundprojekt
HyMoBioStrategie (2015-2018)

Hilmar Hofmann und Wolfgang Ostendorp

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FONA
Nachhaltiges
Wassermanagement
BMBF

NaWaM
Nachhaltiges Wassermanagement



ReWaM

Seeufer: Wellen - Erosion - Schutz - Renaturierung

Handlungsempfehlungen für den Gewässerschutz -
Ergebnisse aus dem ReWaM-Verbundprojekt
HyMoBioStrategie (2015-2018)

Hilmar Hofmann und Wolfgang Ostendorp

Konstanz 2019

Impressum

© 2019 Die Rechte liegen bei den Autoren.

1. Auflage

Umschlaggestaltung: Dörfel Multivitamine, Konstanz

Lektorat, Korrektorat: W. Ostendorp, *ecoconcept+pictures*, Freiburg

Herausgeber: Hilmar Hofmann und Wolfgang Ostendorp, Limnologisches Institut der Universität Konstanz, Arbeitsgruppe Umweltphysik, Mainaustraße 252, 78464 Konstanz

Verlag und Druck: Universität Konstanz, Druckservice, Universitätsstraße 10, 78464 Konstanz

ISBN: 978-3-89318-080-6

Bildnachweis: Sofern in der Bildlegende nicht anders angegeben, stammen alle Abbildungen von den Autoren (Urheber). Die Bildrechte liegen bei den Autoren.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages und des Autors unzulässig. Dies gilt insbesondere für die elektronische oder sonstige Vervielfältigung, Übersetzung, Verbreitung und öffentliche Zugänglichmachung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Hofmann, H. und Ostendorp, W. (Hrsg.). Seeufer: Wellen - Erosion - Schutz - Renaturierung. Handlungsempfehlungen für den Gewässerschutz - Ergebnisse aus dem ReWaM-Verbundprojekt HyMoBioStrategie (2015-2018). Konstanz, VIII + 155 S., ISBN 978-3-89318-080-6. DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.001.

Kurzfassung:

Die Ufer vieler mitteleuropäischer Seen unterliegen erheblichen hydromorphologischen Beeinträchtigungen, die den Umweltzielen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) entgegenstehen und das UNESCO-Welterbe 'Prähistorischen Pfahlbauten um die Alpen' gefährden. In einem interdisziplinären Projekt wurden am Beispiel des Bodensee-Obersees Arbeitstechniken und Strategien entwickelt, mit denen die Beeinträchtigungen analysiert und z. B. mit Hilfe von Erosionsschutz- und Renaturierungsmaßnahmen minimiert werden können. Im Fokus stehen Klassifikations- und Bewertungsverfahren der Uferstruktur, die Analyse von Schiffs- und Windwellen, Strömungs- und Suspensionstransport-Modellierung, die Messung des Sohltransports und des Feststoffhaushalts, die Messung und das langfristige Monitoring der flächenhaften Erosion und der Sedimentakkumulation in der Flachwasserzone, ein UW-Georadar zur Erkundung der Sedimentstratigraphie, die Funktionalität und die Anwendung der autonomen Messplattform 'Hydrocrawler' sowie die Auswirkungen auf submerse Wasserpflanzen (Makrophyten), Bodentiere (Makrozoobenthos) und den Erhaltungszustand der Unterwasserdenkmäler. In zehn Einzelbeiträgen werden die Projektergebnisse zusammengefasst. Daraus werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, die auch an anderen Alpenseen und darüber hinaus anwendbar sind.

Für die Inhalte dieses Sammelwerks sind allein die Autoren der jeweiligen Kapitel verantwortlich. Die Autoren sind auch für die Einhaltung von Copyrights und anderer Rechte Dritter sowie für die Einhaltung der Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis ihrer jeweiligen Institutionen verantwortlich. Das Copyright liegt bei den Autoren.

Hofmann, H. and Ostendorp, W. (eds.). Lakeshores: Waves - Erosion - Protection - Restoration. Recommendations for Action in Water Protection - Results from the ReWaM Joint Project HyMoBioStrategie (2015-2018). Konstanz, VIII + 155 pp., ISBN 978-3-89318-080-6. DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.001.

Abstract:

The shores of many central European lakes are subject to considerable hydromorphological impairments that conflict with the environmental objectives of the EC Water Framework Directive (WFD) and endanger the UNESCO World Heritage Site 'Prehistoric Lake Dwellings around the Alps'. In an interdisciplinary project, working techniques and strategies were developed, on the basis of the example of Upper Lake Constance, with which the impairments can be analysed, and minimised, e.g. by erosion protection and restoration measures. The focus is on classification and evaluation procedures of the relevant structural features in the littoral, the analysis of ship and wind waves, currents and suspension transport modelling, the measurement of bed transport and the solid matter budget, the measurement and long-term monitoring of lake bed erosion and sediment accumulation in the shallow water zone, an underwater georadar for the exploration of the sediment stratigraphy, the functionality and application of the autonomous measuring platform 'Hydrocrawler' as well as the effects on submerged aquatic plants (macrophytes), bottom animals (macrozoobenthos) and the preservation status of the underwater monuments. The project results are summarised in ten individual contributions. From this, recommendations for action are derived which can also be applied to other Alpine lakes and beyond.

The authors of the respective chapters are solely responsible for the contents of this compilation. The authors are also responsible for the observance of copyrights and other rights of third parties as well as for the observance of the rules of good scientific practice of their respective institutions. The copyright lies with the authors.

Vorwort

Vorwort



Die Ufer vieler mitteleuropäischer Seen unterliegen erheblichen hydromorphologischen Beeinträchtigungen: Seespiegelmanipulationen, Uferverbauungen und Schifffahrt führen zu Veränderungen der hydrodynamischen Bedingungen in der Flachwasserzone, die sich auf die Oberflächensedimente, den Feststofftransport, die Unterwasservegetation und bodenlebende Tiere auswirken können. Über die Prozesszusammenhänge zwischen Uferverbauungen und den hydrodynamischen Bedingungen auf der einen, und der biozönotischen Struktur in der Uferzone auf der anderen Seite, ist wenig bekannt. Darüber hinaus wird in vielen Alpenseen eine anhaltende Erosion der Flachwasser-Sedimente beobachtet. Augenscheinlich wird die Erosion im Bereich archäologischer Unterwasserdenkmäler, von denen viele als UNESCO-Welterbestätten ausgewiesen sind. Es besteht daher ein großes Interesse an Methoden und Arbeitstechniken, die es erlauben, die Ursache-Wirkungs-Beziehungen besser einschätzen zu können. Ziel ist es, im Einklang mit der EG-Wasserrahmenrichtlinie, den gemeinschaftlichen Naturschutzziele und der Denkmalschutzgesetzgebung die Strategien für ein nachhaltiges Management der Seeufer zu optimieren, hydromorphologische Belastungen zu vermeiden und bereits strukturell beeinträchtigte Uferabschnitte durch Renaturierungsmaßnahmen ökologisch zu verbessern.

Vor diesem Hintergrund haben sich Wissenschaftler*innen unterschiedlicher Forschungsrichtungen, Anwender*innen aus Wasser- und Denkmalschutzbehörden, Ufergemeinden und Nichtregierungsorganisationen vernetzt, um am Beispiel des Bodensees gemeinsam Wege hin zu intakten Seeufern zu erarbeiten. Im ReWaM-Verbundprojekt *HyMoBioStrategie* wurde dieser interdisziplinäre Ansatz genutzt, um die komplexen Prozesszusammenhänge zwischen einer veränderten Uferstruktur und den daraus folgenden hydromorphologischen Bedingungen und der biozönotischen Struktur zu identifizieren und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Nach dreieinhalbjähriger Arbeit wurden am 17. Oktober 2018 die Ergebnisse von den beteiligten Partnern im Rahmen der HyMoBioStrategie-Abschlussveranstaltung im Kloster Hegne –

mit Blick auf das röhrichtbewachsene Ufer des Bodensees – einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt und diskutiert. Die hauptsächlichlichen Ergebnisse umfassen:

- neue Messmethoden und Modellsysteme zur Charakterisierung und Quantifizierung des Feststofftransportes in der Flachwasserzone von Seen,
- hochauflösende, flächendeckende Vermessung der Seebodentopographie und Sedimentstratigraphie (Hydrocrawler, Unterwassergeoradar),
- Beiträge zur Verbesserung der Beurteilungsverfahren des ökologischen Zustands von Seeufern gemäß EG-WRRL anhand der beiden biotischen Qualitätskomponenten Makrophyten und Makrozoobenthos,
- weiterentwickelte Qualitäts- und Monitoringstandards im Zuge von Seeuferrenaturierungen basierend auf dem IGKB-Renaturierungsleitfaden,
- Weiterentwicklung von Monitoringverfahren zur Einschätzung der Erosionsgefährdung von Unterwasserdenkmälern,
- Handlungsempfehlungen zum nachhaltigen Management von Flachwasserzonen in Seen.

Die hiermit vorgelegten Handlungsempfehlungen ‘Seeufer: Wellen - Erosion - Schutz - Renaturierung’ richten sich an Fachleute aus den Verwaltungen, Planungs- und Beratungsbüros und der angewandten Forschung, die aus unterschiedlicher Perspektive mit der Erforschung, dem Schutz und der Entwicklung von Seeufern befasst sind. Sie stellen eine erweiterte Synthese der Ergebnisse des Projekts dar und betten diese aus verschiedenen Blickwinkeln in den breiten thematischen Kontext – Nutzung und hydromorphologische Integrität der Seeufer – ein. Gebietskulisse sind die Seen des Alpenraums, wofür der Bodensee ein Beispiel bietet. Die Handlungsempfehlungen bilden den aktuellen Stand der Forschung auf diesem Gebiet ab und sind ein wichtiger Baustein zu einem nachhaltigen Management von Seeuferzonen unter Berücksichtigung der vorhandenen intensiven Nutzungsansprüche und Nachhaltigkeitskonflikte.

Das ReWaM-Verbundprojekt HyMoBioStrategie: 'Auswirkungen hydromorphologischer Veränderungen von Seeufern (Bodensee) auf den Feststoffhaushalt, submerse Makrophyten und Makrozoobenthos-Biozönosen mit dem Ziel der Optimierung von Mitigationsstrategien' wurde im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme 'Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)' gefördert, die zum Förderschwerpunkt 'Nachhaltiges Wassermanagement' (NaWaM) als Teil von 'Forschung für nachhaltige Entwicklungen' (FONA) gehört.

An dem interdisziplinären Verbundprojekt waren die beiden Arbeitsgruppen Umweltphysik und Aquatische Ökologie am Limnologischen Institut der Universität Konstanz, das Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg, das Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik (IBMT), das Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) und das Analyse- und Planungsbüro lana • plan Dr. K. v.d. Weyer GbR beteiligt. Als assoziierte Partner haben das Regierungspräsidium Tübingen, die Bodenseegemeinden Kressbronn und Hagnau, die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), das Landesamt für Umwelt Brandenburg, das Bayerische Landesamt für Umwelt, das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege, das Amt für Archäologie des Kantons Thurgau sowie die Arbeitsgruppe Bodenseeufer (AGBU) und der Landesfischereiverband Baden-Württemberg teilgenommen.

Unser besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts, dem Projektträger Jülich (PTJ) für die Projektbegleitung, dem Vernetzungs- und Transfervorhaben *ReWaMnet*

für die Vernetzung zwischen den Forschungsverbänden und die Sichtbarkeit des Projekts sowie für die Unterstützung bei der Abschlussveranstaltung, außerdem den lokalen Behörden für die vielfältigen Unterstützungen.

Unser Dank gilt unseren wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter*innen, studentischen Hilfskräften und den Forschungstauchern, ohne deren Ausdauer und Einsatzbereitschaft, namentlich bei schwierigen Arbeiten auf dem See, das Verbundprojekt nicht so erfolgreich hätte abgeschlossen werden können.

Nicht zuletzt möchten wir uns bei allen assoziierten Projektpartnern für die anregenden Diskussionen und bei vielen, hier nicht namentlich zu nennenden Personen am See für ihr Entgegenkommen und ihre Unterstützung bedanken.

Dem Büro ecoconcept+pictures GbR danken wir für die Koordination bei der Erstellung, der redaktionellen Überarbeitung und dem Lektorat des Bandes. Für die graphische Gestaltung des Covers und die Drucklegung des Bandes bedanken wir uns bei der Firma dörfli-Multivitamine GbR. Unser Dank gilt nicht zuletzt den Autoren der Beiträge.

Mit den thematisch breit gefächerten Handlungsempfehlungen wollen wir über den aktuellen Wissensstand hinaus all denjenigen Impulse für die angewandte Forschung, Anregungen für die Implementierung in die Praxis und Denkanstöße für die zukünftige Arbeit geben, denen das nachhaltige Management der Seeuferzone am Herzen liegt.

Weitere Informationen, Bild- und Filmmaterial zum ReWaM-Verbundprojekt HyMoBioStrategie finden sich unter www.hymbiostrategie.de.

Hilmar Hofmann (Projektleiter und -koordinator)

Karl-Otto Rothhaupt und **Frank Peeters**

Universität Konstanz

Christian Degel

Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik

Renate Ebersbach und **Helmut Schlichtherle**

Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg

Martin Wessels

Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Klaus van de Weyer

lana • plan GbR

Konstanz, im Oktober 2019

Inhalt

Inhalt

Hilmar Hofmann, Murat Aydin, Christian Degel, Renate Ebersbach, Lothar Heissel, Karl-Otto Rothhaupt, Ioanna Salvarina, Helmut Schlichtherle, Klaus van de Weyer, Martin Wessels und Wolfgang Ostendorf	
1	Einleitung 1 - 6
Wolfgang Ostendorf	
2	Seen und ihre Ufer 7 - 16
Wolfgang Ostendorf und Hilmar Hofmann	
3	Hydromorphologie der Seeufer 17 - 30
Martin Wessels und Jens Hornung	
4	Unterwassergeoradar zur Untersuchung von Sedimenten der Flachwasserzone 31 - 36
Christian Degel	
5	Autonome Messplattform ‚HydroCrawler‘ - System zur hochauflösenden Gewässervermessung 37 - 44
Hilmar Hofmann	
6	Messung und Modellierung von Wellen, Strömungen und Sedimenttransport in der Flachwasserzone von Seen 45 - 64
Wolfgang Ostendorf, Christian Degel, Renate Ebersbach, Helmut Schlichtherle und Hilmar Hofmann	
7	Messtechniken zur Erfassung des Feststoffhaushalts in der Seeuferzone 65 - 84
Wolfgang Ostendorf, Ioanna Salvarina und Karl-Otto Rothhaupt	
8	Ökologische Auswirkungen von Seeufermauern 85 - 96
Hilmar Hofmann, Ioanna Salvarina, Karl-Otto Rothhaupt, Martin Wessels und Wolfgang Ostendorf	
9	Die Fahrgastschiffahrt als Stressor in der Flachwasserzone von Seen 97 - 116
Renate Ebersbach, Martin Mainberger, Julia Goldhammer und Wolfgang Ostendorf	
10	Archäologische Denkmalpflege in der Uferzone des Bodensees 117 - 126
Murat Aydin	
11	Uferrenaturierungen am Bodensee - Empfehlungen des Regierungspräsidiums Tübingen, Landesbetrieb Gewässer 127 - 138
Glossar	
Autoren	

Kapitel 1

Einleitung

Hilmar Hofmann, Murat Aydin, Christian Degel, Renate Ebersbach, Lothar Heissel, Karl-Otto Rothhaupt, Ioanna Salvarina, Helmut Schlichtherle, Klaus van de Weyer, Martin Wessels und Wolfgang Ostendorf ¹



In den Ländern der Europäischen Union besitzen mehr als 14.050 Seewasserkörper eine Oberfläche von $>0,5 \text{ km}^2$ ([3]). Die gesamte Uferlänge dieser Seen wird auf 203.700 km geschätzt, was fast dem Dreifachen der Länge des europäischen Autobahnnetzes entspricht. Diese Zahlen verdeutlichen die große Bedeutung naturnaher Seeufer als Übergangsbereich (Ökoton) zwischen dem freien See (Pelagial) und den umliegenden Feuchtgebieten und Landflächen ([4], [13], [15]).

Seeufer weisen aufgrund der strukturellen Vielfalt auf kleinem Raum eine sehr hohe **Biodiversität** auf, die es zu schützen und zu erhalten gilt. Die Sedimentablagerungen des Tiefenbeckens und der Seeuferzone stellen bedeutende Archive der Seen-, Klima- und Umweltgeschichte dar. Zudem enthalten viele Voralpenseen, aber auch Seen in anderen Teilen Europas, archäologische Fundstätten, die meist in die Ufersedimente eingelagert sind. Im Fall der prähistorischen Pfahlbauten (UNESCO-

Welterbe seit 2011, [14]) stellen sie Kulturdenkmale von besonderer Bedeutung im Sinne der Denkmalschutzgesetzgebung dar.

Naturnah erhaltene Ökosysteme gelten im Vergleich zu anthropogen vorbelasteten Ökosystemen als besser geeignet, *„den nachfolgenden Generationen eine Welt [zu] überlassen, die ihnen nicht weniger als den heutigen Generationen die Erfüllung ihrer Bedürfnisse gestattet“* ([5]). Das Bekenntnis zur **Nachhaltigkeit** beinhaltet den Schutz der Seeufer und ihrer Lebensgemeinschaften vor weiterer menschlicher Inanspruchnahme, die Verbesserung des Zugangs zum Ufer für die Allgemeinheit und die Renaturierung (CH: Revitalisierung) der Ufer. Der Schutz und die Erhaltung der prähistorischen Pfahlbauten im Seeuferbereich sind weitere wichtige Aufgaben, die durch die Ernennung zum UNESCO-Welterbe noch unterstrichen werden.

¹ Hilmar Hofmann und Wolfgang Ostendorf, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umweltphysik, hilmar.hofmann@uni-konstanz.de, wolfgang.ostendorf@uni-konstanz.de; Lothar Heissel und Murat Aydin, Regierungspräsidium Tübingen, Ref. 53.2 Gewässer 1. Ordnung, Hochwasserschutz Neckar-Bodensee, lothar.heissel@rpt.bwl.de, murat.aydin@rpt.bwl.de; Christian Degel, Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik, Hauptabteilung Ultraschall, christian.degel@ibmt.fraunhofer.de; Renate Ebersbach und Helmut Schlichtherle, Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie, renae.ebersbach@rps.bwl.de, helmut.schlichtherle@rps.bwl.de; Karl-Otto Rothhaupt, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie, karl.rothhaupt@uni-konstanz.de; Ioanna Salvarina, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie, derzeit: Aristotle University of Thessaloniki, School of Biology, Laboratory of Ichthyology, Thessaloniki (Griechenland), iosalvarina@auth.gr; Klaus van de Weyer, Lana Plan GbR, Nettetel, klaus.vdweyer@lanaplan.de; Martin Wessels, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Institut für Seenforschung (ISF), martin.wessels@lubw.bwl.de.

In vielen Teilen Mitteleuropas unterliegen die Seeufer seit Mitte des 19. Jahrhunderts einem erheblichen **anthropogenen Nutzungsdruck**, der sich in den vergangenen Jahrzehnten noch einmal verstärkt hat. Seespiegelmanipulationen, Produktionsumstellungen in der Landwirtschaft, Aufschüttungen und Uferbefestigungen, Überbauung mit Siedlungen und Industrieanlagen, Verkehrsinfrastruktur, Freizeit-Einrichtungen, Häfen und Steganlagen sowie die Schifffahrt selbst haben zu hydromorphologischen Veränderungen der Seeufer geführt, die die Existenzbedingungen einer naturnahen Tier- und Pflanzenwelt gefährden ([9], [11], [13], [17]). Am Bodensee sind diese anthropogenen Veränderungen der Seeufer in der Bodensee-Uferbewertung der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) dokumentiert ([5], [15]). Demnach sind 41 % des Seeufers naturfern oder naturfremd, weitere 19 % gelten als beeinträchtigt.

„Wenn das natürliche Ufer durch ein künstliches, durch Mauern oder gemauerte Böschungen, ersetzt wird, so leidet darunter das für den Naturhaushalt des Sees unentbehrliche Tier- und Pflanzenleben“, hielt der Konstanzer Baurat Emil Reisser im Jahr 1926 fest². Seither sind mehr als neunzig Jahre vergangen. Die schon damals klar erkannte Problemlage hat sich seither weiter verschärft, aber die angewandte **Umweltforschung** und deren Ergebnisumsetzung hat mit dem Nutzungsdruck, der auf den Seeufern lastet, nicht Schritt halten können. Neben den bestehenden Konzepten sind weitere Bestrebungen hin zu integrierten Handlungsstrategien unter Berücksichtigung der aktuellen Forschungsergebnisse notwendig ([11]). Diese sollten nicht nur auf die ökologischen Bedingungen naturnaher Ufer (Referenzbedingungen) im Blick haben, sondern sie sollten auch die komplexen Interaktionen menschlicher Eingriffe auf Relief, Substrat, Lebensgemeinschaften und die dynamische Entwicklung der Seeufer berücksichtigen.

Die zunehmende anthropogene Nutzung der Seeufer steht damit der Erreichung eines wichtigen Umweltziels der europäischen **Wasserrahmenrichtlinie** (WRRL, [2]), des ‚guten (oder besseren) ökologischen Zustands‘ der Wasserkörper entgegen. Wasserwirtschaftliche Ziele der WRRL überlappen sich mit naturschutzfachlichen Zielsetzungen der europäischen FFH-Richtlinie ([1]) inkl. des NATURA 2000-Netzwerks sowie mit der nationalen Naturschutzgesetzgebung. Sie treffen dabei auf eine Vielzahl energie- und verkehrswirtschaftlicher, kommunaler und privater Nutzungs-, Entwicklungs- und Vermarktungsansprüche, die durch eine fachübergreifende Raumplanung in Einklang gebracht werden müssen.

Jedoch herrscht weder ein breiter Konsens über die zonale Gliederung noch über die Ansätze zur Typologie von Seeufern und ihre Bedeutung für die Ausprägung der Lebensgemeinschaften [8]. Die spezifischen ↯ Ökosystemleistungen³, die die

Seeufer dem Menschen bereitstellen, sind nur schemenhaft benannt und bilden selten eine relevante Planungsgrundlage. Der Einfluss der Kursschifffahrt auf das Wellenklima und den lokalen Sedimenthaushalt ist wenig untersucht. Das Auftreten, die möglichen Ursachen und das Ausmaß von länger dauernden Seespiegeländerungen in historischer und prähistorischer Zeit und ihre Auswirkungen auf die Ufersedimente werden nach wie vor intensiv diskutiert. Trotz der technischen und konzeptuellen Fortschritte sind die ökologischen Auswirkungen von Uferneubauten an mitteleuropäischen Seeufern nicht hinreichend verstanden. Und auch die wasserbaulichen Ausführungen und Nachnutzungen von Seeufer-**Renaturierungen** lassen ein weit gedehntes Verständnis von der ‚Natur‘ eines Seeufers erkennen ([11]).

Andererseits hat die Umsetzung der WRRL zu einer Belebung der angewandten Forschung und Entwicklung in diesem Bereich geführt. So wurde europaweit eine Vielzahl von **Verfahren** entworfen, die die anthropogenen uferstrukturellen Veränderungen abbilden sollen ([7], [15]; Übersicht: [8]). Die unterschiedlichen Herangehensweisen und Berechnungswege, die zu einer Bewertungsziffer (Index) führen, wurden bislang aber noch keiner Interkalibration unterzogen, so dass offenbleibt, inwieweit die Ergebnisse vergleichbar sind. Weiterhin soll nach den Vorstellungen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) die Zusammensetzung der Bodenfauna (Makrozoobenthos) als Indikator für die strukturelle Beeinträchtigung der Seeufer aufgebaut werden. Ob sich aus den ermittelten Kenngrößen (Metrics) Maßnahmenprogramme ableiten lassen, ist allerdings ungewiss.

An dieser Stelle setzt das ReWaM-Verbundprojekt **HyMoBio-Strategie** ein. Es basiert auf einem interdisziplinären Ansatz, der Wissenschaftler*innen aus unterschiedlichen Fachrichtungen mit den Nutzer*innen und Anwender*innen aus Bayern und Baden-Württemberg, dem Kanton Thurgau, aus Bodenseegemeinden, Wasserbehörden und Nichtregierungsorganisationen vernetzt, um gemeinsam Wege zur Erhaltung und Wiederherstellung intakter Seeufer zu erarbeiten. Im Fokus stand die Untersuchung der komplexen Prozesszusammenhänge zwischen einer veränderten Uferstruktur und den daraus folgenden hydromorphologischen Bedingungen und der biozönotischen Struktur, um die vielschichtigen anthropogenen und hydrodynamischen Belastungen der Flachwasserzone zu verstehen und zukünftig minimieren zu können. Einen wesentlichen Schwerpunkt bildete dabei die Entwicklung und Implementierung neuer Mess- und Modellsysteme. Ziel war es, Lösungsvorschläge und Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Ufergestaltung unter Berücksichtigung der vorhandenen Nutzungsansprüche und Nachhaltigkeitskonflikte zu entwickeln.

² Baurat E. Reisser (1878–1943) war von 1920 bis 1934 als Leiter des Bezirksbauamtes Konstanz tätig; vgl. [10].

³ Begriffe, die mit einem ↯ gekennzeichnet sind, werden im Glossar näher erläutert.

Die vorliegenden **Handlungsempfehlungen** richten sich an Fachleute aus den Verwaltungen, Planungs- und Beratungsbüros und der angewandten Forschung, die aus unterschiedlicher Perspektive mit der Erforschung, dem Schutz und der Entwicklung von Seeufern befasst sind. Als Gebietskulisse dienen die natürlich entstandenen und künstlichen Seen des Alpenraums. Unsere Methodenentwicklungen, Forschungsergebnisse und Empfehlungen sind mit Modifikationen auch auf kleinere Seen in anderen mitteleuropäischen Landschaftsräumen übertragbar und anwendbar.

Die Darstellungen stützen sich vor allem auf die Ergebnisse des ReWaM-Verbundprojekts HyMoBioStrategie, auf teils noch unveröffentlichte Ergebnisse der einzelnen Autoren sowie auf die internationale Literatur. Um die Beiträge kurz und übersichtlich zu halten, werden die zu Grunde liegenden Mess- und Erhebungsdaten und die Auswertung der Ergebnisse in Technischen Berichten und Publikationen dokumentiert, die im Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS)⁴ als PDF-Dokumente zum Download bereitstehen.

Der erste Beitrag dieser Handlungsempfehlungen über **„Seen und ihre Ufer“** enthält eine knappe Übersicht über die Stellung der Seeufer im Ökosystem See, die räumliche Abgrenzung und ökologische Gliederung der Seeufer, ihre Dynamik und die dafür maßgebenden Faktoren, sowie über die sozioökonomische Bedeutung und die anthropogenen Einflüsse, die sich direkt oder indirekt auf die Seeuferzone auswirken. Die Darstellung soll einem gemeinsamen Verständnis der ökologischen Bedingungen der Seeuferzone und einer Vereinheitlichung der Begriffe und Gliederungsgrundsätze dienen.

Das Kapitel **„Hydromorphologie der Seeufer“** gibt einen kurzen Überblick über die Analyse der hydromorphologischen Qualitätskomponenten **„Wasserstandsdynamik“** am Bodensee-Obersee und **„Struktur der Uferzone“** am Beispiel der gemeinsamen Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt. Hierzu wurden mehrere gängige Verfahren der Uferstruktur-Klassifikation miteinander verglichen, um schließlich allgemeine Empfehlungen für ein künftiges hydromorphologisches Monitoring von Seeuferzonen abzuleiten.

Das darauffolgende Kapitel zeigt die ersten Messergebnisse eines **„Unterwassergeoradars“**. Es wurde entwickelt, um die Stratigraphie von Oberflächensedimenten in der Flachwasserzone zu erkunden, eine Aufgabe, an der hydroakustische Verfahren in der Regel scheitern. Die ersten Erfahrungen in Untersuchungsgebieten des HyMoBioStrategie-Projekts zeigen das hohe Potential dieser Technik.

Im Kapitel **„Autonome Messplattform“** werden die Grundlagen des autonom arbeitenden **„HydroCrawlers“** dargestellt und die

Umsetzung der einzelnen Funktionsbereiche Antrieb und Steuerung, Georeferenzierung, Seebodenvermessung, Sedimentstratigraphie, Unterwasseraufnahmen und Wasserqualitätssensoren beschrieben. Anhand eines Einsatzbeispiels werden Ergebnisse und Erfahrungen mit dem Messsystem **„HydroCrawler“** erläutert sowie allgemeine Einsatzmöglichkeiten diskutiert.

Das Kapitel über die **„Messung und Modellierung von Wellen, Strömungen und Sedimenttransport“** stellt empirische und modellbasierte Ansätze vor, mit denen die Hydro- und Morphodynamik in Seen differenziert untersucht, charakterisiert und bewertet werden kann. Deren Anwendungsmöglichkeiten werden anhand von Beispielen verdeutlicht. Aus den Anwendungen werden Empfehlungen für die Praxis abgeleitet.

Der Beitrag über die **„Erfassung des Feststoffhaushalts“** enthält eine Übersicht der im HyMoBioStrategie-Projekt entwickelten und erprobten Messeinrichtungen zur Dokumentation der Erosion und Sedimentakkumulation in der Flachwasserzone des Bodensee-Obersees und der Messtechniken zur Erfassung des Suspensionstransports sowie des Intermediär- und des Sohltransports. Die Einsatzmöglichkeiten und die dabei gemachten Erfahrungen werden kurz beschrieben.

Im Kapitel über die **„Ökologischen Auswirkungen von Seeufermauern“** werden Konzepte zur Untersuchung und Beurteilung der Auswirkungen von Ufermauern dargestellt. Ufermauern wirken sich nicht nur auf aquatische und amphibische, sondern auch auf terrestrisch lebende Organismengruppen aus. Neben einigen Ergebnissen wird in dem Beitrag auf die synergistische Wirkung von Experteneinschätzungen und faktoriellen Untersuchungsprogrammen hingewiesen, die für Entscheidungsfindungen in der Praxis von Bedeutung ist.

Das Kapitel über die **„Fahrgastschifffahrt als Stressor in der Flachwasserzone“** beschreibt die besonderen Eigenschaften von Schiffswellen und verdeutlicht anhand von Beispielen die spezifischen Auswirkungen auf die Erosion von Sedimenten, die Flachwasserbiozönosen und den Erhaltungszustand archäologischer Unterwasserdenkmäler. Am Ende des Kapitels werden Handlungsempfehlungen ausgesprochen, die sowohl kurzfristig umzusetzende, als auch langfristig angelegte Maßnahmen umfassen, um eine nachhaltige Reduktion der durch Schiffe verursachten Wellenbelastung zu erreichen.

In der Uferzone der Voralpenseen haben sich über Jahrtausende Relikte prähistorischer Siedlungen erhalten, die teilweise als UNESCO-Welterbe ausgewiesen sind. Durch Erosion und Nutzungsdruck sind diese Reste gefährdet. Im Kapitel zur **„Archäologischen Denkmalpflege in der Uferzone des Bodensees“** werden die Problemlage und der bisherige Kenntnisstand kurz skizziert, sowie die Maßnahmen und Entwicklungen im Rah-

⁴ URL <<https://kops.uni-konstanz.de/>>; DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.001 und folgende.

men des HyMoBioStrategie-Projekts erläutert. Am Ende des Kapitels wird die Umsetzung und Zusammenführung dieser neuen Ansätze im Rahmen eines mehrjährigen Monitoring-Plans für alle archäologische Fundstellen vorgestellt.

Die EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) verfolgt den Ansatz, dass Gewässer in einem ‚guten ökologischen Zustand‘ erhalten werden oder dieser wieder erreicht wird, z. B. durch Uferrenaturierungen. Das Ziel der ‚Uferrenaturierungen am Bodensee‘ ist es, den Bodensee für die Vielfalt der hier heimischen Arten als Lebensraum zu erhalten bzw. wieder zurückzugewinnen. In diesem Kapitel sind Handlungsempfehlungen für Renaturierungen und Unterhaltungsmaßnahmen genannt, die in der Projektumsetzung hilfreich sein können.

Der Band schließt mit einem ‚Glossar‘ ab, in dem die verwendeten, mit einem ‚👉‘ versehenen Fachbegriffe verzeichnet und erläutert sind.

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] EUROPÄISCHE KOMMISSION, Hrsg. (1992, 2013): Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften (konsolidierte Fassung vom 01.07.2013). EUR-Lex Document 01992L0043-20130701
- [2] EUROPÄISCHE KOMMISSION, Hrsg. (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327: 1-71.
- [3] EUROPÄISCHE UMWELTAGENTUR, Hrsg. (2018): WISE WFD Database (Water Framework Directive Database). – URL <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/wise-wfd-2>> (zuletzt aufgerufen im Nov. 2018).
- [4] FRANCIS, T. B. und SCHINDLER, D. E. (2009): Shoreline urbanization reduces terrestrial insect subsidies to fishes in North American lakes. – *Oikos* 118 (12): 1872-1882.
- [5] IGKB, INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE (2006): Bodensee-Uferbewertung. – Mehrseitiges Faltblatt, Karte mit Erläuterungen.
- [6] KAHLENBORN, W. und KRAEMER, R. A. (1999): Nachhaltige Wasserwirtschaft in Deutschland. – Beiträge zur Internationalen und Europäischen Umweltpolitik. Heidelberg: Springer, 224 S.
- [7] NIEDERBERGER, K., REY, P., REICHERT, P., SCHLOSSER, J., HELG, U., HAERTEL-BORER, S. und BINDERHEIM, E. (2016): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Seen. Modul: Ökomorphologie der Seen. – Hrsg. vom Bundesamt für Umwelt Bern (BAFU), Reihe Umwelt Vollzug Nr. 1632, 73 S. (zzgl. der ‘Ergänzungen zu ‘Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Seen‘ PR et al./23.01.2017’).
- [8] OSTENDORP, W. (2014): Hydromorphologie der Seen. Band 1: Übersicht der bisherigen Verfahrensentwicklungen (Version 1.0). – Fachbeiträge des LUGV, Heft 140, 86 S., hrsg. vom Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV) Brandenburg, Potsdam.
- [9] RADOMSKI, P., BERGQUIST, L. A., DUVAL, M. und WILLIQUETT, A. (2010): Potential impacts of docks on littoral habitats in Minnesota lakes. – *Fisheries* 35 (10): 489-495.
- [10] REISSER, E. (1926): Die Bodenseeufer, ihre Schönheit und ihre Erhaltung. – *Mein Heimatland* 13: 215-235.
- [11] REY, P., TEIBER, P. und HUBER, M. (2009): Renaturierungsleitfaden Bodenseeufer. – Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Bregenz, 93 S. (Download unter <https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/publikationen/wissenschaftliche_berichte/igkb_rlf_v20090225_komp.pdf>)
- [12] SCHMIEDER, K. (2004) European lake shores in danger. Concepts for a sustainable development. – *Limnologica* 34: 3-14.
- [13] STRAYER, D. L. und FINDLAY, S. E. G. (2010): Ecology of freshwater shore zones. – *Aquatic Sciences* 72: 127-163.
- [14] SUTER, P. J. und SCHLICHTERLE, H. (2009): UNESCO World Heritage Candidature ‚Prehistoric Pile Dwelling around the Alps‘. – Biel/Bienne (CH), 104 S.
- [15] TEIBER, P. (2009): Limnologische Bewertung der Ufer- und Flachwasserzone des Bodensees. – Berichte der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Blaue Reihe, Bd. 55, 115 S.
- [16] VADEBONCOEUR, Y., MCINTYRE, P. B. und VANDER ZANDEN, J. (2011): Borders of biodiversity: life at the edge of the World’s large lakes. – *BioScience* 61: 526-537.
- [17] WEHRLY, K. E., BRECK, J. E., WANG, L. und SZABO-KRAFT, L. (2012): Assessing local and landscape patterns of residential shoreline development in Michigan lakes. – *Lake and Reservoir Management* 28 (2): 158-169. DOI: 10.1080/07438141.2012.690824.

Kapitel 2

Seen und ihre Ufer

Wolfgang Ostendorp ¹



Zur Charakterisierung eines Uferabschnitts empfiehlt sich:

- eine Typisierung des Sees nach Größe, morphologisch-genetischen Kriterien (natürliche Seen) bzw. nach Nutzungstyp (künstliche und erheblich veränderte Seen),
- die zonale Gliederung der Ufer-Lebensräume in Sub-, Eu- und Epilitoral,
- die Beschreibung der sozioökonomischen Bedeutung,
- die Analyse der anthropogenen Nutzungen und Eingriffe,
- die hydromorphologische Klassifikation nach (i) Neigung der Uferplattform, (ii) Wellenenergieeintrag, (iii) Substrat, (iv) Feststoffbilanz, (v) jährlichem Wasserspiegelgang, (vi) Vegetationsbedeckung, (vii) Beschattung.

Dieses einführende Kapitel enthält eine knappe Übersicht über die Stellung der Seeufer im Ökosystem See, die räumliche Abgrenzung und ökologische Gliederung der Seeufer, ihre Dynamik und die dafür maßgeblichen Faktoren sowie über die sozioökonomische Bedeutung und die anthropogenen Einflüsse, die sich direkt oder indirekt auf die Seeuferzone auswirken. Die Darstellung soll einem gemeinsamen Verständnis der ökologischen Bedingungen der Seeuferzone und einer Vereinheitlichung der Begriffe und Gliederungsgrundsätze dienen. Als Gebietskulisse wird auf die Seen des Alpenraums Bezug genommen, die erläuternden Beispiele beziehen sich auf den Bodensee. Mit ☞ sind Begriffe gekennzeichnet, die im Glossar näher erläutert werden.

SEEN

Die oberirdischen ☞Gewässer des Binnenlandes gliedern sich in Fließgewässer und ☞Stillgewässer. Letztere umfassen neben den stehenden Kleingewässern die ☞Seen. Seen besitzen eine Mindestgröße der ☞Seeoberfläche, die allgemein bei $A_0 = 0,01 \text{ km}^2$ festgelegt wird. Unterhalb dieser Grenze wird von (stehenden) Kleingewässern gesprochen. Ab einer Größe von $0,5 \text{ km}^2$ sind Seewasserkörper berichtspflichtig im Sinne der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL, [3]). Die größten Seen des Alpenraums erreichen eine Oberflächengröße von 580 km^2 (Genfersee) und 536 km^2 (Bodensee: [4], [8]). Seen lassen sich anhand ihrer Oberflächengröße gruppieren; zu empfehlen ist eine Einteilung nach dekadischen Flächeneinheiten ([13]), wodurch sich eine lineare Häufigkeitsverteilung im doppelt-logarithmischen Koordinatennetz ergibt.

Das Ökosystem ‚See‘ beinhaltet den Freiwasser-Lebensraum (Pelagial) und den **Lebensraum** des Seebodens (☞Benthal) mit dem unmittelbar angrenzenden Wasservolumen. Das Benthal gliedert sich in eine untere lichtlose Zone (☞Profundal) und eine obere durchlichtete Zone (☞Litoral). Im Unterschied zum Pelagial, das im Wesentlichen nur durch drei abiotische Faktoren (Strahlungsschwächung in der Wassersäule, Temperatur,

Dichteunterschiede bzw. Schichtung des Wasservolumens) gegliedert wird, stellt das **Litoral** einen bedeutend strukturreicheren Übergangsbereich (☞Ökoton) dar, der zwischen rein terrestrischen und rein aquatischen Lebensräumen vermittelt. Als solcher ist er durch ausgeprägte physikalische und chemische Gradienten gekennzeichnet, mit der Folge, dass auf engem Raum eine Vielzahl von Lebensformen und Anpassungsstrategien der Pflanzen- und Tierwelt anzutreffen sind.

Während sich das Pelagial allein durch planktische **Lebensformen** (v. a. Algen, Rädertiere und Krebstiere) sowie durch Fische als Vertreter des Nektons auszeichnet, treten im Litoral Aufwuchsalgen und -tiere (Periphyton i. w. S.), wurzelnde Pflanzen (☞Makrophyten: Makro-Algen, Gefäßpflanzen), wirbellose Bodentiere (☞Makrozoobenthos, darunter die Larven vieler Insektenarten) und litorale Fischarten auf. Im Übergangsbereich zum Land kommen in der Röhrich- und Strandvegetation charakteristische Laufkäfer-, Libellen-, Amphibien-, Reptilien- und Säugetierarten vor. Viele Arten sind von besonderem naturschutzfachlichem Interesse. Den landseitigen Abschluss naturnaher Ufer bilden Ufergebüsche, Bruch- oder Auwälder sowie deren anthropogene Ersatzgesellschaften (Feuchtgrünland,

¹ Wolfgang Ostendorp, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umweltphysik, wolfgang.ostendorp@uni-konstanz.de.

Streuwiesen) mit ihrer an wechselfeuchte Bedingungen angepassten Tierwelt. Auch das Bodenseeufer weist, soweit es naturnah erhalten ist, eine hohe standörtliche Vielfalt auf. Eine Übersicht der charakteristischen Taxa ist in [12] enthalten.

Seen zeigen eine gewisse Individualität, die auf den umgebenden Landschaftsraum, ihre Entstehung und ihre Entwicklungsgeschichte unter dem Einfluss menschlicher Eingriffe zurückzuführen ist. Vor einem überregionalen Vergleich verschiedener Seen empfiehlt sich eine **Klassifizierung** der Seen. Dabei werden zunächst natürlich entstandene Seen und künstliche bzw. erheblich veränderte Seen unterschieden (vgl. Art. 2 WRRL, [3]). **Natürliche Seen** können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifiziert werden ([7], [14], [21]), wobei im Zusammenhang mit uferökologischen Fragestellungen die geomorphologisch-genetische Klassifikation relevant ist ([13]), bei der die **Entstehung des Seebeckens** im jeweiligen Landschaftsraum im Vordergrund steht. Die zugehörigen Randbedingungen (exogene Kräfte, Ausgangsgestein, Alter u. a.) haben zudem eine wichtige Rolle bei der Herausbildung und dem heutigen Erscheinungsbild natürlicher Ufer gespielt.

Im Alpenraum sind besonders die glazialen Erosionsseen und die Seen der glazialen Akkumulationslandschaften vertreten. Der Bodensee fällt in die Gruppe der Zungenbeckenseen; Obersee und Überlingersee gehören innerhalb dieser Gruppe zu den Fjordseen, deren Quartärbasis durch Gletschertätigkeit übertieft wurde. Wie bei einem See dieser Größenordnung nicht anders zu erwarten, haben sich die komplexe Entstehungsgeschichte und die räumlich unterschiedlichen geomorphologischen Prozesse in einer Vielzahl von Uferformen und Ufersedimenttypen niedergeschlagen.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist der **Wasserhaushalt** des jeweiligen Sees, da Seespiegelschwankungen in besonderer Weise den Gewässerrand und damit auch die uferökologischen Bedingungen beeinflussen. Insgesamt können 12 Grundtypen unterschieden werden ([13]), von denen im Alpenraum der ‚Durchflusssee mit oberirdischem Zufluss‘ sowie der ‚Durchflusssee mit Grundwasserzufluss‘ und der ‚Endsee‘ verbreitet auftreten. Der Bodensee gehört zur erstgenannten Gruppe. Er erhält sein Wasser überwiegend durch den Alpenrhein, der ein nival-glaziäres Abflussregime aufweist, von dem auch der See selbst geprägt ist (sommerliche Hochwasserstände und winterliche Niedrigwasserstände). Das Wasser kann ungehindert durch den Seerhein (zwischen Konstanz und Ermatingen) bzw. durch die Enge zwischen Öhningen und Eschenz am Untersee in den Hochrhein abfließen. Zu beachten ist, dass sich der Wasserhaushaltstyp eines Sees durch menschliche Eingriffe verändert haben kann. Am Bodensee ist dies nur in geringfügigem Maße der Fall; die vor langer Zeit geplanten umfangreichen

Wasserbau- und Reguliermaßnahmen erwiesen sich in den 1970er Jahren als politisch nicht durchsetzbar ([11]).

Künstliche Seen wurden durch menschliche Tätigkeit neu geschaffen, wobei bestimmte Nutzungen im Vordergrund standen, die sich auch in der Beckenform, im Uferrelief und im Wasserhaushaltstyp widerspiegeln können. Wichtigstes Gliederungskriterium ist die Art der ursprünglichen Nutzung. Mitunter wurden die Nutzungen inzwischen verändert, reduziert oder ganz eingestellt, so dass die derzeitigen Lebensbedingungen denen natürlicher Seen nahekommen.

Natürlich entstandene Gewässer können durch menschliche Eingriffe in ihren physischen Eigenschaften erheblich verändert werden, so dass sie ihre ursprünglichen physischen Merkmale weitgehend verlieren (**erheblich veränderte Gewässer**; Art. 2 Ziff. 9 WRRL, [3]), z. B. durch Aufstauung eines Fließgewässers zu einem Stausee oder eines Flachsees zu einem tiefen See. Künstliche und erheblich veränderte Seen werden nur insofern betrachtet, als dass sie am natürlichen Wasserkreislauf teilnehmen².

Im Falle künstlicher Seen oder erheblich veränderter Gewässer, die sich aktuell als Seen darstellen, sollte sich eine Typisierung an der ursprünglich vorgesehenen Nutzung orientieren ([13]).

SEEUFER

Als **Uferzone** eines Sees wird die gürtelförmig um den See reichende Zone beiderseits der mittleren Wasserlinie bezeichnet, in der der landseitige Abschnitt durch episodische Hochwasserstände des Sees beeinflusst wird und dessen wasserseitiger Abschnitt so weit in den See reicht, wie (i) bei Starkwindereignissen **Flachwasserwellen** auf dem Gewässergrund wirksam werden (z. B. an windexponierten Ufern großer Seen) oder (ii) eine substratgebundene Unterwasservegetation existiert (**untere Makrophyten[tiefen]grenze**, UMG), z. B. an geschützten Ufern kleiner Seen.

Die **hydrodynamische Definition (i)** stützt sich auf die rechnerisch ermittelte **Wellenbasis**, unterhalb derer keine relevanten Orbitalbewegungen mehr auftreten, die in der Lage wären, Oberflächensedimente zu remobilisieren. Nach einer Faustregel ist dies bei einer Wassertiefe der Fall, die der halben **Wellenlänge** entspricht (hierzu vgl. Kapitel 6). An größeren, tiefen Seen mit sandigen Ufersedimenten wird die Wellenbasis ufermorphologisch durch einen Gefällsknick zwischen der Uferplattform und dem Seebeckenhang sichtbar. Am Bodensee liegt diese ‚Haldenkante‘ in etwa 3 m (geschützte Ufer) bis 5 m Tiefe (wellenexponierte Ufer) unter dem Mittelwasserspiegel. Abhängig von der Tiefe des Sees und den geologischen Bedingungen kann der Gefällsknick auch fehlen.

² Klär- und Absetzteiche, künstlich mit Wasser versorgte Garten- und Landschaftsteiche sind folglich keine Seen.

Die **produktionsbiologische Definition (ii)** bezieht die untere Makrophyten(tiefen)grenze ein, die von der Transparenz des Wassers (Sichttiefe) und damit von der Planktonalgedichte bzw. vom trophischen Zustand des Sees abhängt ([6] Tab. 29; [18]). Am Bodensee wurde in den Jahren 2006 bis 2010, also während der fortgeschrittenen Reoligotrophierungsphase eine mittlere UMG von $8,2 \pm 1,2$ m (Mittelwert, Standardabweichung, $n = 56$) ermittelt ([1]). Für die untere Litoralgrenze setzen wir daher die bereits bisher verwendete 10 m-Tiefenlinie (ca. 385 m NHN) an.

Beiden Definitionen haftet der Nachteil an, dass die Grenzen empirisch schwierig zu ermitteln sind und überdies von anthropogenen Einflüssen abhängen (Nährstoffbelastung, trophischer Zustand). Unter praktischen Gesichtspunkten ist daher der jeweils größte der beiden ermittelten Tiefenwerte maßgebend.

Die Seeuferzone ist durch starke **physikalische und chemische Gradienten** geprägt, die sie in ufernormaler Richtung gliedern. Die wichtigsten Faktoren sind die physikalischen Eigenschaften des umgebenden Mediums (Dichte und spezifische Wärmekapazität von Wasser bzw. Luft), die unterschiedlichen Anpassungsstrategien der Pflanzen und Tiere (Körperbau [Stützgewebe], Photosynthese, Fortpflanzung [Bestäubung], äußere Atmung, Energiestoffwechsel u. a.) bedingen ([19], [20]). Demnach kann man eine subaquatische und eine subaerische Zone unterscheiden, zwischen denen eine Übergangs- bzw. Wasserwechselzone vermittelt.

In der **subaerischen Zone** ist das Substrat zwar nicht überstaut, aber vielfach wassergesättigt, so dass aufgrund der geringen Transportrate von Sauerstoff (molekulare Diffusion) anoxische Bedingungen im Porenraum vorherrschen. Gaswegigkeit und Energiestoffwechsel der Speicher- und Wurzelgewebe der dort vorkommenden Sumpf- und Röhrichtpflanzen, aber auch der Gehölzarten weisen entsprechende Anpassungen auf. Die Abbaurate der pflanzlichen Biomasseproduktion ist gering, so dass organische Substanz angereichert wird (Feuchthumus, Torf) und sich Anmoore und Niedermoore bilden können. Unter diesen Bedingungen wurden die organischen Reste stein- und bronzezeitlicher Ufersiedlungen (Bauhölzer, Samen und Früchte, Nahrungsmittelreste und Kleidungsbestandteile, Werkzeuge aus Holz und Geweih) über viele Jahrtausende hinweg konserviert („Feuchtbodenerhaltung“). Seeuferbegleitende Feuchtgebiete gehören daher im Alpenraum zu den wichtigsten Fundplätzen vor- und frühgeschichtlicher Bodendenkmäler (vgl. Kapitel 10).

Die Substrate der **subaquatischen Zone** sind dauerhaft überschwemmt. Das pflanzliche und tierische Leben findet sowohl auf den Substratoberflächen (Sediment, Steine, Holz, pflanzliche Oberflächen) als auch im bodennahen Wasserkörper statt. Wichtigste strukturierende Faktoren sind (i) die Durchdringungstiefe des Lichts, (ii) die kleinräumig turbulenten Wasserbewegungen aufgrund von \rightarrow Flachwasserwellen, \rightarrow Brandung und Uferströmungen (hierzu vgl. Kapitel 6) sowie (iii) die Verfügbarkeit von besiedelbaren Substraten.

Die \rightarrow **Tauchblattpflanzen** (submers Makrophyten) sind häufig an lichtschwache Bedingungen angepasst, profitieren andererseits von der verbesserten Kohlendioxid-Versorgung, da viele Arten nicht nur das gelöste CO_2 (Kohlensäure), sondern auch HCO_3^- (Hydrogencarbonat) assimilieren können, also eine zweite Kohlendioxid-Quelle, die dem subaerischen Milieu fehlt. Turbulente Strömungen verbessern die Kohlendioxid-Versorgung an den Blattoberflächen, können aber auch einen erheblichen Stressor darstellen, der – namentlich in der \rightarrow Brandungszone – zum Ausfall vieler Arten führt. In kalkreichen Seen wie dem Bodensee sorgt die Hydrogencarbonat-Assimilation zu einer Kalkablagerung auf den submersen Vegetationsorganen. Nach deren Absterben sinken die Kalkkrusten zu Boden und tragen damit wesentlich zur Feststoff-Bilanz der Seeuferzone bei (vgl. Kapitel 7). In vielen Alpenseen war die litorale Carbonatproduktion im Holozän so intensiv, dass sich mächtige \rightarrow Seekreide-Sedimente bildeten, die zu mehr als 75 % aus Calcit bestehen. In den Seekreide-Ablagerungen finden sich verbreitet \rightarrow Kulturschichten stein- und bronzezeitlicher Siedlungen, die seither durch die Sedimentbedeckung vor Ausspülung geschützt blieben (vgl. Kapitel 10). Die Anreicherung von organischen Substanzen aus der pflanzlichen Produktion ist an besonders wellengeschützten Ufern kleiner und seichter Seen möglich, an exponierten Ufern größerer Seen wird die feinkörnige Substanz tendenziell in Richtung Beckenzentrum transportiert.

Die **Fauna** des Litorals setzt sich teilweise aus einer obligat aquatischen Fauna zusammen, der neben den Fischen auch viele Wirbellosen-Sippen angehören (Süßwasserschwämme, Wenigborster, Egel, Strudelwürmer, Krebstiere, Muscheln, Schnecken u. a.). Zu den Substraten, auf und zwischen denen sich die Tiere aufhalten, zählen nicht nur die Sedimentoberfläche, sondern auch die Vegetationskörper der Makrophyten (Tauchblatt-, \rightarrow Schwimmblatt-, \rightarrow Sumpfpflanzen und \rightarrow Röhrichtpflanzen). Kennzeichnend ist das Vorkommen zahlreicher Insektengruppen, deren Larven obligat an das Wasser gebunden sind, deren Imagines sich aber über Wasser aufhalten und sich dort auch fortpflanzen. Die wichtigsten Gruppen sind Mücken, Eintagsfliegen, Köcherfliegen und Libellen, die unter Wasser die Nahrungsgrundlage für die benthivore Fischfauna und über Wasser die Beute von röhrichtbrütenden Singvögeln und von Fledermäusen darstellen.

Im Übergangsbereich zwischen der subaerischen und der subaquatischen Zone siedeln \rightarrow Amphiphyten und Röhrichtpflanzen (\rightarrow Helophyten), von denen erstere sowohl ein Trockenfallen als auch eine längere Überstauung ihrer Vegetationsorgane aushalten. In dieser **amphibischen Zone** verzahnen sich die Nahrungs-, Fortpflanzungs- und Wanderungshabitate terrestrischer Arten (z. B. Singvögel, Fledermäuse), amphibischer Sippen (spezialisierte Amphibien-, Reptilien- und Säugetier-Arten) und rein aquatischer Formen (z. B. Fische). Je nach Wasserstand können sich die Grenzen zwischen den Zonen verschieben. Mobile Tiere und einjährige Pflanzen reagieren schnell, indem sie trockengefallene bzw. überflutete Habitate innerhalb

weniger Tage und Wochen neu besiedeln. Langlebige Pflanzenarten und anspruchsvolle Vogel- und Säugetierarten reagieren hingegen eher auf längerfristige Veränderungen des mittleren Seespiegels (Seespiegeltrends), bevor sie reproduktionsfähige Bestände aufbauen können. Die Lage der Zonen kann sich jedoch verschieben. So weisen Alpenseen mit einem nival-glaziären Zuflussregime im unregulierten Zustand jährlich wiederkehrende **Wasserstandsschwankungen** von mehr als einem Meter auf, wobei die Hochwasserphase in die Monate Juni und Juli, die Niedrigwasserphase in den Spätwinter fällt. Bodensee und Walensee (CH) sind die einzigen größeren Alpenseen, die noch weitgehend unreguliert sind und naturnahe Wasserstandsschwankungen aufweisen³.

Der **Lebensraum**, der der hydromorphologisch definierten Seeuferzone entspricht, wird als **Litoral** genannt (Abbildung 1). Das

Litoral lässt sich in drei zonale Teillebensräume (Subzonen) gliedern,

- das **Sublitoral**, das ganzjährig überschwemmt ist und sich vielfach durch eine aquatische Vegetation (Tauchblattpflanzen) auszeichnet,
- das **Eulitoral** im jährlichen Schwankungsbereich des Seespiegels, gekennzeichnet durch Schwimmblattpflanzen, Amphiphyten und Röhrichtpflanzen sowie durch Uferweidengebüsche, Au- oder Bruchwälder,
- das **Epilitoral** oberhalb der mittleren jährlichen Hochwasserlinie mit einer Vegetation, die an episodische Überschwemmungen und/oder wassergesättigte Substrate angepasst ist.

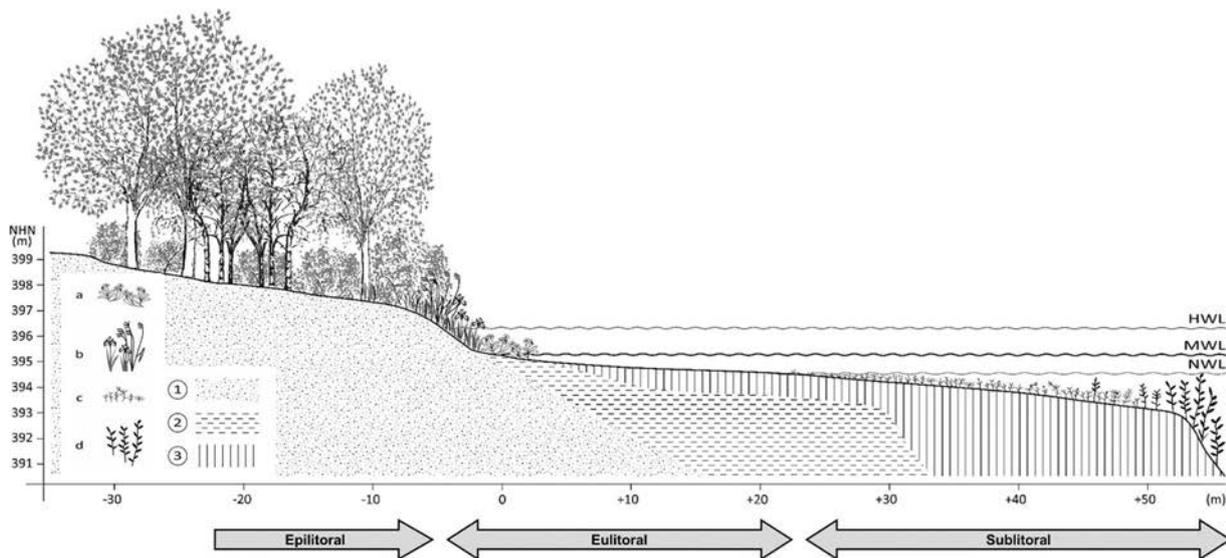


Abb. 1:

Zonale Gliederung des Seeufers am Beispiel des Bodensees (schem.). 1 – Molasse, Geschiebe, 2 – Beckenton, 3 – Seekreide; a – Strandvegetation, b – Röhrichte, c – Armluchteralgenrasen, d – Laichkraut-Bestände; NHN – Normalhöhennull (DHHN92), NWL – mittl. jährliches Niedrigwasser, MWL – mittl. Mittelwasser, HWL – mittl. jährliches Hochwasser (© RPS/Landesamt für Denkmalpflege/Grafik: A. Kalkowski).

Je nach Uferrelief und jährlich mittlerem Wasserstandsschwankungsbereich können die Subzonen eine sehr unterschiedliche Breite aufweisen. An steilen Felsufern beträgt sie nur wenige Dezimeter, an flachscharigen Ufern und im Bereich von Flussmündungen erreichen Epi- und Sublitoral oft mehr mehrere hundert Meter Breite. Aus Kohärenz- und Darstellungsgründen ist es sinnvoll, auch an extrem steilscharigen Ufern für jede Zone eine Mindestbreite (z. B. 5 m) anzunehmen. Die landsei-

tige Grenze des Epilitorals lässt sich, insbesondere an regulierten Seen oder intensiv genutzten Ufern, oft nur schwer ausmachen. Ersatzweise kann eine bestimmte Breite (z. B. 50 m Puffer ab Eulitoral-Grenze) vorgegeben werden.

Die kartographische **Uferlinie** ist eine wichtige Grundgeometrie für die Darstellung der Subzonen. An Seen mit schwankendem Wasserstand hängt die Lage der Uferlinie vom Wasser-

³ Der Walensee wurde jedoch im Unterschied zum Bodensee künstlich abgesenkt (Linth-Korrektion 1807 – 1816, Absenkung um ca. 5,5 m).

stand ab. Daher ist empfehlenswert, die Uferlinie auf einen bestimmten Wasserstand, z. B. den langjährig mittleren Wasserstand zu beziehen⁴.

Die **Uferlinienführung**, die, bedingt durch Reliefwechsel im Seebecken, von Ort zu Ort wechseln kann, sorgt für eine Differenzierung des Seeufers in Längsrichtung. Danach sind gleichmäßig gestreckte Ufer von Buchten und Landvorsprüngen zu unterscheiden. Als weitere ufermorphologische Gliederungselemente treten Schwemmkegel und Mündungsdeltas der Zuflüsse sowie der **Ausmündungsbereich** des Seeausflusses auf. Mit einem Wechsel der Uferlinienführung sind häufig auch Wechsel des Wellenklimas und der vorherrschenden Oberflächensedimente verbunden.

Natürliche Seeufer sind keine unveränderlichen Gebilde, sondern unterliegen einem fortwährenden Wandel, der als **Seeuferdynamik** bezeichnet wird. Die Seeuferdynamik umfasst die **Feststoffdynamik**, die **Wasserstandsdynamik**, die **Morphodynamik** und die **Vegetationsdynamik**. Die dynamische Entwicklung findet entlang unterschiedlicher Zeitskalen statt, die von wenigen Stunden oder Tagen (z. B. während Extremereignissen) bis hin zu Tausenden von Jahren reicht. Die wichtigsten natürlichen Faktoren, die die **eigendynamische** Entwicklung steuern, sind Wellen, Uferströmungen, fluvialer Feststoffeintrag, Wasserstandsschwankungen, Seespiegeltrends, unterseeische Hangrutschungen und die Vegetationsentwicklung. Seit dem Hochmittelalter tritt auch der Mensch als gestaltender Faktor auf, der durch Befestigung der Ufer, Quereinbauten, Seespiegelmanipulationen und durch Eingriffe in die Vegetationsdecke des Einzugsgebiets und in den Geschiebetransport der Fließgewässer die Entwicklung der Seeufer modifiziert. Die eigendynamische Entwicklung ist aus naturschutzfachlicher Sicht wünschenswert, stößt aber angesichts vielfältiger Nutzungsinteressen häufig auf Ablehnung. Bei der Untersuchung einer konfliktären Feststoff- oder Morphodynamik im Uferbereich (Erosion, Versandung, Faulschlammabtrag u. a.) sollte daher die Frage gestellt und beantwortet werden, ob die Entwicklungen durch naturgegebene Randbedingungen oder durch menschliche Interventionen in Gang gesetzt wurden bzw. vorangetrieben werden (vgl. Kapitel 7).

In der mitteleuropäischen dicht besiedelten Kulturlandschaft stellen naturnah erhaltene Seeufer eine Reihe von **Ökosystem(dienst)leistungen** (*ecosystem services*, ESS) bereit ([5]). Im weiteren Sinne zählt dazu auch die einmalige Bereitstellung von Flächen für Landwirtschaft, Verkehr, Siedlung, Gewerbe

und Industrie sowie Freizeitinfrastruktur, derentwegen die Seespiegel vieler Alpenseen in der Vergangenheit abgesenkt wurden (Landgewinnung). Andere Ökosystemleistungen werden wiederkehrend erbracht. Einige kommen der Allgemeinheit nicht unmittelbar zugute, sondern erst vermittelt durch die Vermarktung seitens professioneller Anbieter. Die besondere Lage am Seeufer bedingt z. B. in der Tourismus- und der Immobilienwirtschaft häufig höhere Endverbraucherpreise als im Hinterland. Andere ESS erleichtern und verbilligen die Aufwendungen im Umweltschutz. Die Seeflächen selbst sind fast ausschließlich in kommunalem oder staatlichem Eigentum⁵, wohingegen die landseits der Uferlinie liegenden Flurstücke gefragte Privatparzellen mit beträchtlichem Wertentwicklungspotenzial darstellen. Insofern haben viele ESS unmittelbar monetäre Aspekte.

Generell wird angenommen, dass naturnahe Ökosysteme und ein nachhaltiges Management diese Ökosystemleistungen dauerhaft gewährleisten, während anthropogen veränderte Ökosysteme nur in sehr eingeschränktem Maße dazu in der Lage sind. Vor diesem Hintergrund besitzen der Erhalt und die Wiederherstellung naturnaher Seeufer (**Renaturierung**, vgl. Kapitel 11) einen hohen Stellenwert in der Gewässerbewirtschaftung ([10]).

Seen und ihre Uferzonen werden auf sehr unterschiedliche Weise benutzt. Mitunter wird ausschließlich die Seefläche bzw. das Seevolumen genutzt (Wasserhaushalt, Wasserverkehr), bei vielen Nutzungsformen bildet jedoch die Uferzone den räumlichen Schwerpunkt. Vielfach überlagern sich an bestimmten Uferabschnitten verschiedene **hydromorphologische Eingriffe** (Stauwerke, Uferverbau, Aufschüttungen und Austiefungen, Quereinbauten, Flächenversiegelungen u. a.) und **Nutzungen** (Siedlung, Gewerbe und Verkehr, Landwirtschaft, Freizeit und Wassersport, Schifffahrt). Im Zuge etwaiger Seeuferstrukturkartierungen (vgl. Kapitel 3) ist die zuvorige Erstellung eines Katalogs von relevanten Eingriffen und Nutzungen empfehlenswert ([13]).

Die Nutzungs- und Eingriffsmöglichkeiten sind häufig durch gesetzliche Vorgaben des europäischen und nationalen Naturschutz- und Wasserrechts sowie durch bau- und planungsrechtliche Flächenwidmungen auf kommunaler und regionaler Ebene geregelt. Der Bodensee ist nach aktueller Recherche der einzige See im deutschsprachigen Alpenraum, für den spezielle **Seeuferpläne** als fachplanungsübergreifende Teilregionalpläne entwickelt wurden ([15], [16], [17]), die für die kommunalen

⁴ So sehen es auch z. B. das Wassergesetz Baden-Württemberg (§ 7 Abs. 1 u. 3, WG v. 3. Dez. 2013, GBl. Nr. 17, S. 389 ff.), das Bayerische Wassergesetz (Art. 12, Abs. 1, BayWG v. 25. Febr. 2010 GVBl. S. 66 ff.), das Brandenburgische Wassergesetz (§ 8 Abs. 1 u. 2, BbgWG v. 2. März 2012, GVBl. I/12, [Nr. 20]), das Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern (§ 53 Abs. 1 u. 2, LWaG v. 30. Nov. 1992, GVBl. M-V S. 669 ff.) und das Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein (§ 95 Abs. 1, Landeswassergesetz v. 11. Febr. 2008, GVOBl. Schl.-H. S. 91 ff.) vor. Hier ist die Uferlinie gleichzeitig eine Eigentumsgrenze zwischen dem (öffentlichen) Gewässer und den (privaten) Ufergrundstücken.

– Im Wasserrecht Schweizer Kantone tritt der Begriff des Hochwasserprofils an dessen Stelle (z. B. § 36 WBSNG des Kt. Thurgau, Rechtsbuch 721.1). Die obere Kote wird nicht nach hydrometrischen Gesichtspunkten, sondern auf Antrag von Amts wegen festgelegt. Am thurgauischen Bodensee-Obersee liegt diese Grenze bei 397,10 m RPN, entspr. 396,77 m NHN; dieser Wert wurden in den vergangenen 28 Jahren an 51 Tagen in 2 Jahren überschritten.

⁵ siehe: http://www.wasser-in-buergerhand.de/recht/privatisierg_fluesse_seen.htm

Flächennutzungs- und Bebauungspläne und damit letztlich für die Genehmigung von öffentlichen und privaten Vorhaben verbindlich sind. Hierzu wurde das baden-württembergische und bayerische Seeufer zwischen der Uferlinie und der seeseitigen Litoral-Grenze in eine ‚allgemeine Flachwasserzone‘, eine streng geschützte ‚Schutzzone I‘ und eine weniger stark geschützte ‚Schutzzone II‘ aufgeteilt.

Wenn Seeufer-Abschnitte eines oder mehrerer Seen miteinander verglichen werden sollen, empfiehlt sich, dies auf der Grundlage einer Seeufertypisierung zu tun, die den tatsächlichen oder rekonstruierten naturnahen Zustand des Seeuferabschnitts abbildet. Vor dem Hintergrund des jeweiligen **Seeufertyps** können typspezifische Merkmale, vor allem die Abundanz bestimmter Pflanzen- und Tierarten dargestellt werden. Die Typisierung kann zweckmäßigerweise nach folgenden Gesichtspunkten durchgeführt werden ([13]):

- durchschnittliche Neigung der Uferplattform
- Wellenenergie-Eintrag
- vorherrschendes Substrat der Eulitoral-Zone
- Feststoffbilanz im Eulitoral
- typischer Jahresgang des Wasserspiegels
- Vegetationsbedeckung im Eulitoral
- Beschattungswirkung durch Uferbäume oder Fels-hänge

Menschliche Eingriffe und Nutzungen oder stoffliche Belastungen (Nährstoffe) bleiben zunächst unberücksichtigt. Die Merkmalsausprägungen können in unterschiedlichen Kombinationen auftreten, wobei nicht alle Kombinationsmöglichkeiten in der Natur anzutreffen sind.⁶ Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt das LAWA-Übersichtsverfahren der uferstrukturellen Gesamtsee-Klassifizierung ([2], [9]). Hier sind Uferneigung (land-seits der Uferlinie) und Substrattyp von primärer Bedeutung (‚Basis-Seeufertyp‘), gefolgt von der Breite und der Beschattung der überschwemmten Uferzone sowie Wind und Wasserstandsschwankungen (‚erweiterter Seeufertyp‘).

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] BAUER, F., HARLACHER, R., HUBER, M., SCHRANZ, C. und STELZER, D. (2014): Submerse Makrophyten des Bodensees – Kartierung in den Jahren 2006 - 2010. – Berichte der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) 58: 153 S.
- [2] BÖX, S., EBERTS, J. und MEHL, D. (2015): Verfahrensanleitung zur Prognose makrozoobenthosrelevanter Habitattypen an See-ufern. – Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (Hrsg.), Ständiger Ausschuss ‘Oberirdische Gewässer und Küstengewässer’ (LAWA-AO), 86 S.
- [3] EUROPÄISCHE KOMMISSION, Hrsg. (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasser-Rahmenrichtlinie – WRRL). – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 327/1, 22.12.2000.
- [4] GÜDE, H. und STRALE, H. (2016): Bodensee – Ökologie und anthropogene Belastungen eines tiefen Voralpensees. – Limnologie aktuell Bd. 15: 1 – 271. Stuttgart.
- [5] HAINES-YOUNG, R. und POTSCHIN, M. (2018): Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. – <https://cices.eu/resources/> (zuletzt aufgerufen im Juni 2018).
- [6] HOEHN, E., RIEDMÜLLER, U., MISCHKE, U., DENEKE, R. und MAIER, G. (2013): Ökologische Bewertung von natürlichen, künstlichen und erheblich veränderten Seen mit der Biokomponente Phytoplankton nach den Anforderungen der EU-Wasser-Rahmenrichtlinie. – Abschlussbericht für das LAWA-Projekt-Nr. O 4.10, Freiburg, 154 S. + Anhänge.
- [7] HUTCHINSON, G. E. (1957): A Treatise on Limnology. Vol. I, Part: 1 Geography and Physics of Lakes. – New York: John Wiley & Sons, XIV+540 S.
- [8] INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE (IGKB), Hrsg. (2004): Der Bodensee. Zustand – Fakten – Perspektiven. – Bregenz, 177 S.
- [9] MEHL, D., EBERTS, J., BÖX, S. und KRAUSS, D. (2015): Verfahrensanleitung für eine uferstrukturelle Gesamtseeklassifizierung (Übersichtsverfahren). – Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (Hrsg.), Ständiger Ausschuss ‘Oberirdische Gewässer und Küstengewässer’(LAWA-AO), 2. überarbeitete und erweiterte Fassung, 78 S.
- [10] OSTENDORP, W. (2009): Seeuferrenaturierung. – In: Handbuch Angewandte Limnologie, Loseblattsamml., 26. Erg.Lfg. 7/09, Abschn. VI 2.2, 64 S., Weinheim: Wiley-VCH.
- [11] OSTENDORP, W. (2012): Umwelt- und Nutzungswandel am Unterseeufer: Seeregulierung, Wasserspiegeltrends und Abwasserbelastung. – Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft 66: 63-109.
- [12] OSTENDORP, W. (2014): Auswirkungen der Ufermauern am Bodensee-Untersee auf die litorale Fauna und Flora: Ergebnisse szenariobasierter Expertenurteile. – Mitteilungen des Badischen Landesvereins für Naturkunde und Naturschutz N.F. 21/3: 371-404.
- [13] OSTENDORP, W. (2018): Empfehlungen zur hydromorphologischen Klassifizierung von Seen, Seeufern und Nutzungen. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Univ. Konstanz, i + 13 S. DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.011.
- [14] RIEDMÜLLER, U., MISCHKE, U., POTTGIEBER, T., BÖHMER, J., DENEKE, R., RITTERBUSCH, D., STELZER, D. und HOEHN, E. (2013): Steckbriefe der deutschen Seetypen. – Begleittext und Steckbriefe. 85 S. Download unter <<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/seen>> (zuletzt aufgerufen im Juni 2018).
- [15] REGIONALVERBAND HOCHRHEIN-BODENSEE (1984): Bodenseeufertypenplan. – Waldshut, 52 S. + Kte. i. Anh.
- [16] REGIONALVERBAND BODENSEE-OBERSCHWABEN (1984): Bodenseeufertypenplan. – Ravensburg, 68 S. + Karte. i. Anh.

⁶ Beispielsweise ist ein vegetationsdominiertes, steilschariges Hochenergiemilieu kaum denkbar.

- [17] REGIERUNG VON SCHWABEN (1984): Bayerischer Bodenseeuferplan. – Text- u. Plansammlung, Augsburg.
- [18] SØNDERGAARD, M., PHILLIPS, G., HELLSTEN, S., KOLADA, A., ECKE, F., MAEEMETS, H., MJELDE, M., AZZELLA, M. M. und OGGIONI, A. (2013): Maximum growing depth of submerged macrophytes in European lakes. – *Hydrobiologia* 704: 165-177.
- [19] SCHMIDT, E. (1996): Ökosystem See – Der Uferbereich des Sees. – Wiesbaden: Quelle & Meyer Verl., 328 S. u. Anh.
- [20] STRAYER, D. L. und FINDLAY, S. E. G. (2010): Ecology of freshwater shore zones. – *Aquatic Sciences* 72: 127–163.
- [21] TIMMS, B. V. (1992): Lake Geomorphology. – Adelaide, Glengales Publishing, 180 S.

Kapitel 3

Hydromorphologie der Seeufer

Wolfgang Ostendorp und Hilmar Hofmann ¹



Anthropogene Veränderungen der hydromorphologischen Bedingungen an Seeufern umfassen Veränderungen der Wasserstandsdynamik und der Struktur der Uferzone. Wir empfehlen:

- die Erfassung der beiden Merkmalsgruppen als eigenständige Qualitätskomponenten, d. h. ohne zwingenden Bezug auf biotische Qualitätskomponenten,
- die Einbeziehung von anthropogenen Veränderungen des Wellenklimas und der ufernahen Strömungen in die Qualitätskomponente ‚Wasserstandsdynamik‘,
- die räumliche Differenzierung der Uferzone in Subzonen (Sub-, Eu- und Epilitoral),
- die Rekonstruktion einer naturnahen Uferlinie als Bezugslinie für die Abgrenzung der Subzonen im naturnahen Referenzzustand,
- die Interkalibration der an Alpenseen verwendeten Verfahren einschließlich methodisch vereinfachter Übersichtsverfahren mit dem Ziel einer vereinheitlichten Vorgehensweise.

Dieses Kapitel enthält eine Analyse der hydromorphologischen Qualitätskomponenten ‚Wasserstandsdynamik‘ am Bodensee-Obersee und ‚Struktur der Uferzone‘ am Beispiel der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt. Hierzu wurden mehrere gängige Verfahren der Uferstruktur-Klassifikation miteinander verglichen. Daraus werden allgemeine Empfehlungen für ein künftiges hydromorphologisches Monitoring von Seeuferzonen abgeleitet. Als Gebietskulisse dienen die Seen des Alpenraums, die erläuternden Beispiele beziehen sich auf den Bodensee. Mit ↪ sind Begriffe gekennzeichnet, die im Glossar näher erläutert werden.

BEGRIFF

Neben dem Unterwasser-Lichtklima und der Wassertemperatur bestimmen Relief und physische Merkmale des Seebodens, Wasserstand und Wasserbewegungen sowie die Konzentrationen von Alkali- und Erdalkalisalzen und Nährstoffen das Vorkommen und die Häufigkeit aquatischer Organismen in der Seeuferzone. Hinzu kommen biotische Interaktionen und biogeographische Ausgangsbedingungen.

Alle genannten Faktorengruppen unterliegen dem Einfluss anthropogener Eingriffe, die dazu führen können, dass die Zusammensetzung wichtiger Lebensgemeinschaften erheblich gegenüber dem zu erwartenden natürlichen Zustand (Referenzzustand) verändert ist und damit vom ‚guten ökologischen Zustand‘, einem wichtigen Umweltziel der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie ([16]), abweicht. Aus diesem Grund sind bei der Zustandsbewertung von Fließgewässern und Seen auch

↪ hydromorphologische Veränderungen zu erfassen² (Anh. II, 1.3 ii und Anh. V, 1.2 Tabelle 1.2 WRRL).

Die hydromorphologischen Qualitätskomponenten der Seen beinhalten nach dem Wortlaut der WRRL Merkmale des Wasserhaushalts und der morphologischen Bedingungen. Die Begrifflichkeit und grobe Untergliederung der beiden Gruppen machen eine fachliche Präzisierung und Systematisierung der für die Praxis relevanten Mess- und Erfassungsgrößen notwendig ([3]: Tab. 3). Für die Seeufer sind v. a. die ‚Wasserstandsdynamik‘ und die ‚Struktur der Uferzone‘ von Bedeutung (Anh. V Ziff. 1.1.2 WRRL).

WRRL-QUALITÄTSKOMPONENTE ‚WASSERSTANDSDYNAMIK‘

Der ↪ **Wasserstand** eines Sees wirkt sich unmittelbar auf die aquatischen, ↪ amphibischen und terrestrischen Lebensräume

¹ Wolfgang Ostendorp, Hilmar Hofmann, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umwelphysik, wolfgang.ostendorp@uni-konstanz.de, hilmar.hofmann@uni-konstanz.de.

² Die hydromorphologischen Qualitätskomponenten werden stets für die Beschreibung des Referenzzustands (‚sehr guter Zustand‘) benötigt, ansonsten wenn (i) die biotischen Qualitätskomponenten eine ökologische Einstufung des Gewässers nicht möglich machen oder wenn (ii) zu vermuten ist, dass die gewählten biotischen Qualitätskomponenten von den hydromorphologischen Besonderheiten abhängen.

aus, deren Pflanzen- und Tierwelt auf spezifische Wassertiefen, Grundwasser-Flurabstände oder Wasserstandsvariationen angewiesen ist. Die an vielen naturnahen Seeufern anzutreffende ufernormale **Zonierung** der Sedimente bzw. Böden sowie der dominierenden Pflanzengemeinschaften ist Ausdruck dieser Abhängigkeit (vgl. Kapitel 2).

Anthropogene Veränderungen der Wasserstandsdynamik haben Anpassungen der Zonierung bzw. der lokalen Abundanz der Pflanzen- und Tierarten zur Folge, so dass die Lebensgemeinschaften von denen der typspezifischen Referenzbedingungen abweichen können (Anh. V Ziff. 1.2.2 WRRL, [16]).

Wesentliche und für die Seeufer relevante **Merkmale** der Wasserstandsdynamik sind

- die durchschnittlichen jährlichen Wasserstandsvariationen,
- die episodischen Wasserstandsextremwerte,
- die Saisonalität der Wasserstandszeitreihe,
- eine eventuell vorhandene Diskontinuität („Sprünge“) der Wasserstandszeitreihe,
- ein Trend der Wasserstandszeitreihe

sowie ergänzend dazu

- die saison- und trendbereinigten Mittelwasserstände.

Die Wasserstandsdynamik der meisten Alpenseen wurde spätestens im 19. und 20. Jahrhundert künstlich verändert. Eine Ausnahme bildet noch heute der Bodensee, nachdem Projekte zur Regulierung und Schiffbarmachung in den 1970er Jahren endgültig gescheitert waren. Vor diesem Hintergrund kann der Bodensee als **Referenzgewässer** für den naturnahen hydrologischen Ausgangszustand anderer Alpenseen dienen ([6]).

Gleichwohl weist der Bodensee seit den 1930er Jahren charakteristische Veränderungen seiner Wasserstandsdynamik auf, von der besonders die Uferzone betroffen ist ([9]). Die Abbildung 1 zeigt die **Trends** des jährlichen Mittelwasserstands (mMW), des Niedrigwasser- und des Hochwasserspiegels (mNW, mHW) am Bodensee-Obersee in den zurückliegenden 87 Jahren (Periode 1931–2017). Danach sinkt das mHW signifikant mit einer Rate von $-4,3 \text{ mm a}^{-1}$ ($r = -0,256$, $p < 0,05$), während das mNW um $0,2 \text{ mm a}^{-1}$ ansteigt. Der Trend des mMW liegt nahe Null und ist nicht signifikant. Demzufolge sinkt auch die Differenz zwischen dem üblichen Hochwasser- und Niedrigwasserspiegel eines Jahres, hier ausgedrückt als Differenz zwischen dem 90 %- und dem 10 %-Quantil (Interdezilbereich für 80 % aller täglichen Wasserstände eines Jahres). Die Rate liegt bei $-5,4 \text{ mm a}^{-1}$ ($r = -0,443$, $p < 0,001$). Im nächsten Jahrzehnt dürfen wir also **sommerliche Hochwasserstände** erwarten, die um $0,43 \text{ m}$ niedriger liegen als in den 1930er Jahren ($396,60 \text{ m NHN}$); der Erwartungswert der üblichen intra-annuellen Seespiegel-Differenz reduziert sich von $1,66 \text{ m}$ um 1930 auf nunmehr etwa $1,10 \text{ m}$ (Abbildung 1).

Die Abbildung 2 gibt die **saisonale Verteilung des Trends** der täglichen Wasserstände wieder. Es wird deutlich, dass der Bodensee-Obersee zwischen Juni und Oktober einen signifikant

negativen Trend zwischen $-2,5$ und $-6,1 \text{ mm a}^{-1}$ aufweist ($r > 0,20$, $p < 0,05$). Dem stehen leicht positive Seespiegeltrends v. a. im Dezember und Januar gegenüber, die allerdings meist nicht signifikant sind.

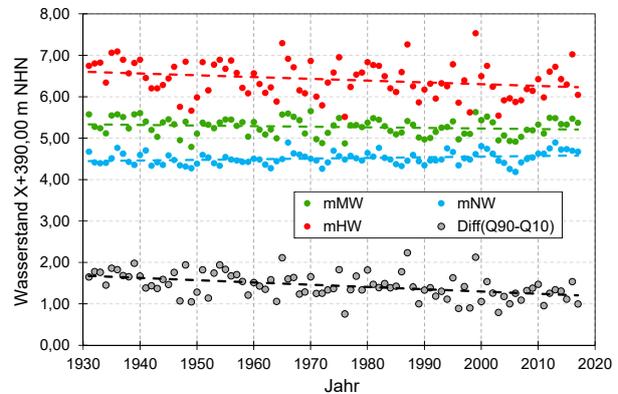


Abb. 1:

Trends des jährlichen Mittelwassers (mMW), des Niedrig- und Hochwasserspiegels (mNW, mHW) sowie der jährlichen Seespiegeldifferenzen zwischen dem 90 %- und dem 10 %-Quantil (Diff) am Bodensee-Obersee im Zeitraum 1. Jan. 1931 bis 31. Dez. 2017 (Pegel Konstanz, Datenquelle: LUBW Karlsruhe).

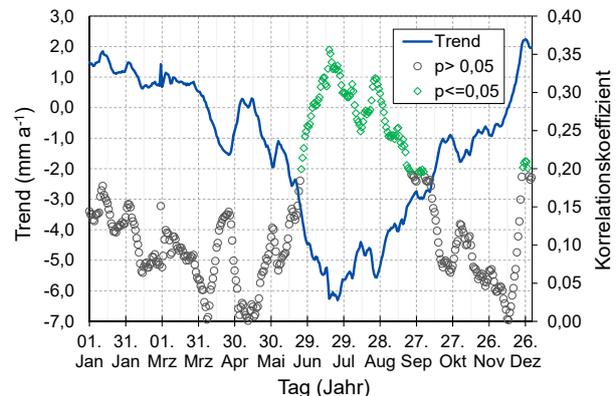


Abb. 2:

Trend der täglichen Wasserstände am Bodensee-Obersee (Pegel Konstanz, Quelle: LUBW, Karlsruhe) im Zeitraum 1. Jan. 1931 bis 31. Dez. 2017. Kreise – abs. Korrelationskoeffizient für den Trend mit Angabe des Signifikanzniveaus ($p \leq 0,05$).

WELLENEXPOSITION

Die Exposition eines Uferstreifens gegenüber den vorherrschenden **Wind**en und dem resultierenden natürlichen **Wellenfeld** gehören ebenfalls zu den wesentlichen hydromorphologischen Faktoren, die die lokalen Lebensgemeinschaften im Sub- und Eulitoral prägen ([10], [11], [13]). Wellenexponierte Ufer, insbesondere solche an Landspitzen, weisen häufig gröbere und nährstoffärmere Sedimente, eine geringere Deckung der Unterwasserpflanzenrasen, eine charakteristische Strandvege-

tation, strömungstolerante (rheophile) Formen in der Wirbellosenfauna sowie Kieslaicher in der Fischfauna auf. Entsprechend sind die Sedimente hydrodynamisch schwach exponierter Ufer, insbesondere in Buchtlagen, oft durch feinere und nährstoffreichere Sedimente, durch eine höhere Deckung der Unterwasserpflanzenrasen, durch Röhrichte, Stillwasser liebende (stagnophile) Makrozoobenthos-Formen und Krautlaicher unter den Fischen gekennzeichnet.

Die Wellenexposition und das Strömungsfeld der Uferabschnitte können sich infolge menschlicher Einflussnahme verändern. So reduzieren **Uferquerbauwerke** (z. B. Hafentore, vgl. Kapitel 6, S. 60-62) den Wellenenergieeintrag auf ihrer Leeseite, dagegen kommt es durch Wellenreflexion und -überlagerung an deren Luvseite zu einer höheren Exposition. Neben der Änderung des lokalen Wellenfelds im Umfeld von Uferquerbauwerken wird auch das Strömungsfeld großflächig verändert ('strömungsbeeinträchtigte Flächen', vgl. S. 23). Die meist uferparallelen Strömungen werden auf der Luvseite in Richtung Freiwasser abgelenkt. Suspendierte Partikel, Organismen und gelöste Nährstoffe erreichen dadurch nur noch eingeschränkt die Leeseite des Bauwerks. Unter den vorherrschenden Strömungsfeldern kann das zu nachhaltigen Veränderungen der Habitatbedingungen in einzelnen Uferabschnitten des Gewässers führen. Ebenfalls negativ wirken sich **Austiefungen** (Fährinnen) oder jegliche anthropogenen Eingriffe in die Morphologie der Flachwasserzone aus, da diese sowohl das Wellen- als auch das Strömungsfeld gegenüber der natürlichen Referenz verändern. Die genaue Ψ Magnitude und das räumliche Ausmaß der Veränderung können nur mit hydrodynamischen Simulationen bestimmt werden (vgl. Kapitel 6).

Im Anhang V der WRRL ([16]) ist eine Berücksichtigung der Windexposition, genauer gesagt der hydrodynamischen Exposition der Flachwasserzone mit seinen Ufern gegenüber einlaufenden Wellen (Wind- und Schiffswellen), nicht enthalten. Beide Aspekte sind aber bei der Betrachtung der hydromorphologischen Bedingungen in der Uferzone aufgrund des umfassenden Einflusses auf die Habitatbedingungen unbedingt zu berücksichtigen. Wir empfehlen deswegen, die hydrodynamische (energetische) Exposition der Ufer durch sogenannte Fetch-Modelle abzuschätzen oder durch Wellenmodelle (z. B. SWAN) zu berechnen. Diese beiden Methoden mit ihren Vor- und Nachteilen sind in [12] zusammengefasst. Im HyMoBioStrategie-Projekt wurde das Wellenmodell SWAN zur räumlich aufgelösten Kartierung der Wellenexposition der Ufer angewendet und als Parameter in die Wirkungsmatrix auf Biota einbezogen (Kapitel 6). In vielen Seen mit Kursschiffahrt verursachen neben den natürlichen Windwellen auch Schiffswellen eine zu berücksichtigende hydrodynamische Exposition der Ufer (Kapitel 6 und 9). Treten signifikant Schiffswellen in dem Gewässer auf, sollten diese unbedingt als zusätzliche energetische Belastung der Uferzone mit in die Bewertung der hydrodynamischen Exposition einbezogen werden.

WRRL-QUALITÄTSKOMPONENTE 'STRUKTUR DER UFERZONE'

Die Ψ Struktur eines Uferabschnitts beinhaltet die flächen- oder linienhafte Ausdehnung und räumliche Anordnung von topographischen Objekten einschließlich ihrer typischen anthropogenen Nutzung im Hinblick auf ihre Eignung als Lebensraum für eine Ψ indigene Flora und Fauna. Die wesentlichen **Komponenten der uferstrukturellen Bedingungen** im Ψ Sub-, Ψ Eu- und Ψ Epilitoral sind:

- die natürliche oder anthropogen veränderte Ausprägung der **Seeboden- und Landoberfläche** unter Berücksichtigung der Vegetationsdecke als gesondertem Strukturelement: Die ökologische Bedeutung der Strukturen des Seebodens und des ufernahen Landes für die Existenzbedingungen vieler Arten liegt auf der Hand. Insbesondere bei anthropogenen Objekttypen sind neben der eigentlichen Flächenbedeckung auch die anthropogenen Nutzungen, Störungen und Emissionen zu betrachten. Beispielsweise ist mit einer Hafenanlage auch ein Verkehr von Schiffen verbunden, gefolgt von Störungen der oberflächensedimente sowie einer gelegentlichen Entschlammung. In einem Strandbad werden die ufernahe Vegetation und das Makrozoobenthos durch die Badenutzung gestört und vor ufernahen Ackerflächen ist mit einem Eintrag von Agrochemikalien zu rechnen.
- die **lineare Erstreckung** bestimmter anthropogener Objekte (z. B. Uferverbauungen) entlang der Uferlinie: Seeufermauern und ähnliche Verbaustrukturen bilden lineare Objekte, die sich bei einer Breite von nur wenigen Dezimetern über viele hundert Meter entlang des Ufers erstrecken können. Ihre ökologische Bedeutung liegt nicht in ihrer Flächengröße, sondern in ihrer Längsausdehnung sowie in ihrer Position zum Mittelwasserspiegel (d. h. landseitig ohne oder mit kurzzeitiger Seespiegelberührung bzw. seeseitig mit [nahezu] ganzjähriger Seespiegelberührung). Uferbefestigungen (z. B. Seeufermauern) stehen im Verdacht, auch die in einiger Entfernung befindlichen naturnahen eu- und sublitoralen Lebensgemeinschaften zu beeinträchtigen (vgl. Kapitel 8).
- die **reliefverändernden Eigenschaften** bestimmter anthropogener Objekte (z. B. Aufschüttungen zur Landgewinnung bzw. zur Renaturierung verbauter Uferabschnitte, Austiefungen von Schifffahrtsrinnen, Unterwasser-Baggerungen zur Materialgewinnung): Für die aquatische und amphibische Flora und Fauna sind Uferauffüllungen und Uferbefestigungen in besonderem Maße relevant. Uferauffüllungen führen zu einer Überdeckung und damit zur Vernichtung dieser Lebensräume, Austiefungen können bis unter die maximale Tiefengrenze des Unterwasserpflanzenvorkommens reichen und auf diese Weise Litoralflächen vernichten.

- die **strömungsverändernden Eigenschaften** von Uferquereinbauten (z. B. Hafenmolen, Leitdämme in Flussdeltas): Uferquereinbauten können sich über ihre reine Flächenbedeckung hinaus auf die Strömungsverhältnisse im Eu- und Sublitoral auswirken und damit die Anlandung von Feinmaterial oder die Erosion der natürlichen Sedimentoberfläche fördern. Eine zuverlässige Schätzung der betroffenen Flächengröße ist nur mit Hilfe hydrodynamischer Modelle möglich. Gleichwohl können einfache Luftbild-Kartierungen und wiederholte, flächendeckende hydroakustische Vermessungen (vgl. Kapitel 4 und 6) aufzeigen, wo und in welchem Umfang Uferabschnitte betroffen sind.
- die **Nachbarschaftsbeziehungen** mehrerer Objekte zueinander im Sinne von Biotopvernetzungen: Röhrichte sind ökologisch besonders wertvoll, wenn sie in unmittelbarer Nachbarschaft zu naturbelassenen Sublitoral-Lebensräumen und landseitigen Uferwäldern gelegen sind, so dass sich eine weitgehend vollständige ufernormale Zonierung von Lebensräumen ergibt. Bahn- und Straßentrassen sind besonders nachteilig, wenn sie parallel zur Uferlinie verlaufen und damit see- und landseitige Lebensräume voneinander isolieren und eine Durchwanderbarkeit und damit die terrestrisch-aquatische Kopplung behindern.

Die vier erstgenannten Merkmalsgruppen können sich im gleichen Objekt widerspiegeln (Abbildung 3). Beispielsweise kann eine Vorschüttung unter dem Aspekt betrachtet werden, ob sie eine naturnahe Vegetation trägt oder mit Gebäuden bestanden ist, inwieweit sie die natürliche Uferlinie verlängert (an Landvorsprüngen) oder verkürzt (in Buchtlagen), wie groß die überschütteten Lebensräume sind, und inwiefern sie durch Strömungsveränderungen in den umgebenden Litoralflächen zur Sedimentation bzw. Erosion beitragen könnte.

Grob gesagt, können natürliche und naturnahe, d. h. nur sehr geringfügig durch Menschen beeinflusste Flächen (**„Referenzzustand“**) von anthropogen gestalteten und genutzten Flächen unterschieden werden, wobei letztere je nach spezifischer Ausprägung für eine indigene Flora und Fauna mehr oder minder ungeeignet sind.

Nur für wenige Alpenseen liegen entsprechende Aufstellungen vor, beispielsweise für die Untersuchungsflächen des **HyMoBio-Strategie-Projekts** am Bodensee-Nordufer (Tabelle 1). Die sechs Flächen zzgl. einer weiteren untersuchten Fläche erstrecken sich auf einer Uferlänge von 2,48 km. Die zugehörigen Sublitoralflächen sind rd. 550.400 m² groß, während das Eulitoral nur 51.400 m² einnimmt. Der landwärtige 50 m breite Epilitoral-Streifen besitzt eine Fläche von 129.200 m².

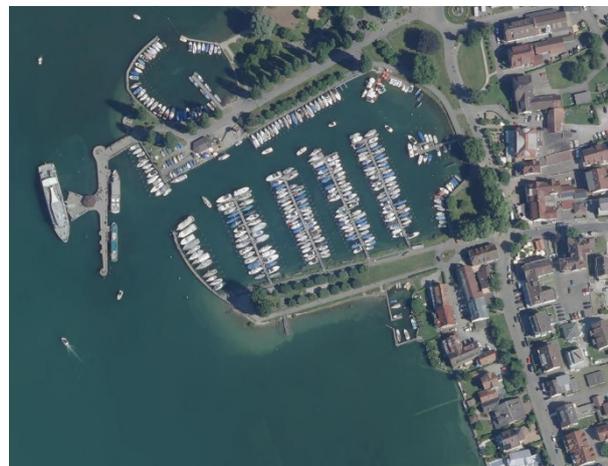


Abb. 3:

Hafen Unteruhldingen. Die Hafenmole wird als neu geschaffene Landoberfläche, als reliefverändernde Aufschüttung und hinsichtlich ihrer strömungsverändernden Wirkung betrachtet (Luftbild: LGL Bad.-Württemberg).

Tab. 1:

Merkmale der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt. Die Uferneigung wurde zwischen 394,32 und 392,57 m NHN = 0,90 – 2,65 m unter mittleren Mittelwasserstand (Periode 1990-2017) gemessen. SP – Sipplingen-Osthafen, UU – Unteruhldingen-Stollenwiesen, HGR – Hagnaueraturierung, HGM – Hagnau-Ufermauer, KI – Kirchberg, LA – Langenargen, KR – Kressbronn.

	SP	UU	HGR	HGM	KI	LA	KR
Exposition (° Windrose, Sektor)	205° SW	245° SSW	202° SSW	195° SSW	222° SW	217° SW	216° SW
Länge des Uferabschnitts (km)	0,40	0,44	0,20	0,20	0,20	0,44	0,60
Breite der Uferplattform	130 m	205 m	125 m	210 m	225 m	275	180 m
Uferneigung	1:58	1:97	1:27	1:77	1:35	1:97	1:60
Uferverbauung	verbaut	verbaut	verbaut	verbaut	naturnah	verbaut	verbaut
Uferrenaturierung	ja	nein	ja	nein	nein	ja	nein
UNESCO-Unterwasserdenkmäler	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein
denkmalpfl. Erosionssicherung	ja	ja	entfällt ^(*)	nein	entfällt ^(*)	entfällt ^(*)	entfällt ^(*)

^(*) – kein Unterwasserdenkmal bekannt.

In der Abbildung 4 sind die häufigsten **Objekttypen** der Oberflächenbedeckung aufgeführt. Im Sublitoral traten insgesamt nur 11 verschiedene Objekttypen auf, im Eulitoral waren es bereits 20 und das Epilitoral wies mit 30 verschiedenen naturnahen und anthropogenen Objekttypen die größte Bandbreite auf.

Im **Sublitoral** machten ‚vegetationsbedeckte und natürlicherweise vegetationsfreie Flächen‘ bereits 93,7 % der Gesamtfläche aus; es handelte sich dabei um den mit Unterwasservegetation besiedelten Seegrund einschließlich einiger vegetationsfreier Flächen ohne erkennbare strukturelle Beeinträchtigung. Weitere 2,5 % waren ‚Freizeit-beeinträchtigte Flächen‘ beispielsweise im Vorland von Badestellen. Von einer gewissen Bedeutung waren noch ‚Häfen/Marinas‘ mit 2,3 %.

Im **Eulitoral** nahmen ‚Freizeit-beeinträchtigte Flächen‘ knapp die Hälfte der Fläche ein (46,9 %), gefolgt von einer meist schüttereren ‚Ufer-Pioniervegetation‘ (18,8 %, v. a. die Strandrasen- und Seggen-Vegetation sowie die schüttereren Röhrichte auf der Fläche Kirchberg) und ‚Häfen/Marinas‘ (12,5 %). ‚Bruch-, Aue-, Feuchtwälder‘ als Reste der naturnahen Vegetation trugen nur 1,0 % der Fläche bei. Aus der Aufstellung wird die Dominanz von Beeinträchtigungen durch Freizeitnutzungen deutlich.

Das **Epilitoral** war gekennzeichnet durch Siedlungsflächen, i. E. ‚Einzel- und Reihenhäuser‘ (39,9 %) mitsamt ihren ‚Zier-, Garten- und Grünanlagen‘ (20,8 %), ‚Wegen, Plätzen und Straßen (versiegelt)‘ (7,9 %) und ‚Schienentrassen‘ (2,0 %). ‚Bruch-, Aue- und Feuchtwälder‘, die auf die Untersuchungsfläche Kirchberg beschränkt sind, machten immerhin 6,1 % aus. Weiterhin waren verschiedene Formen freizeitgenutzter Flächen von Bedeutung (insgesamt 14,1 %).

Uferbefestigungen können in unterschiedlicher Form auftreten (vgl. Kapitel 8). In den Untersuchungsflächen waren besonders die Typen ‚massive Uferbefestigungen - Betonwände, betonierte Mauern‘ (1,43 km) sowie ‚massive Uferbefestigungen - Geröll- und Blocksteinwurf‘ (0,12 km) häufig vertreten.

Zu den **reliefverändernden Objekten** gehören die Typen ‚Substratveränderungen – sonstige‘ einschließlich der denkmalpflegerischen Erosionsschutzschüttungen vor Sipplingen und Unteruhdingen, die ‚Renaturierungsflächen‘ (in SP, HGR, LA) sowie die teils sehr breiten ‚Reliefverändernden Auffüllungen‘ hinter den Ufermauern und die ‚Uferlinienverändernden Auffüllungen‘ durch die Hafentmolen von Unteruhdingen und Langenargen. Im Bereich von Häfen (v. a. UU) traten ‚Reliefverändernde Austiefungen‘ auf. Generell wurden Geländeänderungen dieser Art nur indirekt und mit einer gewissen Beurteilungsunsicherheit erfasst. Aus diesem Grund sind auch etwaige Auskolkungen am Kopf der Fahrgastschiffahrtstege nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 9). Hoch aufgelöste Seeboden-Vermessungen, wie sie durch das ‚Tiefenschärfe‘-Projekt ([15]) bereitgestellt wurden, verbessern die quantitative Erfassung deutlich.

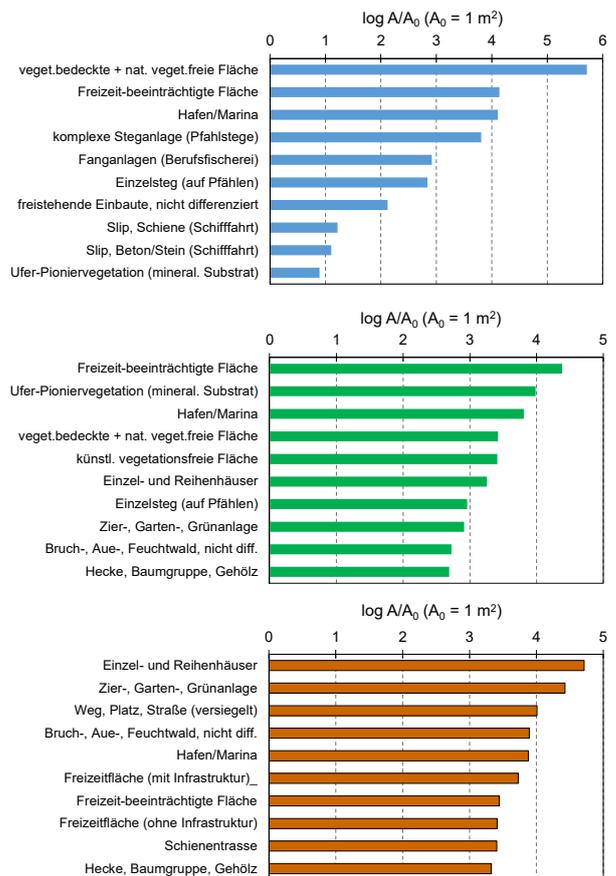


Abb. 4:

Landbedeckung im Sub-, Eu- und Epilitoral der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt ([8]). Dargestellt sind die jeweils 10 flächenmäßig größten Objekttypen.

Strömungsbeeinträchtigte Flächen waren vor allem im Umfeld von Quereinbauten (Hafenmauern und -molen) wie z. B. vor Sipplingen, Unteruhdingen und Langenargen vorhanden. Von ihnen ist eine großflächige Beeinflussung der Strömung und damit des Sedimenttransports in der Flachwasserzone zu erwarten. Auch die Schiffsanleger in Hagnau und Kressbronn haben einen Einfluss auf die uferparallele Strömung, aber durch die Stelzenbauweise (Durchströmung möglich) ist dieser weniger stark ausgeprägt. Die Flächen wurden aufgrund hypothetischer Annahmen konstruiert, können aber mitunter durch Auflandungen von Feinsedimenten und/oder Treibgut identifiziert werden. Eine genaue Quantifizierung der Flächen ist nur mit horizontal aufgelösten Strömungsmessungen unter Verwendung von Driftern und hydrodynamischer Modellierung möglich (siehe Kapitel 6).

MONITORINGSTRATEGIEN

Die Erfassung hydromorphologischer Merkmale der Seeuferzone erfolgt vor dem Hintergrund unterschiedlicher **Zielsetzungen**. Entsprechend unterschiedlich sind die Monitoringansätze. Wir beschränken wir uns hier auf:

- die ökologische Zustandsermittlung und überblicksweise Überwachung nach WRRL ([16]), z. B. für die Bewertung langfristiger Trends und der Auswirkung anthropogener Einflüsse,
- die operative Überwachung nach WRRL, wenn der Wasserkörper im ersten Bewirtschaftungsplan als gefährdet eingeschätzt wurde, die Bewirtschaftungsziele möglicherweise nicht zu erreichen.

Wasserstandsdynamik

Die wesentlichen Eckpunkte des Monitorings der Wasserstandsdynamik sind:

- (1) Länge und Vollständigkeit der verfügbaren Pegel-Zeitreihe,
- (2) Intervalle der Pegelablesungen in Abhängigkeit von der mittleren und maximalen täglichen und jährlichen Schwankungsbreite,
- (3) die Analyse und die Darstellung.

In vielen Fällen, v. a. bei grundwassergespeisten Seen der norddeutschen Tiefebene sind monatliche **Pegelmessungen** ausreichend. Bei hohen täglichen Schwankungen (Speicherseen) können mehrere tägliche Messungen oder zumindest die Erfassung der täglichen Minima und Maxima erforderlich sein. Am Bodensee existieren mehrere, kontinuierlich messende Pegelstationen. Methoden zur Validierung von Wasserstandsdaten und zur Zerlegung von **Wasserstandszeitreihen** können der Fachliteratur entnommen werden (z. B. [1]; vereinfachte Vorgehensweise in [7] Kap. 4.8). Eine Zeitreihenanalyse der Wasserstandsdynamik entsprechend unseren Empfehlungen (s. o.) setzt eine ununterbrochene Beobachtungsreihe von mindestens 25 bis 30 Jahren voraus. Erfahrungsgemäß lassen sich bei kürzeren Zeitreihen Trends oft nicht signifikant nachweisen. Beispielsweise waren die in Abbildung 2 dargestellten Trends für die aktuell noch nicht abgeschlossene meteorologische Normalperiode (1.12.1990 bis 30.11.2020) nicht signifikant, wohl aber für einen längeren Zeitraum von 87 Jahren.

Die **Auswertung** besteht in der Darstellung der Tages- und Jahresperiodizität, des Trends und der stationären Bedingungen (Mittelwasserstände) im Ist-Zustand im Vergleich zu einem naturnahen Referenzzustand. Allerdings liegen hinsichtlich der Referenzbedingungen an mitteleuropäischen Seen nur wenige Erkenntnisse vor.

Entwicklungs- und Renaturierungsmaßnahmen im Uferbereich sind gewöhnlich auf Standzeiten von mehreren Jahrzehnten oder auf unbestimmte Lebensdauer ausgelegt. Wenn sich während dieser Zeitspanne die Wasserstandsdynamik ändert, sollten die ökologischen Auswirkungen auch unter den zukünftigen Wasserstandsbedingungen betrachtet werden.

Uferstrukturelle Bedingungen

Wesentliche Eckpunkte eines Monitoringverfahrens der uferstrukturellen Bedingungen sind:

- (1) die Wahl der wichtigsten Datenquellen (Luftbilder/DOPc, Karteninformationen, digitale Landschaftsmodelle, digitale Höhenmodelle, Geländeerkundung, Expertenurteile),
- (2) die zeitliche Auflösung (Überwachungsintervall nach Anh. V, Ziff. 1.3.4 WRRL: alle 6 Jahre),
- (3) die räumliche Auflösung (Differenzierung nach Uferzonen, Länge und Definition der Erfassungsuferabschnitte, minimale Größe der zu kartierenden Objekte),
- (4) die sachliche Auflösung (Anzahl der GIS-Layer, Anzahl und Generalisierungsgrad der jeweils unterschiedenen Objekttypen, Inhalte der Objekttypenkataloge),
- (5) die Wahl der Bearbeitungs- und Darstellungsplattform (Datenbank-, GIS-Software, etc.),
- (6) die Beschreibung des Referenzzustands (i. d. R. der naturnahe Zustand) einschließlich der Definition und Rekonstruktion einer Referenzuferlinie,
- (7) die Produkte und ihre Darstellung (z. B. Index-Berechnung),
- (8) Szenarientauglichkeit (Simulation bzw. vorgezogene Planungsrealisation).

zu (1)

In Übereinstimmung mit den gängigen Erfassungs- bzw. Klassifikationsverfahren empfehlen wir als primäre Datenquelle die Nutzung von **georeferenzierten Farbluftbildern** (DOPc), die von den Vermessungsämtern der Länder in hoher Auflösung (meist 0,25 bis 0,40 m/Pixel) vorgehalten werden. Weiterhin können historische Luftbilder verwendet werden, um die Veränderung bzw. Entwicklung in die Betrachtung mit einzubeziehen. Die Luftbildinformationen werden üblicherweise in einem Rhythmus von drei Jahren nachgeführt, so dass eine aktualisierte Erfassung und Klassifikation bzw. Bewertung möglich ist.

Bestimmte Merkmale können häufig nur schwer anhand von Luftbildern erschlossen werden. Hierzu gehören:

- lineare Objekte (Ufermauern, Spundwände, Gräben u. a.) und Objekte, die aufgrund der Vegetationsbedeckung (Baumkronen) nicht sichtbar sind (Trampelpfade, ‚wilde‘ Seezugänge u. a.),
- Merkmale des litoralen Seebodens (Korngröße, erosive und akkumulative Strukturen, Bodendenkmäler, kleine Einleitungen bzw. Wasserentnahmen), insbesondere, wenn die Wassersäule z. B. aufgrund einer hohen trophischen Belastung eine geringe Transparenz besitzt,
- Objekte, die im Schlagschatten hoher Uferbäume verborgen sind.

Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich eine zusätzliche **Geländeerkundung** von der Seeseite und von der Landseite. Dabei kann es sich um eine visuelle Erfassung durch geschultes Personal oder um autonom arbeitende Messfahrzeuge handeln (z. B. der ‚Hydrocrawler‘, vgl. Kapitel 5).

Aus den erfassten Daten lassen sich ökologisch bedeutsame und praxisrelevante Informationen i. A. nur unter Zuhilfenahme von **Experteneinschätzungen** ableiten. Wir empfehlen aber, die Schritte der objektiven Datenerfassung und -darstellung deutlich von den interpretativen Schritten zu trennen, die zu dem Expertenurteil geführt haben. Die auf solche Weise gewonnenen Erhebungsdaten behalten auch nach Jahren, bei geänderten Randbedingungen oder bei wissenschaftlich-technischem Fortschritt ihre Gültigkeit.

zu (2)

Die WRRL sieht in Anh. V, Ziff. 1.3.4 ein **Überwachungsintervall** von 6 Jahren vor, es sei denn, Sachverständigenurteile erlauben längere Intervalle ([16]). Nach unserer Einschätzung können längere Intervalle durchaus vertretbar sein, da sich Strukturveränderungen größerer Uferabschnitte zumeist über längere Zeiträume erstrecken.

zu (3)

Hinsichtlich der **räumlichen Auflösung** empfehlen wir eine Differenzierung in Subzonen (vgl. Kapitel 2). Üblicherweise nehmen anthropogene Nutzungen im landwärtigen Bereich ihren Ausgang, während im Sublitoral die uferstrukturellen Eingriffe nach Umfang und Vielfalt eingeschränkt sind, es sei denn, das Sublitoral wurde zuvor aufgeschüttet. Weiterhin empfehlen wir die Einteilung des gesamten Ufers in gleich lange Abschnitte von jeweils 50, 100 oder 200 m Länge. Die Abschnitte können als Ausgangspunkt für die Bildung von Ufersegmenten dienen, die die zonalen Subsegmente des Epi-, Eu- und Sublitorals enthalten. Die Einteilung in sog. ‚homogene Abschnitte‘ variabler Länge halten wir für ungünstig, da dieses Einteilungsprinzip (i) stark durch subjektive Einschätzungen geprägt ist, und (ii) den Nachteil besitzt, dass beispielweise ein einziges Uferbauwerk aus *einem* Abschnitt leicht *drei* ‚homogene‘ Abschnitte machen kann, so dass in der zeitlichen Entwicklung ein direkter Vergleich kaum mehr möglich ist.

zu (4)

Die **sachliche Auflösung** ist durch die Wahl der Zahl der GIS-Layer bzw. der Objekttypenkataloge sowie durch die Zahl der Objekttypen bestimmt. Grob kann man ‚Übersichtsverfahren‘ und ‚Detailverfahren‘ unterscheiden, wobei erstere sich oft allein auf die Luftbildinterpretation mit einem reduzierten Satz an Objekttypen stützen und letztere eine zeit- und arbeitsin-

tensive Geländeerkundung erfordern. Wir empfehlen eine Verfahrensweise, bei der sich die Übersichtsergebnisse rechnerisch aus den Detailergebnissen ableiten lassen, andererseits die Übersichtsergebnisse mit möglichst geringem Zeit- und Arbeitsaufwand zu Detailergebnissen erweitert werden können. Beide Verfahren sollten sich zweckmäßigerweise auf die gleichen geometrischen Grundlagen (Referenzuferlinie, Segmentlänge) stützen.

zu (5)

Die erfassten Daten lassen sich zwar grundsätzlich mit einfachen Mitteln (Tabellenkalkulationsprogramme) bearbeiten, auswerten und darstellen, für anspruchsvolle **Auswertungen** größerer Projekte sind jedoch Datenbank- und GIS-Programme empfehlenswert, von denen sowohl kostenpflichtige als auch Freeware-Versionen verfügbar sind. Die Datenbanken erlauben die Erstellung vielfältiger sachbezogener Abfragen, die im GIS-Programm visuell dargestellt und in Kartenform ausgegeben werden können.

zu (6)

Die breit gestreuten Informationen, die in einem Uferabschnitt (Segment) erfasst und ausgewertet wurden, werden oft zu einer eindimensionalen **Kenngroße** zusammengezogen. Diese Kenngroße kann in einer mehrstufigen **Bewertungsskala** bestehen, die den ökologischen Wert oder den Grad der Abweichung vom Referenzzustand widerspiegelt (Index). Die WRRL sieht die letztgenannte Option vor. Dabei ist nicht nur – wie oben beschrieben – der Ist-Zustand zu erheben, sondern dieser ist auch mit einem historisch rekonstruierten oder modellbasierten **Referenzzustand** zu vergleichen. Die konzeptionelle Festlegung eines Referenzzustands sollte die räumliche Festlegung einer Referenz-Uferlinie beinhalten. Wenn als Referenz die naturnahe Uferlinie gewählt wird, können durch Vergleich der Ist-Uferlinie mit der Referenz-Uferlinie künstliche Vorschüttungen identifiziert und quantifiziert werden. Wir empfehlen eine Definition des uferstrukturellen Referenzzustands, die sich auf die Uferstruktur konzentriert und nicht-strukturelle Aspekte (Wasserstandsdynamik, trophische Bedingungen u. a.) außen vor lässt³. Der Referenzzustand ergibt sich dann aus dem Fehlen *anthropogener* Strukturen, womit im Sub-, Eu- und Epilitoral nur *naturnahe* (Luftbild-)Objekte vorkommen. Abweichungen vom Referenzzustand bemessen sich entsprechend (i) aus der Flächen- oder Längserstreckung und (ii) der spezifischen ökologischen Wirkung anthropogen beeinflusster Objekttypen.

zu (7)

Ein wichtiger Gesichtspunkt sind die **Aggregierungsregeln**, die bestimmen, wie die Einzelergebnisse zu einer übergreifenden

³ Definitionsvorschlag: Die uferstrukturellen Referenzbedingungen eines natürlichen Sees entsprechen dem der Gegenwart am nächsten liegenden historischen Zustand, in dem die o. g. direkten menschlichen Eingriffe noch nicht oder nur in sehr geringfügigem Umfang zur

Veränderung der naturnahen Struktur (Ausdehnung und räumliche Anordnung naturnaher Objekttypen) des Seeufers geführt haben (vgl. [3], Kap. 6.2.1).

Gesamtklassifikation zusammengeführt werden. Erfahrungsgemäß beinhalten die Aggregierungsregeln ungeachtet der Objektivität des Rechenvorgangs weitreichende subjektive Wertsetzungen, die fachlich oft unzureichend begründet und in ihren Auswirkungen auf das Endergebnis nur schwer nachzuvollziehen sind. Wir empfehlen:

- die gleichgewichtige Berücksichtigung der Habitatansprüche möglichst vieler Pflanzen- und Tiergruppen, also nicht die Fokussierung z. B. auf Fische oder Makrozoobenthos,
- die Konzentrierung subjektiver oder gesellschaftlicher Wertsetzungen in sog. ‚Wichtungsfaktoren‘, die den Grad der Abweichung vom Referenzzustand und damit aus ökologischer Sicht die nachteilige Wirkung auf indigene Pflanzen- und Tierarten ausdrücken,
- ein additives Modell der Aggregation von Einzelergebnissen mit den Grenzwerten 1 (= sehr guter Zustand, Referenzzustand) und 5 (= sehr schlechter Zustand). ‚Alles oder nichts‘-Regeln, ‚Wenn-Dann‘-(Konditional-)Regeln oder die Vergabe von Malus- oder Bonus-Punkten lassen sich selten fachlich ausreichend begründen und führen zu einem unnötigerweise komplexen und intransparenten Aggregationsverfahren.

zu (8)

Uferstrukturelle Klassifikations- und Bewertungsverfahren sollten szenarietauglich, also in der Lage sein, die Auswirkungen von Entwicklungs- oder Renaturierungsplanungen vorwegzunehmen (vgl. Kapitel 11). Im Zuge eines solchen **Szenarios** wird eine bestimmte Uferfläche mit den Objekten im Ist-Zustand durch die geplanten Objekte ersetzt, wodurch sich Änderungen des Index-Wertes ergeben.

Die in diesem Kapitel erläuterten Empfehlungen wurden anhand der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt erprobt (vgl. S.26-27) und mit den Ergebnissen anderer Klassifikationsverfahren verglichen (vgl. S. 27-29).

UFERSTRUKTURELLER ZUSTAND DER HYMOBIOSTRATEGIE-UNTERSUCHUNGSFLÄCHEN

Die Untersuchung des uferstrukturellen Zustands der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt orientierte sich an der Detail-Variante des **HMS-Verfahrens**, das zuvor an zahlreichen Seen Brandenburgs und am Bodensee-Untersee angewandt worden war ([7], [5]).

Die **Grundgeometrie** des Verfahrens stützte sich auf die rekonstruierte natürliche Uferlinie im vorindustriellen Referenzzustand. Zur Rekonstruktion standen ältere Kartenwerke zur Verfügung, deren Uferlinie im GIS über die aktuellen Luftbilder gelegt wurde. Darauf aufbauend wurden mit Hilfe der Bodensee-Tiefenvermessungsdaten ([15]) die Grenzen von Sub-, Eu- und

Epilitoral sowie die ufersenkrecht Begrenzungslinien der Kartierabschnitte (Segmente) konstruiert.

Die Arbeiten wurden in ArcGIS 10.5 (ESRI) mit Verbindung zu einer MS-Access-Datenbank durchgeführt. In der Datenbank waren auch die **Objektkataloge** für die ‚strukturgebenden Objekte‘ (SO, flächenhafte naturnahe oder anthropogene Luftbildobjekte), die linearen ‚Uferbefestigungen‘ (UB), die ‚reliefverändernden Objekte‘ (RO; Vorschüttungen, Austiefungen) sowie die ‚strömungsbeeinträchtigten Flächen‘ (SBF) hinterlegt. Allen Objekten wurde ein objektspezifischer Index zugewiesen, der aus ökologischer Perspektive die ‚Distanz‘ zu standortgemäßen naturnahen Objekten ausdrückt ([8]).

Die Flächensumme der **strukturgebenden Objekte** (SO) entspricht genau der Gesamtfläche des betreffenden Subsegments, d. h. die Uferzone wurde lückenlos erfasst. Für nicht klassifizierbare Objekte stand die Kategorie ‚Sonstige‘ zur Verfügung. Dank der sehr guten Qualität der georeferenzierten Farbluftbilder war eine Zuordnung meist problemlos möglich. Die kleinsten kartierten Objekte besaßen eine Fläche von weniger als 10 m², die größten waren zwischen 15.000 und 20.000 m² groß.

Bei den linearen Strukturen der **Uferbefestigungen** (UB) wird unterschieden, ob der Fuß der Ufermauer unterhalb oder oberhalb der natürlichen Mittelwasserlinie steht. Im ersten Fall sind die anzunehmenden ökologischen Konsequenzen größer als im zweiten Fall, denn hoch liegende Mauern lassen noch die Existenz eulitoral Lebensräume zu, während diese bei tief liegenden Mauern fast völlig überschüttet sind. Der mittlere Verbauungsgrad unterhalb der langjährig mittleren Mittelwasserlinie (mMWL) lag bei 39,4 %, die Verbauung unterhalb und oberhalb der mMWL bei 63,3 % ([8]). Die Differenz zwischen den beiden Werten weist darauf hin, dass ein erheblicher Teil der Ufermauern etc. oberhalb der mMWL lag. Die Untersuchungsfläche Kirchberg (KI) wies keinerlei Uferverbau auf, HGM, UU und KR waren dagegen weitgehend verbaut. Auch die heute renaturierten Flächen HGR und LA besaßen ursprünglich lange Ufermauern (vgl. Tabelle 1).

Reliefverändernde Objekte (RO) sind **Aufschüttungen** oder **Austiefungen**, die das naturnahe Relief des Seebodens in der Sub- und/oder der Eulitoralzone verändert haben. Im Sublitoral der Untersuchungsflächen wiesen 10,2 % der Sublitoralfäche Reliefveränderungen gegenüber dem Referenzzustand auf, im Eulitoral waren es 65,9 % ([8]).

Ufernormale hydraulisch undurchlässige Einbauten haben unabhängig von ihrer projizierten Grundfläche das Potential, die ufernahen Strömungen und damit den Feststofftransport in der Flachwasserzone zu beeinflussen. Mit Ausnahme der Flächen Kressbrunn und Unteruhdingen (vgl. Kapitel 6) lagen keine hydrodynamischen Modellergebnisse vor. Deswegen wurde hilfsweise angenommen, dass beidseits eines solchen Einbaus jeweils die Hälfte der Fläche betroffen ist, die durch die ufernormale Achse des Bauwerks sowie eine Linie gleicher Länge entlang der (aktuellen) Uferlinie aufgespannt wird. Nur

die Flächen Kirchberg und Hagnau-Renaturierung waren frei von **strömungsbeeinträchtigten Flächen**. Im Sublitoral der anderen Untersuchungsflächen waren durchschnittlich 6,5 % der Fläche und im Eulitoral 24,4 % der Subzonenfläche betroffen ([8]).

Aus den Flächen und den spezifischen Beeinträchtigungsindizes der strukturgebenden Objekte (SO), der Uferbefestigungen (UB), der reliefverändernden Objekte (RO) und der strömungsbeeinträchtigten Flächen (SBF) wurde stufenweise der übergreifende **Beeinträchtigungsindex** eines Ufersubsegments ($I_{SSG,total}$) ermittelt. Die Abbildung 5 zeigt, dass die Sublitoralzone aller Untersuchungsflächen vergleichsweise gering verändert war. Dies ist ihrer großen seewärtigen Ausdehnung geschuldet und der Tatsache, dass die meist ufernahen anthropogenen Veränderungen nur einen geringen Flächenanteil einnehmen. Im Eulitoral war der Nutzungsdruck bereits bedeutend größer, so dass – mit Ausnahme der Fläche Kirchberg – der $I_{SSG,total}$ zwischen 3,2 und 4,4 lag. Noch höher war der Beeinträchtigungsindex mit 4,0 bis 4,4 in der Epilitoralzone; lediglich der Uferwaldstreifen in Kirchberg war landseits nur von einem Fußpfad durchzogen und entsprechend wenig verändert.

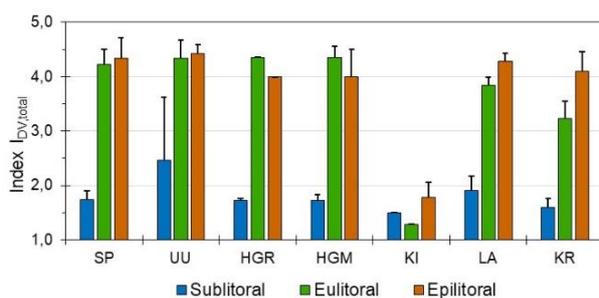


Abb. 5:

Uferstruktureller Beeinträchtigungsindex $I_{DV,total}$ der Subzonen (Sub-, Eu-, und Epilitoral) der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt (Mittelwerte, Standardabweichungen aus n Segmenten). Abkürzungen der Untersuchungsflächen siehe Tabelle 1.

VERGLEICH VON UFERSTRUKTUR-KLASSIFIKATIONSVERFAHREN

Sechs der in Deutschland und der Schweiz gängigen **Verfahren der Uferstruktur-Klassifikation** wurden an den sieben HyMoBio-Strategie-Untersuchungsflächen getestet und die Klassifikationsergebnisse wurden miteinander verglichen ([5] und die darin zitierte Literatur). Drei Verfahren waren Varianten des HMS-Verfahrens (HMS-DV, HMS-ÜV, HMS-Schnellverfahren), die bisher an brandenburgischen Seen angewandt wurden, ein weiteres war für den Bodensee entwickelt worden (IGKB-Bodenseeuferbewertung, [2], [14]) und das fünfte untersuchte Verfahren soll nach Vorstellungen der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) künftig bundesweit für die Umsetzung der WRRL angewendet werden (Tabelle 2). Das sechste Verfahren,

das Modul ‚Ökomorphologie Seeufer‘ des Schweizer Bundesamts für Umwelt (BAFU) konnte aufgrund besonderer Verfahrensmerkmale in diesem Rahmen nicht angewandt werden.

Über die Anwendung des **HMS-Detailverfahrens** (HMS-DV) wurde bereits oben berichtet. Einfacher durchzuführen war das **HMS-Übersichtsverfahren** (HMS-ÜV), das sich im Unterschied zum HMS-DV auf die aktuelle Uferlinie (Mittelwasserlinie) bezieht und mit einem stark vereinfachten Objekttypenkatalog der Landoberfläche (‚strukturgebende Objekte‘, SO) auskommt. Auf die Erfassung linearer Objekte (z. B. Ufermauern) wird dabei verzichtet. Das letztgenannte Verfahrensmerkmal trägt zur besseren Vergleichbarkeit mit Ufern anderer Seen bei, an denen solche Strukturen im Luftbild nicht mit Gewissheit zu erkennen sind. Sowohl HMS-DV als auch HMS-ÜV erfordern eine Kartierung der vorgefundenen Objekttypen in einem GIS, gefolgt von einer automatisierten Berechnung des Subsegment-Index in einer Datenbank. Die denkbar einfachste Variante der HMS-Gruppe ist die synoptische Experteneinschätzung, die im **HMS-Schnellverfahren** realisiert wurde. Als ‚Experten‘ standen versuchsweise 18 Bachelor-Studierende zur Verfügung, denen während eines Praktikums das nötige ökologische und verfahrenstechnische Wissen vermittelt wurde ([5]). Wie nicht anders zu erwarten, wichen die Klassifikationsergebnisse der einzelnen Experten voneinander ab, so dass hier der Median von 7 bis 10 Einzelklassifikationen für die weitere Auswertung herangezogen wurde.

Die Klassifikationsergebnisse der **IGKB-Bodenseeuferbewertung** wurden aus einer Datenbank der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) übernommen, so dass keine eigenen Erfahrungen mit der praktischen Anwendung gemacht werden konnten. Die Verfahrensmerkmale werden an anderer Stelle diskutiert ([4]).

Bei der Anwendung des **LAWA-Verfahrens** zur uferstrukturellen Gesamtsee-Klassifizierung wurden eine Reihe von Widersprüchlichkeiten und Inkonsistenzen sichtbar. Die strenge räumliche Festlegung der ‚Flachwasserzone‘ war für den Bodensee mit seiner breiten Uferplattform und der starken (natürlichen) Wasserstandsdynamik ungeeignet. Die in der Verfahrensanleitung vorgesehene Klassifikation (Seeufer Typen nach landseitigen Gelände-Neigungsklassen und Hauptsubstrattypen) konnte die realen Verhältnisse am Bodenseeufer nicht plausibel abbilden. Die Festlegung der ‚potentiell von Röhrichten besiedelbaren Fläche‘ bis zur 1 m-Tiefenlinie war den Verhältnissen am Bodensee-Ufer nicht angemessen, da hier zahlreiche von Natur aus röhrichtfreie Uferabschnitte auftreten. Die Hilfsannahmen und die tief gestaffelten Ausnahmeregelungen, die die Verfahrensanleitung für solche Fälle vorsieht, erschienen unzureichend begründet. Die vorgegebenen offenen Objekttypenkataloge in der Flachwasser-, Ufer- und landseitigen Umfeldzone spiegelten die Schadstrukturen am Bodensee-Ufer nur sehr unzureichend wider; bei der Umsetzung musste umfänglich von der sog. ‚Öffnungsklausel‘ (breite *ad hoc*-Entscheidungsfreiheiten der Bearbeiter) Gebrauch gemacht werden.

Tab. 2:

Übersicht wichtiger Merkmale der untersuchten Uferklassifikationsverfahren (vgl. [5] sowie in der dort zitierten Literatur).

	IGKB-Bodenseeuferbewertung	LAWA uferstrukturelle Ges.-See-Klassifizierung	BAFU-Modul Ökomorphologie Seeufer	HMS-Detailverfahren	HMS-Übersichtsverfahren	HMS-Schnellverfahren
Bezeichnung des Index	I_{IGKB}	$I_{LAWA,Exp}$	nicht bearbeitet	$I_{DV,total}; I_{DV,SO}$	I_{UV}	$I_{EXP,Md}$
primäre Datenquellen	Geländebegehung	Luftbilder (durch Geländeerkundung ergänzt)	Luftbilder	Luftbilder und Geländeerkundung	Luftbilder	Luftbilder
Kartiereinheiten	ja: 50 m-Abschnitte	ja: homogene Abschnitte variabler Länge	nein: kontinuierliche Erfassung	ja: 100 m-Abschnitte ('Segmente')	ja: 200 m-Abschnitte ('Segmente')	ja: 200 m-Abschnitte ('Segmente')
Subzonen	nein	ja: Flachwasserzone, Uferzone, Umfeldzone	ja: Uferlinie, Uferstreifen, Hinterlandstreifen, Flachwasserzone	ja: Sublitoral, Eulitoral, Epilitoral	ja: Sublitoral, Eulitoral, Epilitoral	ja: Sublitoral, Eulitoral, Epilitoral
Festlegung der Referenzuferlinie	keine (Übernahme der kartografischen Uferlinie)	ja: ungefähre Niedrigwasserlinie im Ist-Zustand	ja: ungefähre Hochwasserlinie im Istzustand	ja: natürliche Uferlinie (im vorindustriellen Zustand)	ja: Mittelwasserlinie im Ist-Zustand	ja: Mittelwasserlinie im Ist-Zustand
Anleitung zur Index-Zuweisung	beispielgebende Beschreibungen und Fotos von 15 Einzelmerkmalen	unvollständige Objekttypenkataloge von bis zu 5 Merkmalsgruppen	unvollständige Objekttypenkataloge von 12 Attributen	vollständige Objekttypenkataloge für ca. 300 SO, UB, RO und SBF	vereinfachter Objekttypenkatalog für ca. 30 SO (keine UB, RO und SBF)	vereinfachter Objekttypenkatalog für ca. 30 SO
Aggregationsverfahren (für jede Subzone / Kartiereinheit)	gewichtete Summe der Einzelindizes	worst-case-Regel	worst-case-Regel Bonus-Prinzip Malus-Prinzip konditionaler Mittelwert	flächen- bzw. längengewichtete Summe der Objekt-Indizes (SO, UB, RO, SBF)	flächengewichtete Summe der Objekt-Indizes (SO)	synoptische Experteneinschätzung (nur SO)
Gesamt-Index	Index 1 bis 5	Index 1 bis 5	Zielerreichungsgrad 1 bis 0	Index 1 bis 5	Index 1 bis 5	Index 1 bis 5

Schließlich führte die Festlegung der ‚Flachwasserzone‘, die nur einen sehr geringen Teil der tatsächlichen Flachwasserzone am Bodenseeufer umfasste, zu einer systematischen Verzerrung der Klassifikationsergebnisse.

Ein Vergleich der Klassifikationsergebnisse (Index-Werte) aller Verfahren war nur auf der Basis der gesamten Untersuchungsflächen möglich, da das LAWVA-Verfahren homogene Uferabschnitte (hier: jeweils eine Untersuchungsfläche) vorsieht und die IGKB-Bodenseeuferbewertung keine Unterscheidung in Subzonen vorsieht. Hierzu mussten die Index-Werte der einzelnen Verfahren auf das gemeinsame Darstellungsniveau angepasst werden (arithmetische Mittelwertbildung über alle Segmente und Subzonen).

Die Ergebnisdarstellung der untersuchten Verfahren erfolgt allgemein durch Angabe des Index-Wertes, der die zunehmende uferstrukturelle Veränderung bzw. den abnehmenden Natür-

lichkeitsgrad repräsentiert. Dabei wurden beträchtliche Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren sichtbar (Tabelle 3). Während die beiden Varianten des HMS-Detailverfahrens zu beinahe identischen Klassifikationen gelangten, wurden die Untersuchungsflächen durch das HMS-Übersichtsverfahren als zu ‚gut‘ eingeschätzt. Das HMS-Schnellverfahren kam zu einer in etwa übereinstimmenden Einschätzung. Dagegen wurden nahezu alle Untersuchungsflächen durch das LAWVA-Verfahren deutlich ‚schlechter‘ beurteilt. Demgegenüber stimmten die IGKB-Indizes besser mit denen der HMS-Verfahrensvarianten überein. Die naturnah belassene Fläche Kirchberg wurde von allen Verfahren übereinstimmend in die ‚beste‘ Kategorie gruppiert; lediglich im IGKB-Verfahren wurde die zweite Stufe ‚naturnah‘ (Index = 2,0) ermittelt

Keines der genannten Verfahren kann von vornherein für sich beanspruchen, die gesamthaft betrachteten ökologisch relevanten Veränderungen der Uferstruktur optimal abzubilden.

Von daher drängt sich kein Verfahren als ‚Referenzverfahren‘ zur Gütebeurteilung der anderen Verfahren auf. Versuchsweise wurde angenommen, dass der Index-Mittelwert aller Verfahren das Optimum darstellt. Auf dieser Grundlage ist eine Gütebeurteilung der einzelnen Verfahren durch paarweisen Vergleich ihrer Klassifikationsergebnisse mit dem Index-Mittelwert möglich (Tabelle 4). Das HMS-Detailverfahren, die IGKB-Bodenseeuferbewertung und das HMS-Schnellverfahren lieferten Ergebnisse, die nahe am gemeinsamen Index aller untersuchten Verfahren lagen, während das LAWA-Verfahren und das HMS-Übersichtsverfahren erheblich und signifikant davon abwichen.

Tab. 3:

Übersicht der Klassifikationsergebnisse der untersuchten Verfahren bezogen auf die gesamte Uferzone (alle Subzonen) der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt. Das IGKB-Verfahren ermittelt den Index-Wert subzonenübergreifend, für die anderen Verfahren wurden die Index-Werte der Subzonen arithmetisch ohne Flächengewichtung gemittelt. Abkürzungen der Untersuchungsflächen siehe Tabelle 1; Abkürzungen der Indizes: $I_{DV, total}$ – Gesamt-Index des HMS-Detailverfahrens, $I_{DV, SO}$ – Index der strukturegebenden Objekte des HMS-Detailverfahrens, I_{UV} – Index des HMS-Übersichtsverfahrens, $I_{EXP, Mj}$ – Index des HMS-Schnellverfahrens, $I_{LAWA, Exp}$ – Index des LAWA-Verfahrens, Expertenmodus, I_{IGKB} – Index der IGKB-Bodenseeuferbewertung.

Untersuchungsfläche	$I_{DV, total}$	$I_{DV, SO}$	I_{UV}	$I_{EXP, Mj}$	$I_{LAWA, Exp}$	I_{IGKB}
SP	2,9	2,7	2,4	3,4	4,0	3,5
UU	3,8	3,6	3,4	3,7	4,7	3,8
HGR	3,3	3,2	2,9	2,7	4,0	3,3
HGM	3,4	3,2	2,9	3,4	4,7	4,0
KI	1,5	1,5	1,5	1,4	1,0	2,0
LA	3,3	3,2	2,9	2,9	3,7	2,9
KR	3,0	2,9	2,9	3,3	4,7	4,0

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Verfahren in der Lage waren, das summarische Ausmaß uferstruktureller Veränderungen wiederzugeben. Bei näherer Betrachtung kamen die Verfahren jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen, die teilweise durch die Art der Festlegung der Referenzuferlinie und die Abgrenzung der Subzonen bedingt waren. Naturbelassene Flächen wurden offenbar mit höherer Präzision erfasst als mehr oder minder stark veränderte Flächen. Uferstrukturelle Veränderungen des Sublitorals wurden mit geringerer Präzision erfasst als solche des Eu- und Epilitorals. Bemerkenswert ist, dass das einfache HMS-Schnellverfahren nicht schlechter abschnitt als die deutlich aufwändigeren ‚messenden‘ Verfahren der IGKB-Bodenseeuferbewertung oder das LAWA-Verfahren der uferstrukturellen Gesamtseeklasseifizierung. Einschränkend muss betont werden, dass die Datenbasis mit $n = 7$ Untersuchungsflächen

sehr klein war, so dass die dargestellten Ergebnisse einer Überprüfung anhand einer breiteren Datenbasis bedürfen.

Tab. 4:

Übersicht der Differenzen zwischen den Indizes der einzelnen Verfahren (I_x) und dem gemittelten Index aller Verfahren als Referenz (I_{REF}): $\Delta I_x = I_x - I_{REF}$. Statistische Auswertung: M – mittlere Abweichung, SD – Standardabweichung der mittleren Abweichungen, $p > |t|$ – Signifikanz des gepaarten t-Tests, $n = 7$ Untersuchungsflächen. Abkürzungen der Untersuchungsflächen siehe Tabelle 1.

Untersuchungsfläche	$\Delta I_{DV, total}$	ΔI_{UV}	$\Delta I_{EXP, Mj}$	$\Delta I_{LAWA, Exp}$	ΔI_{IGKB}
SP	-0,33	-0,84	0,18	0,74	0,24
UU	-0,09	-0,44	-0,22	0,79	-0,05
HGR	0,01	-0,28	-0,52	0,77	0,02
HGM	-0,30	-0,79	-0,24	1,00	0,33
KI	0,05	-0,02	-0,08	-0,48	0,52
LA	0,22	-0,25	-0,26	0,54	-0,25
KR	-0,60	-0,62	-0,31	1,10	0,43
M	-0,15	-0,46	-0,21	0,64	0,18
\pm SD	$\pm 0,28$	$\pm 0,30$	$\pm 0,22$	$\pm 0,52$	$\pm 0,28$
$p > t $	0,21	0,01	0,04	0,02	0,15

UFERSTRUKTURELLE KLASSIFIKATION ALS VERMITTLUNGSTRUMENT

Der uferstrukturellen Klassifikation der Seeufer kommt eine Bedeutung zu, die weit über den Wortlaut der WRRL hinausgeht⁴: Uferstrukturelle Veränderungen gegenüber dem naturnahen Referenzzustand sind für den Betrachtenden unmittelbar mit dem Auge wahrnehmbar und werden hinsichtlich der ökologischen Konsequenzen auch von Nicht-Fachleuten im Großen und Ganzen verstanden. Übersichtskarten, in denen der Grad der anthropogenen Veränderungen durch Index-Werte, die an die Schulnoten Eins bis Fünf erinnern und durch assoziative Farbsignaturen dargestellt sind (z. B. [2]), vermitteln auf eingängige Weise sowohl den Gesamtzustand eines Seeufers als auch den Zustand an einem eng begrenzten Uferabschnitt. Die in der WRRL geforderten Qualitätskomponenten Makrophytobenthos (Tauchblattpflanzen, Kieselalgen) und Makrozoobenthos (wirbellose Bodentiere) sind dazu nicht in gleichem Maße geeignet: Die dabei ermittelten *Metrics* sind von kaum beeinflussbaren Randbedingungen (Witterung, Wasserstand, hydrodynamischer Exposition, natürlicher Variabilität des

⁴ Vgl. hierzu §5 Abs. 4 Satz 2 der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373).

Substrats und zufälligen anthropogenen Störungen) abhängig und für Nicht-Fachleute schwer nachvollziehbar. Sie können allein aus Kostengründen nicht mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung durchgeführt werden, wie dies bei uferstrukturellen Übersichts- und Detailverfahren möglich ist.

Von uferstrukturellen Klassifikationsverfahren darf erwartet werden, dass sie szenarietauglich sind, also das Ergebnis von Planungsvarianten bei Renaturierungs- oder Entwicklungsvorhaben vorwegnehmen können. Damit können sie bereits bei der Öffentlichkeitsbeteiligung, dem Plangenehmigungs- bzw. Planfeststellungsverfahren und danach bei der Erfolgskontrolle eingesetzt werden (vgl. Kapitel 11). Biotische Klassifikationsverfahren sind dazu weit weniger gut geeignet.

Nachteil aller uferstrukturellen Klassifikationsverfahren ist die derzeit noch unzureichende Verknüpfung mit dem Vorkommen und der Abundanz bestimmter Arten(gruppen), beispielsweise der biotischen Qualitätskomponenten der WRRL (Makrozoobenthos, submerse Makrophyten, Kieselalgen, Fische). Hier bestehen breite Möglichkeiten vergleichender Untersuchungen von naturnah erhaltenen Uferabschnitten und von anthropogen veränderten bzw. künstlichen Lebensräumen, wie im HyMoBioStrategie-Projekt aufgezeigt wurde (vgl. Kapitel 8).

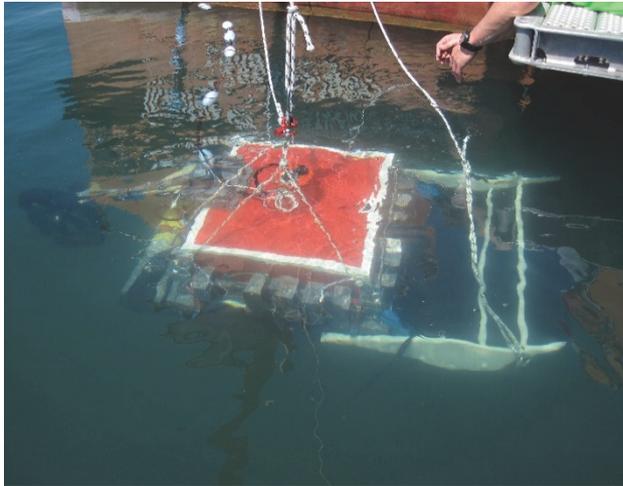
QUELLENVERZEICHNIS

- [1] HELSEL, D. R. und HIRSCH, R. M. (2002): Statistical Methods in Water Resources Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, Chapter A3. – U.S. Geological Survey. 522 S. (Download unter <<https://pubs.usgs.gov/twri/twri4a3/>>, zuletzt aufgerufen im Juli 2018).
- [2] IGKB, Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (2006): Bodensee-Uferbewertung. – Mehrseitiges Falblatt, Karte mit Erläuterungen.
- [3] OSTENDORP, W. (2014): Hydromorphologie der Seen. Band 1: Übersicht der bisherigen Verfahrensentwicklungen (Version 1.0). – Fachbeiträge des LUGV, Heft 140, 86 S., hrsg. vom Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV) Brandenburg, Potsdam.
- [4] OSTENDORP, W. (2017): Bewertungsverfahren zur Seeufer-Struktur: Bodensee-Uferbewertung der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee, IGKB (2006, 2009). – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, 12 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.004.
- [5] OSTENDORP, W. (2018a): Vergleich von Uferstruktur-Klassifikationsverfahren am Beispiel der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, iii + 46 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.015.
- [6] OSTENDORP, W. (2018b): Veränderungen der Wasserstandsdynamik des Bodensees seit 1931. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.017.
- [7] OSTENDORP, W. und OSTENDORP, J. (2014): Hydromorphologie der Seen. Band 2: Erfassung und Klassifikation der hydromorphologischen Veränderungen von Seen nach dem HMS-Verfahren (Anwenderhandbuch). – Fachbeiträge des LUGV, Heft 141, 236 S., hrsg. vom Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV) Brandenburg, Potsdam.
- [8] OSTENDORP, W. und OSTENDORP, J. (2018): Uferstruktur-Klassifikation der Untersuchungsflächen des HyMoBioStrategie-Projekts nach dem HMS-Verfahren. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, ii + 28 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.014.
- [9] OSTENDORP, W., BREM, H., DIENST, M., JÖHNK, K., MAINBERGER, M., PEINTINGER, M., REY, P., ROSSKNECHT, H., SCHLICHTERLE, H., STRAILE, D. und STRANG, I. (2007): Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Bodensee. – Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensee und seiner Umgebung 125: 199–244.
- [10] SCHEIFHACKEN, N. (2006): Life at turbulent sites: benthic communities in lake littorals interacting with abiotic and biotic constraints. – Dissertation, Limnologisches Institut der Universität Konstanz.
- [11] SCHEIFHACKEN, N., FIEK, C. und ROTHHAUPT, K.-O. (2007): Complex spatial and temporal patterns of littoral benthic communities interacting with water level fluctuations and wind exposure in the littoral zone of a large lake. – Fundamental and Applied Limnology 169 (2): 115–129.
- [12] SEIBT, C., PEETERS, F., GRAF, M., SPRENGER, M. und HOFMANN, H. (2013): Modeling wind waves and wave exposure of nearshore zones in medium-sized lakes. – Limnology and Oceanography 58 (1): 23–36, DOI: 10.4319/lo.2013.58.1.0023.
- [13] STOLL, S., HOFMANN, H. & FISCHER, P. (2010): Effect of wave exposure dynamics on gut content mass and growth of young-of-the-year fishes in the littoral zone of lakes. – Journal of Fish Biology 76: 1714–1728, DOI: 10.1111/j.1095-8649.2010.02611.x.
- [14] TEIBER, P. (2009): Limnologische Bewertung der Ufer- und Flachwasserzone des Bodensees. – Berichte der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Blaue Reihe, Bd. 55, 115 S.
- [15] WESSELS, M., ANSELMETTI, F., BARAN, R., HILBE, M., GESSLER, S und WINTERSTELLER, P. (2015): Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee. Ein INTERREG IV-Forschungsprojekt von 2012–2015. – Bericht der Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Blaue Reihe, Bericht Nr. 61: 106 S.
- [16] WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie – WRRL). – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 327/1, 22.12.2000, S. 1–83.

Kapitel 4

Unterwassergeoradar zur Untersuchung von Sedimenten der Flachwasserzone

Martin Wessels und Jens Hornung ¹



- Der geologische Hintergrund der Flachwasserzone sollte für die Interpretation von Messungen des aktuellen Geschehens, etwa der Erosionsgefährdung oder der Sedimentumlagerung in der Flachwasserzone, bekannt sein.
- Mit dem Prototyp eines Unterwassergeoradars wurde eine Technik entwickelt, die es erlaubt, die Ausgangssituation für viele Mess- und Monitoring Programme zum Sohltransport und zur Sedimentumlagerung zu erfassen.
- Eine Weiterentwicklung ist notwendig, um diese Technik auch von weniger gut ausgestatteten und kleineren Booten einsetzen zu können.

Dieses Kapitel zeigt die ersten Messergebnisse eines Unterwassergeoradars. Es wurde entwickelt, um die Stratigraphie von Oberflächensedimenten in der Flachwasserzone zu erkunden, in denen hydroakustische Verfahren in der Regel scheitern. Die ersten Erfahrungen in Untersuchungsgebieten des HyMoBioStrategie-Projekts zeigen das hohe Potential dieser Technik.

EINLEITUNG

Sedimente in der Flachwasserzone und unmittelbar am Ufer von Seen sind wegen des hohen Energieeintrags durch Wind und Wellen in der Regel relativ grobkörnig (Sand oder Kies, Gerölle, vgl. Kapitel 7). Die horizontale und vertikale Ausdehnung einzelner lithologischer Einheiten kann sehr gering sein, so dass die Sedimentkörper häufig ausgesprochen kleinräumig strukturiert sind.

Mit einfachen Mitteln entnommene Sedimentkerne sind normalerweise nicht länger als ca. 50 cm und repräsentieren lediglich Punkt-Informationen. Darauf basierende Untersuchungen haben deshalb den Nachteil, nur für sehr kleine Flächen repräsentative Informationen zu liefern ([3]). Das Erkennen vieler geologischer Strukturen und der Genese größerer Uferabschnitte vor dem Hintergrund kurzfristiger Akkumulation und Erosion ist darum mit Sedimentkernen schwierig. Auch längere Sondierungen, wie sie im Rahmen von archäologischen Untersuchungen vorgenommen werden, sind nur eine Interpolation zwischen einzelnen Messorten und sind zudem ausgesprochen aufwändig.

Zum Verständnis der Genese eines Sedimentkörpers bieten sich alternativ profilierende Verfahren mit klassischen hydroakustischen Methoden an (zusammengefasst unter dem Oberbegriff ‚Sedimentecholot‘ oder ‚Subbottom-Profiler‘, in der Regel mit Frequenzen zwischen 3-10 kHz). Diese scheitern jedoch in der Regel bei Anwesenheit gröberer Sedimente (Sand und Kies) oder freiem Gas im Sediment, so dass die akustische Energie nicht tiefer in den Untergrund eindringen kann ([4]).

Elektromagnetische Wellen erfassen dagegen sehr gut die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Untergrundes, die wiederum von der mineralogischen Zusammensetzung (Tonminerale, Karbonate), vor allem aber von dem Anteil des wassergesättigten Porenraums abhängen (wenig z. B. bei einer anstehenden Grundmoräne, hoch bei Sand). Die reflektierten Wellen können damit indirekte Informationen über den Sedimenttypus und ihren stratigraphischen Zusammenhang liefern. Zudem kann mit elektromagnetischen Wellen das Vorhandensein kleinerer Strukturen und Objekte (z. B. einzelne größere Steine oder metallische Objekte wie Rohrleitungen

¹ Martin Wessels, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Institut für Seenforschung (ISF), martin.wessels@lubw.bwl.de; Jens Hornung, Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Schnittspahnstrasse 9, D-64287 Darmstadt, hornung@geo.tu-darmstadt.de.

etc.) in den Daten erkannt werden – vorausgesetzt, diese unterscheiden sich in ihren elektromagnetischen Eigenschaften vom umgebenden Sediment.

Im Projekt HyMoBioStrategie wurde deshalb als Alternative zu den etablierten Methoden versucht, die von einem Georadar (Bodenradar) ausgesendeten, hochfrequenten elektromagnetischen Wellen zur Erkundung der Sedimentstratigraphie in der Flachwasserzone zu nutzen. Diese Technik wurde zum Beispiel in skandinavischen Seen bei Eisbedeckung oder in Zusammenhang mit archäologischen Untersuchungen am Zürichsee von einem Boot aus erfolgreich eingesetzt ([1]), ist aber bei größeren Wassertiefen (niedrige Frequenz) in der Auflösung bzw. der Reichweite (wenige Meter bei hohen Frequenzen) limitiert.

Die Antenne sollte für eine hohe Auflösung (Größenordnung 5 cm) mit einer Eindringung von mehreren Metern möglichst direkt über den Seeboden gezogen werden. In einer Kooperation zwischen der TU Darmstadt und dem Institut für Seenforschung der LUBW wurde deshalb eine üblicherweise an Land verwendete Georadar-Antenne für die Unterwasser-Anwendung umgebaut, um das Potential eines Unterwassergeoradars zu demonstrieren (Abbildung 1).



Abb. 1:

Der Prototyp des Unterwassergeoradars. Die 200 MHz-Antenne befindet sich in dem druckdichten roten Gehäuse, an dem zur Kompensation des Auftriebs insgesamt ca. 200 kg Blei angebracht werden mussten. Das Gerät wird an dem Seil an der rechten Seite hinter einem kleineren Schiff oder Boot gezogen, Datenausgang und Eingang für ein an der Oberfläche mitgeschlepptes GPS sind in dem Zylinder auf der Antenne angebracht.

ENTWICKLUNG DES UNTERWASSERGEHÄUSES

Für den im HyMoBioStrategie-Projekt entwickelten Prototyp eines Unterwassergeoradars wurde eine handelsübliche Antenne (GSSI mit SIR3000 Aufzeichnungseinheit) mit 200 MHz in ein eigens konstruiertes wasserdichtes Kunststoffgehäuse eingesetzt. Wie bei regulären Landeinsätzen wurde die Antenne von einem Laufrad getriggert. Um über Unebenheiten zu fahren, wurde die gesamte Konstruktion auf einen 'Schlitten' aus einer

PVC-Platte montiert, an dem auch die Zugseile befestigt waren. Ein zentraler Boden aus Teflon (PTFE) garantierte eine gute Durchlässigkeit für die Radarwellen.

Die jeweilige Position der Antenne wurde von einem an der Wasseroberfläche mitgeschleppten GPS aufgezeichnet. Da das Gehäuse mit der Antenne trotz größtmöglicher Kompaktheit erheblichen Auftrieb hat, musste die Antenne mit insgesamt ca. 200 kg Blei beschwert werden. Wegen des hohen Eigengewichtes an der Luft, wurde die ganze Konstruktion mit einer hydraulischen Winde über den A-Rahmen (Ausleger) des Forschungsschiffs ('Kormoran' der LUBW) zu Wasser gelassen. Im Wasser konnte die Last dann von Hand bewältigt werden.

Die Antenne wurde über ein langes Kabel über den Controller in einem Boot bedient, das die ganze Konstruktion auch zog. Als Zugboot wurde ein Aluboot mit 6 PS Außenborder oder ein kleines Arbeitsboot verwendet. Mit dem Unterwassergeoradar wurden in mehreren Kampagnen in drei HyMoBioStrategie-Untersuchungsgebieten (Kressbronn, Langenargen, Kirchberg) am Nordufer des Bodensees mehrere hundert Meter lange Profile parallel und senkrecht zum Ufer gefahren. Die Daten wurden anschließend prozessiert (verschiedene Filterverfahren) und die Geschwindigkeit der Wellen mit 0,05 m/ns (Größenordnung: Meter pro Nanosekunde) bestimmt. Mit Kenntnis der Wellengeschwindigkeit können die Wellen-Laufzeiten in Tiefen umgerechnet werden, so dass die Mächtigkeit und der Verlauf von Schichten in ihrer realen Lage unter der Sedimentoberfläche bestimmt werden können. Diese Daten wurden mit Hilfe eines hochauflösenden Geländemodells ([2]) in relative Höhenänderungen entlang der aufgezeichneten Strecke umgerechnet.

ERSTE ERFAHRUNGEN UND ERGEBNISSE

Erfahrungen im Feldeinsatz

Aus den wenigen Einsätzen im Bodensee lassen sich bereits einige grundlegende Erfahrungen und Hinweise für eine künftige Nutzung dieser Technik ableiten:

Unabhängig von den Abmessungen und der generellen Handhabbarkeit eines serienreifen Unterwassergeoradars schränkt Makrophytenbewuchs ein direkt am Boden geschlepptes Gerät sehr stark ein. Die Pflanzen werden schnell ausgerissen und können sich in den Zugseilen verhängen oder blockieren das Laufrad und unterbrechen die Aufzeichnung. Es empfiehlt sich darum, eine Untersuchung in vegetationsarmen Gebieten bzw. Zeiträumen.

Wenn der Seeboden vom Zugboot nicht visuell erkennbar ist, sollte ein Echolot auf dem ziehenden Boot verwendet werden, um größere Strukturen (Hölzer, große Steine) zu umfahren. Hilfreich ist auch ein Echolot-Profil vor dem eigentlichen Messprofil, um auf unliebsame Hindernisse reagieren zu können.

Zur Markierung der Profildpunkte können kleine Markierungsbojen gesetzt werden. Der Prototyp war so schwer, dass

mit einem kleinen Boot gerade Kurse nur schwer möglich waren. Hier besteht Optimierungsbedarf, um die Handhabbarkeit im Feld zu verbessern.

Großräumige Sedimentstrukturen in der Flachwasserzone

Die ersten Aufnahmen mit dem Prototyp waren ausgesprochen vielversprechend und zeigten den räumlichen Zusammenhang einer Vielzahl an Strukturen in den meistens stark sandigen Sedimenten der Flachwasserzone (Abbildungen 2 und 3). Die Mächtigkeit und horizontale Ausdehnung der einzelnen Einheiten variiert sehr stark. Die Eindringung der Signale betrug mit dem verwendeten System bis zu 5 m, lediglich in einem Profil in Hagnau war die Eindringung stark reduziert. Hier wird die unmittelbar anstehende Molasse von jüngeren Seesedimenten überdeckt (Abbildung 4). In Langenargen konnte mit dem Unterwassergeoradar eine vermutlich von einem ehemaligen Bachlauf stammende, gut erkennbare Rinnenstruktur und eine deutlich steiler einfallende Sedimentoberfläche unter einem Paket horizontal liegender Reflektoren identifiziert werden (Abbildung 2). Im Beispiel Kressbronn tauchen ältere Reflektoren ab und werden oben diskordant überlagert, was ein klarer Hinweis auf großräumige Erosionsprozesse nach der Ablagerung

vermutlich feinerer Seesedimente ist (Abbildung 3). Eine unstrukturierte Bedeckung legt die Vermutung nahe, dass nach dieser Erosionsphase größere Materialmengen rasch umgelagert wurden.

Diese ersten Ergebnisse des Prototyps zeigten eindrucksvoll, dass mit großräumigen Messungen der geologische Hintergrund in der Flachwasserzone hinreichend gut nachvollzogen werden kann. Diese Ergebnisse sind umso relevanter, da zumindest die herkömmlichen hydroakustischen Techniken in sandigen Gebieten keine aussagekräftigen Resultate liefern. Unabhängig davon muss die tatsächliche Lithologie mit Bohrungen verifiziert werden.

AUSBLICK

- (1) Das Unterwassergeoradar ist eine neue, vielversprechende Technik zur linienhaften Untersuchung des geologischen Untergrundes größerer Abschnitte der Flachwasserzone.
- (2) Für den Ersteinsatz des Prototyps waren viel Erfahrung und der Einsatz eines größeren Arbeitsschiffes nötig. Eine Weiterentwicklung ist notwendig, um diese Technik auch an anderen Seen und mit kleineren Booten erfolgversprechend einsetzen zu können.

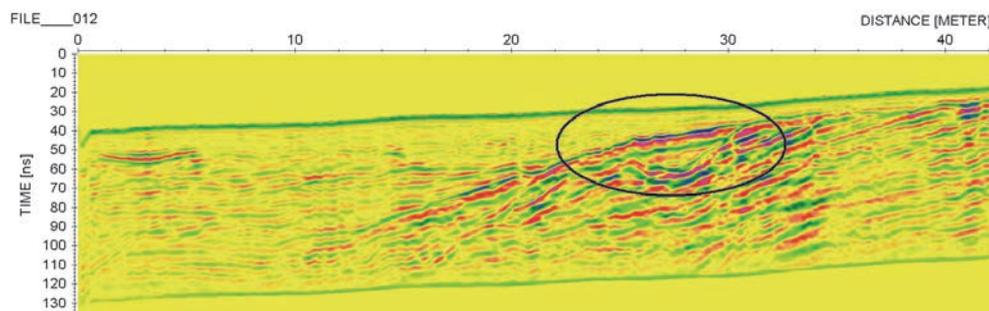


Abb. 2:

Radargramm entlang eines Profils der Flachwasserzone vor Langenargen. Im eingekreisten Bereich ist eine verfüllte alte Rinnenstruktur in älteren Sedimenten gut erkennbar, darüber schmiegen sich jüngere Schichten an eine alte Sedimentoberfläche. Die Eindringung beträgt etwa 4 m (Skala links: Laufzeiten in Nanosekunden, siehe Text).

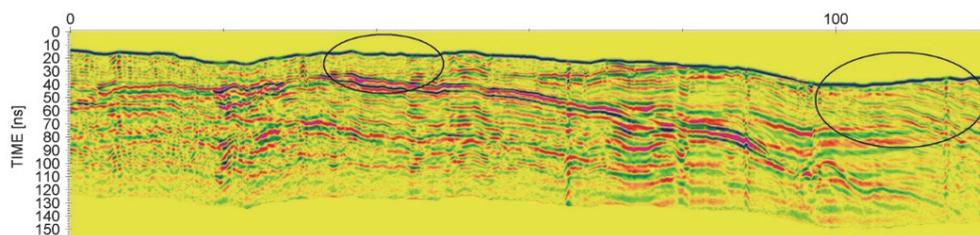


Abb. 3:

Das Radargramm aus der Flachwasserzone vor Kressbronn zeigt links deutliche abtauchende ältere Reflektoren, die im rechten Bildteil (seewärts) von jüngeren Schichten (Seesedimente) überlagert werden. Auch diese jüngeren Seesedimente werden an der heutigen Sedimentoberfläche abgeschnitten bzw. sind erodiert, ein klares Anzeichen für wiederholte großflächige Erosionsvorgänge (Oval rechts). Ufernah (links) werden die Sedimente von jüngeren geringmächtigen und unstrukturierten Sedimenten abgedeckt (Oval links). Die Eindringung beträgt etwa 5 m (Skala links: Laufzeiten in Nanosekunden, siehe Text).

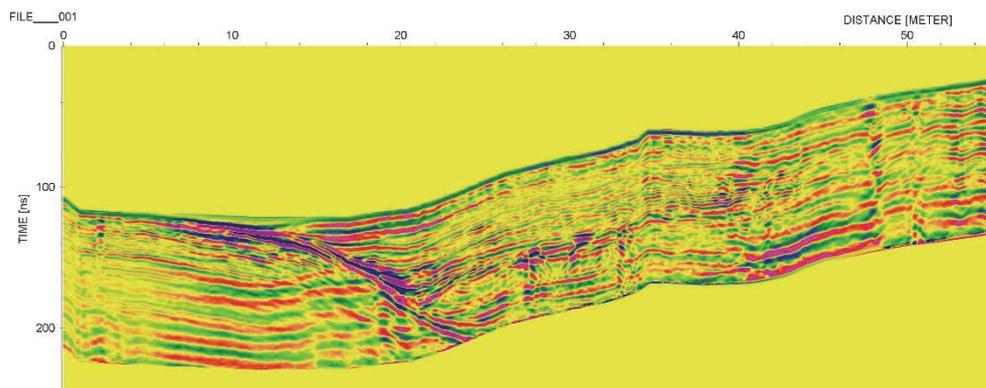


Abb. 4:

Radargramm entlang eines uferparallelen Profils in der Flachwasserzone vor Hagnau. Im linken Bildteil ist zu erkennen, dass die elektromagnetischen Wellen nicht in den Untergrund eindringen können ('scheinbare' Reflektoren bzw. Artefakte). Es handelt sich entweder um eiszeitliche Ablagerungen oder Molasse (wahrscheinlicher). Diese nicht durchdringbaren Sedimente werden rechts von Ablagerungen der Flachwasserzone überlagert. Die Eindringung beträgt etwa 4 m im rechten Bildteil.

DANKSAGUNG

Ohne das ausgesprochen große Geschick und die hohe Kreativität von Reimund Rosmann wäre die Entwicklung des Prototyps nicht machbar gewesen. Andreas Schießl und Kurt Sarrembe hatten als Schiffsführer auf der ‚Kormoran‘ viel Geduld mit den Wissenschaftlern und Technikern.

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] BAUM, T., MÄDER, A., MAINBERGER, M. und SCHINDLER, M. P. (2014): Site management in Rapperswil-Jona, Untiefe Ost: Eine multidisziplinäre Annäherung. – *Archäologie der Schweiz* 37 (4): 34–39.
- [2] INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE, IGKB (2016): Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee. – *Berichte der IGKB* 61: 1–106.
- [3] WESSELS, M. und WEBER, M. (2013): Sedimentkerne als Werkzeug zur Abschätzung der Gefährdung von archäologischen Denkmälern in der Flachwasserzone. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. – Vorarlberg Museum Schriften 1: 105–110.
- [4] WESSELS, M., ANSELMETTI, F., HILBE, M. und MAINBERGER, M. (2013): Hydroakustische Methoden – Möglichkeiten und Grenzen zur Langzeitüberwachung archäologischer Denkmale im Flachwasser. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.): *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. – Vorarlberg Museum Schriften 1: 271–280.

Kapitel 5

Autonome Messplattform ‚HydroCrawler‘ – System zur hochauflösenden Gewässervermessung

Christian Degel ¹



- Der ‚HydroCrawler‘ ist ein autonom arbeitendes System zur hochauflösenden Gewässervermessung.
- Es erlaubt eine detaillierte Vermessung des Bodenreliefs mit dreidimensionaler Rekonstruktion in Absolut-Koordinaten (z. B. ETRS89 UTM).
- Wasserqualitätsparameter und Sedimentstratigraphie können bestimmt werden.
- Für fotografische Aufnahmen des Bodens ist eine Unterwasserkamera integriert.
- Raster- und Bahnfahrten sind programmierbar.
- Das Messsystem ist erweiterbar durch Zusatzsensoren, Probennehmer oder Manipulatoren.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von automatisierten, insbesondere topographischen Gewässer-Vermessungssystemen diskutiert und allgemeine Spezifikationsrichtlinien abgeleitet. Hieraus definiert sich das Konzept der im Teilprojekt 2 des Verbundprojektes HyMoBioStrategie entwickelten Messplattform ‚HydroCrawler‘. Im Anschluss werden die Grundlagen und die Umsetzung der einzelnen Funktionsbereiche Antrieb und Steuerung, Referenzierung, Seebodenvermessung, Sedimentstratigraphie, Unterwasseraufnahmen und Wasserqualitätssensorik näher beschrieben. Am Ende des Kapitels werden anhand eines Einsatzbeispiels Ergebnisse und Erfahrungen mit dem Messsystem ‚HydroCrawler‘ erläutert sowie allgemeine Einsatzmöglichkeiten aufgeführt.

EINFÜHRUNG UND MOTIVATION

Binnengewässer, wie zum Beispiel Flüsse oder Seen, unterliegen als Teil unserer Umwelt einer teils starken Nutzung und Beeinflussung durch den Menschen. Sie dienen beispielsweise als Wasserstraßen für die Schifffahrt, werden befischt oder schlicht als Badegewässer in der Freizeit genutzt (vgl. Kapitel 2).

Speziell in den Uferzonen, wo die Gewässer und der Mensch mit seinen Bebauungen aufeinandertreffen, kommt es zu den stärksten Veränderungen (vgl. Kapitel 3). Hier finden häufig auch die Einleitungen von Abwässern statt.

Die Veränderungen, die durch den Menschen verursacht werden, bleiben jedoch oft unter der Oberfläche des Wassers verborgen. Manchmal reicht zwar ein Blick, um die Schädigungen zu erkennen, doch meist können die schleichenden Veränderungen nur durch aufwendige Messtechnik sichtbar gemacht werden. Derartige Messungen mussten bisher teilweise sehr

personalintensiv durch Bootseinsätze oder von Tauchern durchgeführt werden.

Gerade im Hinblick auf die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) der Europäischen Gemeinschaft ist für die Analyse eines Gewässers oder auch für die Planung von Maßnahmen, wie zum Beispiel einer Renaturierung, die genaue Vermessung und Aufnahme des aktuellen Zustandes unerlässlich. Hierzu sollten mindestens die Bodentopographie, die Bewuchssituation, die Sedimentstratigraphie sowie die Wasserqualität in einem hohen Detaillierungsgrad aufgenommen werden.

Um solche Messungen durchführen zu können, ist ein System notwendig, das an die Messaufgabe angepasst ist. Kommerziell verfügbare Fahrzeuge oder Sensoren decken bereits einen Teil der Aufgaben ab, bilden aber häufig kein geschlossenes System zur Erfüllung der Gesamtaufgabe mit größtmöglichem Detaillierungsgrad.

Die konsequente Konzeptionierung eines Messsystems als Verschmelzung von Fahrzeug und Sensorik mit dem Ziel, dem

¹ Christian Degel, Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik (IBMT), Hauptabteilung Ultraschall, christian.degel@ibmt.fraunhofer.de.

Anwender die bestmöglichen Daten zur Verfügung zu stellen, waren somit Basis und Leitgedanke bei der Entwicklung der Messplattform ‚HydroCrawler‘.

ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN AN EIN MESSSYSTEM

Bei der ständigen Überwachung eines Gewässers sollte ein Messsystem zur Verfügung stehen, welches in der Lage ist, die genannten Daten mit hohem Detaillierungsgrad aufzunehmen. Es sollte über die Fähigkeit verfügen, eigenständig automatisiert zu arbeiten und über mehrere Stunden Messdaten aufzuzeichnen.

Währenddessen sollten die Messdaten für das Bedienpersonal einsehbar sein, um die Qualität der Daten bereits während der Aufnahme beurteilen zu können. Die Entnahme der Daten sollte einfach und schnell möglich sein, ohne dabei jedoch an Sicherheit zu verlieren.

Das Messsystem sollte zur Sicherstellung der Wiederholgenauigkeit über eine hohe Positionsauflösung verfügen, so dass Vermessungsmissionen, ob nun zu festen Zeiten oder bei besonderem Bedarf, mit dem immer gleichen Messraster durchgeführt werden können. Dies betrifft sowohl die Bestimmung der eigentlichen Position, als auch die der Lage des Systems im Raum (Verdrehungen um die Koordinatenachsen). Die Auflösung sollte im Zentimeter- bzw. Zehntel-Grad-Bereich liegen und die Position ausreichend schnell erfasst werden, so dass die Steuerung des Messsystems entsprechend dynamisch erfolgen kann.

Das System sollte in der Lage sein, Raumpositionen bei frei wählbarer Sensorausrichtung anzufahren und Messungen auszulösen. Die jeweilige Ist-Position und Lage der Messung wird zur Registrierung des Messwertes und der damit verbundenen Rekonstruktionen verwendet.

Allgemein sollte das Messsystem möglichst lagestabil im Wasser liegen. Weit auseinanderliegende Auftriebskörper sind hierbei vorteilhaft. Auch sollten schwere Komponenten des Systems möglichst weit außen angeordnet werden, so dass sich eine gleichmäßige und weit außen liegende Massenverteilung ergibt.

‚HYDROCRAWLER‘-SYSTEMSPEZIFIKATION

Das im Verbundprojekt HyMoBioStrategie entwickelte Messsystem ‚HydroCrawler‘ wurde entsprechend den genannten allgemeinen Anforderungen an ein optimiertes Gewässervermessungssystem konzipiert.

Im Verlauf der 3-jährigen Entwicklung konnte das System mit allen Funktionskomponenten bis hin zum einsatzfähigen Demonstrator umgesetzt werden. Auf die Systemeigenschaften des ‚HydroCrawlers‘ wird nachfolgend vertieft eingegangen.

System- und Auftriebskonzept

Der ‚HydroCrawler‘ ist als modulares Messsystem konzipiert, welches zerlegt in einem Transporter oder auf einem Anhänger zum Einsatzort transportiert und vor Ort in einem flachen Gewässerbereich zusammengebaut wird. Anschließend erfolgt die Inbetriebnahme mit einem Funktionstest der Funktionskomponenten, bevor die Messung beginnen kann.

Das System besteht aus vier Auftriebskörpern, die als seitliche Arme mit einem Hauptrahmen verbunden sind und somit eine quadropodartige Struktur bilden (Abbildung 1 und Tabelle 1). Die dadurch aufgespannte große Grundfläche bewirkt eine besonders hohe Lagestabilität.

Zusätzlich sind die schweren Versorgungsbatterien jeweils über den Schwimmkörpern angeordnet, so dass das Gewicht des Systems möglichst weit verteilt ist und große Drehmomente notwendig sind, um eine Winkelauslenkung des Systems zu bewirken. Dies sorgt für eine hohe Lagestabilität des Messsystems im Wasser.

Jeder Auftriebsarm ist zudem mit Solarpanels belegt, so dass die Missionszeit bei günstiger Sonneneinstrahlung deutlich verlängert ist.



Abb. 1:
Messplattform ‚HydroCrawler‘ auf dem Bodensee.

Tab. 1:
Allgemeine Systemeigenschaften des ‚HydroCrawlers‘.

Gesamtsystem	
Systemgewicht (gesamt)	310 kg ^(#)
Spannweite	3 m x 3 m
Tiefgang	30 cm
Einsatzdauer	ca. 8 Stunden
Zusätzliche Nutzlast-Kapazität	100 kg
Ladestrom (wetterabhängig)	max. 6 A

^(#) Zerlegbar in kleine und leichte Module.

Antriebs- und Steuerungskonzept

In jedem Auftriebskörper des ‚HydroCrawlers‘ ist ein Strahlruder (Thruster) integriert. Dieses erlaubt die stufenlose Einstellung der Antriebsleistung im positiven wie im negativen Bereich. Zudem sind die Auftriebskörper drehbar gelagert, so dass jeder Auftriebskörper mit seinem integrierten Antrieb eine individuelle Winkelstellung einnehmen kann (Abbildung 2 u. Tabelle 2).

Dadurch können insbesondere zwei Betriebsmodi realisiert werden. Für ‚Bahnfahrten‘ mit kontinuierlichen Messungen können alle Antriebe die gleiche Winkelstellung einnehmen (Abbildung 2, links). Durch das Konzept des ‚HydroCrawlers‘ ohne Vorzugsrichtung, wie sie im Gegensatz bei zum Beispiel einrumpfigen oder katamaranartigen Fahrzeugen vorhanden ist, ist somit auch die Sensorausrichtung unabhängig von der Bewegungsrichtung wählbar. Fahrtrichtung und Sensorausrichtungen können vom Benutzer ideal an die Messmission angepasst werden. Dies ist zum Beispiel beim Einsatz eines Fächerecholotes zur Vermessung der Bodentopographie besonders wichtig.

Im Unterschied zur ‚Bahnfahrt‘ stehen bei der ‚Rasterfahrt‘ die Antriebe in einer jeweils festen 45°-Stellung (sog. ‚O‘-Stellung, Abbildung 2, rechts). Hierbei wird über die Schubregelung der Einzelantriebe jeder beliebige Fahrtvektor bei gleichzeitiger Kontrolle des Plattform-Drehwinkels ermöglicht. Dies erlaubt die schnelle und gleichzeitige Ausregelung von Position und Drehwinkel, so dass Rasterpunkte unter vollständiger Fahrzeugkontrolle angefahren und Messungen ausgelöst werden können.

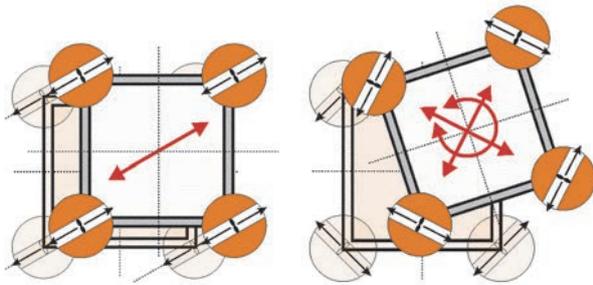


Abb. 2:

Antriebsstellung für Bahnfahrten (links), ‚O‘-Stellung für Rasterfahrten (rechts).

Tab. 2:

Antriebs-Kennwerte des ‚HydroCrawlers‘.

Antriebe	
Schubkraft	4 x 30 N
Drehzahl	300-3800 rpm
Rotationswinkel der Antriebe	360° (#)
Kommunikationsbus	CAN-Bus

(#) Anschlagslos umlaufend drehend.

Referenzierungssystem

Die Orts- und Lagereferenzierung der ‚HydroCrawler‘-Messplattform erfolgt über eine 3-fach-GNSS-Antenne mit Echtzeit-Phasenkorrektur (RTK). Jedem Messwert werden die aktuelle Ortskoordinaten und die drei absoluten Drehwinkel (Roll-, Nick-, Gierwinkel) zugeordnet. Diese werden in der nachgeschalteten Offline-Datenauswertung verwendet, um z. B. die Oberflächenpunkte des Seebodens direkt in Absolutkoordinaten zu errechnen. Die Koordinaten können dann je nach Anforderung in unterschiedliche globale Koordinatensysteme wie zum Beispiel WGS84/UTM oder Gauß-Krüger umgerechnet werden. Die Eigenschaften des Referenzierungssystems sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Die Güte der GNSS-Referenzierung wird permanent im Statusmonitor der Steuerungssoftware angezeigt. Ebenso werden die aktuelle Position in einer Kartenansicht sowie die jüngsten Messdaten als Vorschaubilder angezeigt (Abbildung 3). Somit hat der Systemoperator jederzeit einen vollständigen Überblick über den Verlauf der Mission und die Qualität der Messdaten.

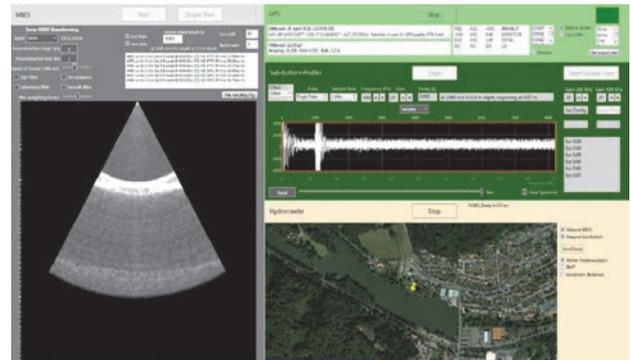


Abb. 3:

Statusbildschirm der ‚HydroCrawler‘-Messplattform.

Tab. 3:

Details zum Referenzierungssystem des ‚HydroCrawlers‘.

Referenzierungssystem	
Navigationssatellitensysteme	GPS, GLONASS, GALILEO, SBAS, QZSS
RTK-Updaterate	20 Hz
Genauigkeiten	Horizontal 2–3 cm
	Vertikal 4–5 cm
	Gierwinkel 0,2°
	Rollwinkel 0,4°
	Nickwinkel 0,4°

SENSOREN UND DATENAUSWERTUNG

Seebodenvermessung

Die genaue Kenntnis der Seebodenmorphologie und deren zeitliche Entwicklung ist eine zentrale Messaufgabe. Diese kann zum Beispiel über eine einfache, punktuelle Echolotmessung oder ein leistungsstärkeres flächenmessendes Sonar-System erfolgen.

Das ‚HydroCrawler‘-System verfügt über ein hochauflösendes, am IBMT entwickeltes Fächerecholot mit einer Mittenfrequenz von 1 MHz (Abbildung 4). Die axiale Auflösung des Systems liegt im Subzentimeterbereich. Die Rekonstruktion der Messdaten erfolgt in absoluten Globalkoordinaten (z. B. ETRS89-UTM, WGS84, Gauß-Krüger) mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich. Eine Übersicht der Eigenschaften ist in Tabelle 4 zu finden.

Das IBMT-Fächerecholot erlaubt dem Nutzer den Vollzugriff auf die Anregungssignale sowie die empfangenen Rohdaten. Dem Anwender ist es möglich, eigene Sendesignale oder Auswertalgorithmen zu definieren und einen Satz von Empfangsdaten auf unterschiedliche Arten auszuwerten. So können zum Beispiel spektrale Auswertungen mit unterschiedlichen Filtern vorgenommen und deren Ergebnisse miteinander kombiniert werden.



Abb. 4:
Hochauflösendes kompaktes Fächerecholot.

Tab. 4:
Fächerecholot Systemeigenschaften.

Fächerecholot	
Mittenfrequenz	1 MHz
Bandbreite	80 % (600–1400 kHz)
Anzahl Antennenelemente	128
Auflösung	< 1 cm
Winkelbereich	einstellbar, typisch 60°
Betriebsspannung	24 VDC
Systemspeicher	500 GB (SSD)

Sedimentstratigraphie

Ultraschall ist in der Lage, Objekte und Oberflächen zu durchdringen. Innerhalb des Mediums werden die Ultraschallwellen an Grenzen zwischen Schichten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften reflektiert und liefern somit Informationen über den inneren Aufbau von Sedimenten.

Der ‚HydroCrawler‘ verfügt über ein oberflächenpenetrierendes Sedimentschichtsonar. Dieses besteht aus zwei Sendern mit unterschiedlichen Frequenzen, die koaxial angeordnet sind und den Gewässerboden beschallen. Im Zentrum der Sender sitzen die Empfänger des Systems. Es handelt sich dabei um zwei Empfänger im Frequenzband der Sender, ergänzt um einen niederfrequenten Empfänger. Die Empfänger sind ebenfalls koaxial als eine Scheibe mit zwei Ringen angeordnet und empfangen die rückgestreuten Schallsignale aus dem Sediment.

Diese Empfangssignale werden nach Amplitude und Frequenzinhalt analysiert. Der Schichtaufbau wird farbkodiert als Querschnittsbild dargestellt.

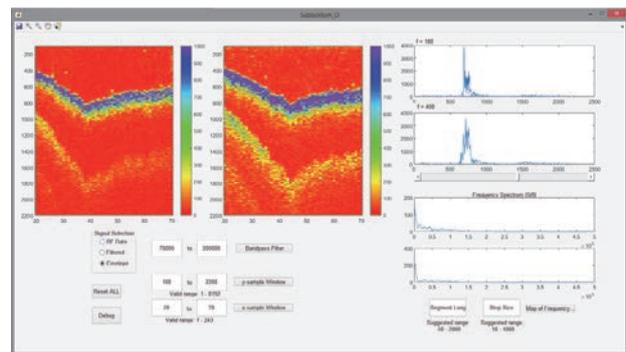


Abb. 5:
Sedimentschicht-Sonar – Beispielmessung Niederwüzbacher Weiher.

Tab. 5:
Sedimentschicht-Sonar Systemeigenschaften.

Sedimentschichtsonar	
Sender	200 kHz und 400 kHz
Empfänger	100 kHz, 200 kHz und 400 kHz
Außendurchmesser	20 cm
Betriebsspannung	12 VDC

Unterwasseraufnahmen

Am ‚HydroCrawler‘ ist eine Unterwasserkamera angebracht, die senkrecht nach unten Bilder aufzeichnet (Abbildung 5). Diese sind ebenfalls mit der GNSS-Position referenziert und dienen so der Analyse und Interpretation der Ultraschalldaten.

**Abb. 6:**

Kamerabild zur Aufnahme des Seebodens und als Hilfe zur Interpretation der Messdaten.

Wasserqualität

Für die Analyse des Gewässerzustandes ist die Vermessung von Basisqualitätsparametern unerlässlich. Aus diesem Grund ist der ‚HydroCrawler‘ mit einer Multiparametersonde ausgestattet. Hiermit können folgende Parameter gemessen werden:

- Temperatur
- pH-Wert
- gelöster Sauerstoff
- Trübung
- Leitfähigkeit

Den aufgenommenen Daten werden Zeit- und GPS-Informationen zugeordnet, um diese flächig bzw. bei Nutzung einer Winde auch dreidimensional darzustellen.

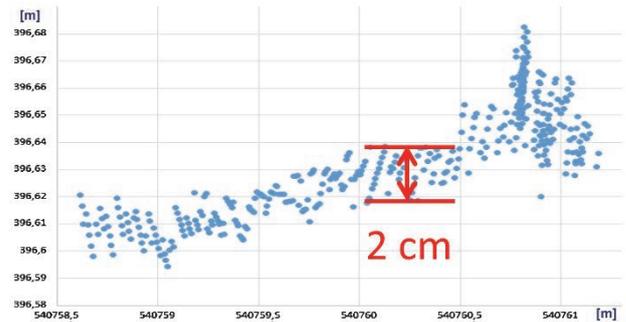
Werden weitere Wasserparameter benötigt, so kann der ‚HydroCrawler‘ aufgrund seiner großen Nutzlast-Kapazität problemlos mit zusätzlichen Sensoren oder Sonden ergänzt werden.

EINSATZBEISPIEL BODENSEE

Nach erfolgter Inbetriebnahme wurde das Messsystem im Oktober 2017 und Mai 2018 auf dem Bodensee getestet.

Hierbei wurden im Bereich der UNESCO-Welterbe-Pfahlbaustation Unteruhdingen-Stollenwiesen ein Messraster definiert und die Bodentopographie vermessen. Es wurde der kontinuierliche Messmodus eingesetzt, um eine möglichst hohe Punktdichte zu realisieren.

Die typische Streuung der Punkte einer einzelnen Scanlinie liegt dabei in einem Bereich von ca. 2 cm (Abbildung 7). Dies

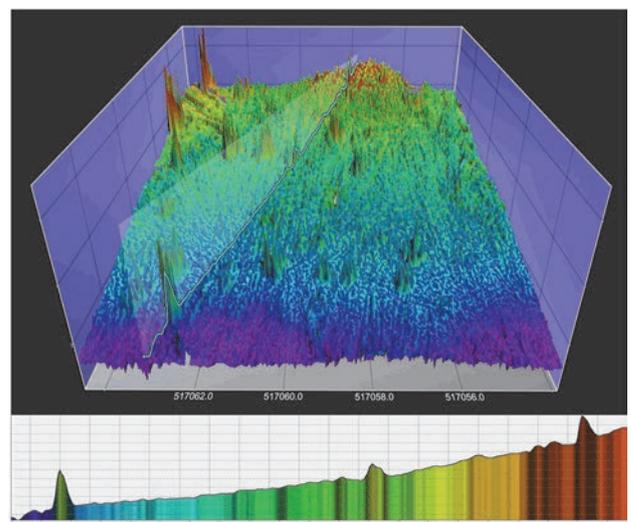
**Abb. 7:**

Typische Punktverteilung einer Scanlinie.

ergibt sich insbesondere durch die horizontalen Ausdehnungen des Fokusbereichs eines jeden Schallstrahles und der natürlichen Untergrundstruktur. In Einzelbereichen kann die Variation aufgrund ungünstiger Untergrundstruktur aber auch größer werden.

Aufgrund der hohen Punktdichte und der geschlossenen Referenzierungskette kann das Messvolumen sehr genau rekonstruiert werden. Aus den Daten lassen sich die Positionen von Strukturen sowie deren Ausdehnungen ablesen.

Beispielsweise ist es möglich, innerhalb der vermessenen Pfahlbausiedlung (Ausschnitt siehe Abbildung 8) die Position und Höhe einzelner Pfahlreste zu bestimmen. Aus dem Vergleich von Messungen, die in zeitlichen Intervallen durchgeführt werden, kann so die Veränderung der Pfahlreste selbst oder die Erosion bzw. Sedimentation des umgebenden Bodens bestimmt werden.

**Abb. 8:**

3D-Rekonstruktion der Bodentopographie im Bereich der Pfahlbaustation Unteruhdingen-Stollenwiesen mit Profilschnitt.

Die hier vorgestellte Vermessung einer Pfahlbaustation ist jedoch nur ein Anwendungsbeispiel für den Einsatz des autonomen Messsystems ‚HydroCrawler‘.

Durch die Genauigkeit des Systems, die sehr guten Steuerungseigenschaften und die hohe Nutzlast-Kapazität, sind auch nachfolgende Einsatzmöglichkeiten oder Ergänzungen gegeben:

- ständige Begleitung von Unterwasser-Ausgrabungen,
- Objekt- und Vermisstensuche,
- Gewässer-Monitoring,
- Überwachung von Häfen (z. B. auf Verschlammung),
- Kontrolle von Fahrrinnen und Liegeplätzen,
- Schiffshüllen-Vermessung und Erkennung von Schäden bzw. Bewuchs,
- Überwachung von technischen Installationen (z. B. Fundamente, Schleusen, Dämme, Spundwände),

- Suche von Altmunition (sog. UXO),
- Ergänzung um einen tiefenvariablen Träger für Sensoren, Kameras u. Ä.,
- Ergänzung um einen Probennehmer.

Das Messsystem ‚HydroCrawler‘ sowie die Subsysteme Fächer-Echolot und Sedimentschichtsonar werden beständig weiterentwickelt. Bei weiteren Messmissionen werden neue Impulse für Optimierungen aufgenommen und anschließend eingearbeitet.

Insbesondere ist geplant, den ‚HydroCrawler‘ um ein Stereokamerasystem zu erweitern, so dass bei guten Sichtverhältnissen eine kamerabasierte Boden- oder Objektrekonstruktion mit der akustischen Rekonstruktion überlagert werden kann.

Kapitel 6

Messung und Modellierung von Wellen, Strömungen und Sedimenttransport in der Flachwasserzone von Seen

Hilmar Hofmann ¹



Für die Charakterisierung und Bewertung der hydromorphologischen Bedingungen in der Flachwasserzone von Seen wird empfohlen:

- Berücksichtigung der Wasserstandsdynamik und der Uferverbauungen als wichtige Einflussgrößen,
- räumlich und zeitlich detaillierte Untersuchungen sowohl mit empirischen als auch modellbasierten Ansätzen,
- Kopplung von hydrodynamischen, sedimentologischen und hydromorphologischen Parametern zur Erfassung und Beurteilung der Sedimentdynamik,
- sowohl prozessorientierte Studien zur Morphodynamik, als auch Langzeitstudien aufgrund der geringen jährlichen Magnituden in Seen,
- Etablierung von numerischen Modellen als Prognose-Tool für zukünftige Planungen.

Das Kapitel stellt empirische und modellbasierte Ansätze vor, mit denen die Hydro- und Morphodynamik in Seen differenziert untersucht, charakterisiert und bewertet werden kann. Deren Anwendungsmöglichkeiten werden anhand von Beispielen verdeutlicht, z. B. der Bewertung der hydrodynamischen Exposition von Uferabschnitten, der räumlichen Verteilung des Resuspensionspotentials unter Berücksichtigung der Wasserstandsdynamik, der Auswirkungen von Seeuferrenaturierungen auf das Wellen- und bodennahe Strömungsfeld und der Auswirkung von Hafenanlagen auf die Sedimenttransportdynamik und das Auftreten von Erosion. Aus den Anwendungen werden Empfehlungen für die Praxis abgeleitet. Mit ↗ sind Begriffe gekennzeichnet, die im Glossar näher erläutert werden.

EINLEITUNG

Wellen, Strömungen und der Sedimenttransport bestimmen die Hydro- und Morphodynamik in der Flachwasserzone von Seen. Die Erfassung und Beschreibung der drei Faktorenkomplexe ist deswegen von großer Bedeutung für die Charakterisierung der abiotischen Bedingungen in der Flachwasserzone, z. B. der Wellenexposition der Ufer oder die Gefährdung archäologischer Unterwasserdenkmäler. Zudem verändern Uferverbauungen und Querbauwerke die hydromorphologischen Bedingungen in der Flachwasserzone (vgl. Kapitel 3). Diese sind wiederum durch die Wasserstandsdynamik und sporadisch auftretende Starkwindereignisse überprägt. Zur Erfassung dieser Prozesse und deren Wechselwirkungen sind sowohl zeitlich als auch räumlich hochaufgelöste Messungen und Modellansätze notwendig. Empirische Experimente liefern in diesem Kontext oft nur einen räumlich (punktuelle Messungen) und/oder zeit-

lich (kurzeitige Messungen) begrenzten Einblick in die Komplexität der Hydro- und Morphodynamik in der Flachwasserzone von Seen und sind deswegen nur begrenzt aussagekräftig ([16]). Die numerische Modellierung des Sedimenttransports in Seen ist im Unterschied zur etablierten Anwendung in den Küsten- und Fließgewässern noch wenig entwickelt. Durch die Weiterentwicklung der numerischen Modelle und die gestiegene Rechnerleistung, aber auch die Verbesserung von Messgeräten für die Parametrisierung und Validierung der Modelle und Modellergebnisse ist es nun möglich, die Komplexität des Sedimenttransports und der resultierenden Morphodynamik in Seen mit einer hohen räumlichen Auflösung über Monate hinweg zu simulieren. Derartige empirische und modellbasierte Ansätze stellen nicht nur den kausalen Zusammenhang zwischen der Hydrodynamik, dem Sedimenttransport und der Änderung der Uferstruktur her, sondern bieten darüber hinaus

¹ Hilmar Hofmann, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umweltphysik, hilmar.hofmann@uni-konstanz.de.

Entscheidungshilfen für das zukünftige Management der Seeufer.

Das vorliegende Kapitel stellt empirische und modellbasierte Ansätze vor, mit denen die Hydro- und Morphodynamik in Seen differenziert untersucht, charakterisiert und bewertet werden kann. Dies wird anhand verschiedener Anwendungsbeispiele vom Bodensee vorgestellt und dient als Muster für andere Seen. Das Kapitel schließt mit Empfehlungen für das praxisnahe Handeln ab.

OBERFLÄCHENWELLEN

Definition und Parameter einer linearen Welle

Oberflächenwellen lassen sich als idealisierte Form mit Hilfe von sin- oder cos-Funktionen beschreiben (sinusoidale Wellen). In Abbildung 1 sind die wesentlichen Eigenschaften einer sich fortplanzenden Welle schematisch dargestellt. Weitere Begriffsdefinitionen sind im Glossar aufgeführt.

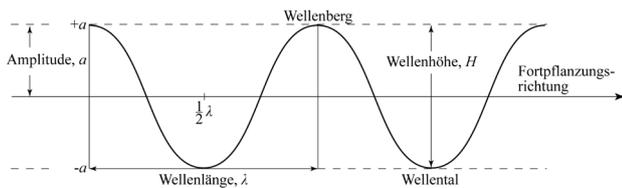


Abb. 1:

Definition grundlegender Wellenparameter.

Messmethoden

In Seen treten aufgrund der geringen Windwirklänge Oberflächenwellen mit geringen Wellenlängen bzw. -perioden und niedrigen Wellenhöhen auf. Dies erfordert eine besonders hohe Genauigkeit und zeitliche Auflösung der jeweiligen Messmethode. Um die für Seen typische Wellen mit Perioden von 0,5-3 s und Wellenhöhen von etwa 0,01 m auflösen zu können, muss das Messintervall >8 Hz und die vertikale Auflösung $<0,01$ m betragen. Drucksensoren, die PUV-Methode und ADCPs mit vertikalem Strahl haben sich für diese Anforderungen als besonders geeignete Messtechniken erwiesen. Alle drei Methoden wurden erfolgreich im Bodensee eingesetzt.

Drucksensoren

Drucksensoren inkl. Datenspeicher mit einer Genauigkeit von 0,1 mbar und einer Messfrequenz von 16 Hz, die 1-2 m unterhalb der Wasseroberfläche auf einem Stativ oder Pfosten installiert werden, haben sich am Bodensee als besonders geeignet herausgestellt. Aus der Zeitreihe der gemessenen Druckfluktuationen können nach der frequenzabhängigen Korrektur für die

Druckattenuation und folgend mittels Zero-Crossing-Methode die relevanten Wellenparameter (maximale und signifikante Wellenhöhe, mittlere und signifikante Wellenperiode), für frei wählbare Zeitintervalle (z. B. 64 s, ~1 Minute) bestimmt werden ([15]). Einzig die Fortpflanzungsrichtung der Wellen ist mit dieser Methode nicht messbar.

PUV-Methode

Aus der Kombination einer hochfrequenten Druck- (P) und Strömungsmessung (die Horizontalkomponenten des Strömungsfelds u und v) lässt sich neben den üblichen Wellenparametern zusätzlich die Wellenrichtung bestimmen ([27]). Die PUV-Methode kann z. B. mit einem in der Flachwasserzone installierten Strömungssensor (z. B. Vector, NORTEK), der über einen hochgenauen Drucksensor verfügt, realisiert werden.

Akustische Verfahren

Mit sogenannten Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), die am Seeboden fest installiert sind, kann man über zwei verschiedene Messtechniken das Wellenfeld mit seinen Eigenschaften bestimmen: (i) Messung des dreidimensionalen Strömungsfelds und (ii) Abtasten der Luft-Wasser-Grenzschicht mit einem vertikal ausgerichteten Messstrahl.

zu (i): Bei dieser Methode wird aus der zeitlichen Änderung des horizontalen Strömungsfelds das richtungsabhängige Wellenspektrum abgeleitet und aus diesem wiederum die Welleneigenschaften bestimmt ([11], [12], [20]). Großer Nachteil der Methode ist, dass sehr niedrige und kurze Wellen ($<0,1$ m und <2 s) nicht auflösbar sind. Dadurch ist die Methode in Seen ungeeignet.

zu (ii): Ein vertikal ausgerichteter Messstrahl tastet die Luft-Wasser-Grenzschicht ab. Das Messprinzip beruht auf der großen Dichteänderung an der Grenzschicht und der damit verbundenen starken Änderung der akustischen Rückstreustärke (ABS). Bei hochfrequenter Messweise kann die Auslenkung der Wasseroberfläche verfolgt und aufgezeichnet werden. Aus dieser Messreihe können unter Verwendung der Zero-Crossing-Methode die Welleneigenschaften bestimmt werden. Weitere Informationen über die Methoden finden sich in [24]. Bei einem Messintervall von >4 Hz ist die Methode für Seen anwendbar. Ungenauigkeiten in der Erfassung der Grenzschicht können auftreten, wenn diese durch Wellenbrechung, Turbulenz und Schaumkronenbildung ‚unscharf‘ bzw. gestört ist.

Weitere, hier nicht angewandte Messverfahren sind Wellenbojen (z. B. SMART buoy von OCEANOR, Norwegen; GPS-WAVERIDER von DATAWELL, [7], [26]), Drahtwellenpegel ([5]), Laseraltimetrie ([19]), Radaraltimetrie ([34]) oder die Stereophotographie ([18]).

WELLENEIGENSCHAFTEN

Oberflächenwellen sind der energetisch bedeutendste Prozess in der Flachwasserzone von Seen. Diese können durch Wind oder durch Schiffsbewegungen erzeugt werden und breiten sich allseitig aus (vgl. Kapitel 9). Eine umfangreiche Beschreibung findet sich in [15] und [17]. Die Eigenschaften des Wellenfelds können anhand der Wellenhöhe, der Wellenlänge und der Wellenperiode beschrieben werden (Abbildung 1). Aus diesen können unter Berücksichtigung der Wassertiefe weitere Parameter wie z. B. die durch Wellen induzierte bodennahe Strömungsgeschwindigkeit U_{max} ($m\ s^{-1}$), die Bodenschubspannung BSS ($N\ m^{-2}$), der Wellenenergiefluss EF ($W\ m^{-1}$) oder der Median der Korngröße der resuspendierbaren mineralischen Sedimentkörner d_{50} (mm) abgeleitet werden. Dabei lassen sich in der Regel Wind- und Schiffswellen aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften voneinander unterscheiden ([15]).

Auf Basis von hochaufgelösten Messreihen der Wellenparameter ist eine standortspezifische Charakterisierung des Wellenfelds möglich (Abbildung 2). Aufgrund von saisonalen Unterschieden der Windhäufigkeit und der Schiffsfrequenzen wird empfohlen, die Messungen über längere Zeiträume (Monate bis ein Jahr) oder saisonal aufgelöst über jeweils einen Monat durchzuführen, um eine gesamtheitliche Charakterisierung des Wellenfelds vornehmen zu können.

Für alle sechs im HyMoBioStrategie-Projekt untersuchten Uferabschnitte wurden die Eigenschaften des Wellenfelds über mehr als 2 Jahre hinweg erfasst und analysiert (Abbildung 2, Tabelle 1).

Am Beispiel des sowohl gegenüber Wind- als auch Schiffswellen exponierten Untersuchungsgebiets Kressbronn lassen sich die für Seen typischen Welleneigenschaften gut erkennen (Abbildung 2). Schiffswellen haben Wellenhöhen von 0,1–0,3 m, Wellenperioden von 3–5 (7) s, Wellenlängen von 10–20 (50) m und erzeugen in einem Meter Wassertiefe bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten von 0,2–0,4 $m\ s^{-1}$ und Bodenschubspannungen von 5–20 $N\ m^{-2}$, die Partikel von 1–2 mm Größe remobilisieren. Der Wellenenergiefluss liegt zwischen 50 und 100 $W\ m^{-1}$ (Abbildung 2). Windwellen dagegen sind während Starkwindereignissen durch größere Wellenhöhen und höhere bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten als Schiffswellen, aber meist durch kürzere Wellenperioden und Wellenlängen gekennzeichnet. Während Starkwindereignissen erreichen Windwellen Höhen, Perioden, Längen von 0,5–1,2 (2) m, 2–2,5 (3) s, 6–12 (15) m und bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5–1,5 (2) $m\ s^{-1}$, Bodenschubspannungen von 10–50 (80) $N\ m^{-2}$, und remobilisieren Partikel von 1–10 (15) mm. Der Wellenenergiefluss erreicht 100–500 (800) $W\ m^{-1}$ (Abbildung 2).

Windwellen treten sporadisch, Schiffswellen dagegen periodisch und vor allem in den Sommermonaten auf ([15]). Das führt an durch Schiffswellen dominierten Tagen zu einem Tag-Nacht-Zyklus von vielen Schiffswellen am Tag und wenigen in der Nacht. Die typischen Eigenschaften von Schiffswellen sind im Kapitel 9 detailliert beschrieben.

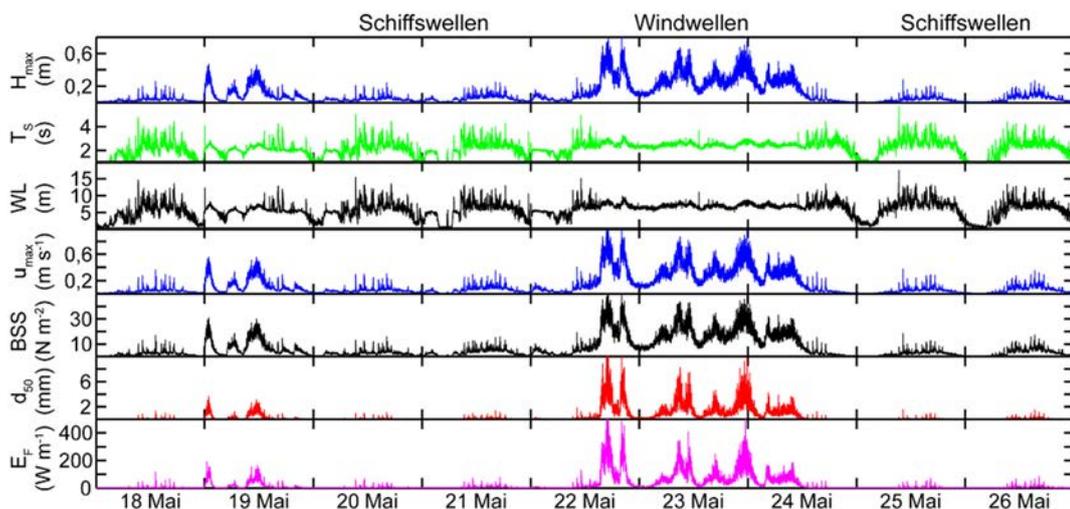


Abb. 2:

Eigenschaften und zeitliche Dynamik des Wellenfelds im Untersuchungsgebiet Kressbronn zwischen dem 18. und 26. Mai 2016. Die Eigenschaften des Wellenfelds sind beispielhaft anhand der Wellenparameter H_{max} ...maximale Wellenhöhe, T_s ...signifikante Wellenperiode, WL ...Wellenlänge und der abgeleiteten Parameter U_{max} ...maximale welleninduzierte bodennahe Strömungsgeschwindigkeit in 1 m Wassertiefe, BSS ...Bodenschubspannung, d_{50} ...Median der maximal resuspendierbaren Korngröße und E_F ...Wellenenergiefluss charakterisiert.

Wellenexposition

Die hydrodynamische Exposition eines Seeuferabschnitts wird durch den Winkel der Uferlinie zur typischen Fortpflanzungsrichtung der einlaufenden Wellen und deren Eigenschaften sowie durch das Seebodenrelief bestimmt. Neben den natürlicherweise auftretenden Windwellen können Schiffswellen zur Exposition der Ufer beitragen. In welchem Umfang dies der Fall ist, hängt von der Intensität der Windwellen, die durch die Windwirklänge (Fetch) bestimmt wird, im Verhältnis zu den Eigenschaften der durch Schiffe erzeugten Wellen und deren Häufigkeit im Auftreten ab.

Am Beispiel des Bodensees wurden über einem Zeitraum von zwei Jahren sechs unterschiedlich gegenüber Wind- und Schiffswellen exponierte Uferabschnitte (Sipplingen, Unteruhldingen, Hagnau, Kirchberg, Langenargen und Kressbronn) untersucht. Ursächlich für die unterschiedliche Exposition sind zum einen die unterschiedlichen Windwirklängen zu den am Bodensee dominierenden Windrichtungen um West und zum anderen die Lage des jeweiligen Uferabschnitts zu den Schifffahrtsrouten (vgl. Kapitel 9, Abbildung 1).

Die hydrodynamische Exposition der Ufer gegenüber Wind- und Schiffswellen kann aus energetischer Sicht vor allem über den Wellenenergiefluss quantifiziert werden (Tabelle 1). In der Gesamtbetrachtung der HyMoBioStrategie-Untersuchungs-

flächen ergab die statistische Auswertung eine sich saisonal ändernde Exposition der Uferabschnitte, die zu einem Großteil auf die saisonal unterschiedliche Exposition der Uferabschnitte gegenüber Schiffswellen zurückzuführen ist:

- im Sommerhalbjahr: Langenargen > Kirchberg > Hagnau = Kressbronn > Unteruhldingen > Sipplingen,
- im Winterhalbjahr: Langenargen > Hagnau > Kirchberg > Kressbronn > Unteruhldingen > Sipplingen.

In allen Untersuchungsgebieten dominierten Windwellen energetisch das Wellenfeld. In den Sommermonaten machten Schiffswellen zwischen 12 und 46 % der in die Flachwasserzone eingetragenen Energie aus. Der Spitzenwert wurde im Bereich der durch Erosion stark bedrohten archäologischen Fundstelle in Unteruhldingen-Stollenwiesen erreicht. In den Wintermonaten war der Anteil, der durch Schiffswellen in die Flachwasserzone eingetragenen Energie in den meisten Untersuchungsgebieten mit 2–24 % geringer als im Sommer. Dies trifft nicht auf die Uferabschnitte Hagnau und Kirchberg zu. In Hagnau (24 %) und Kirchberg (14 %) war sommers wie winters die durch die Katamaran-Fähre zwischen Konstanz und Friedrichshafen in die Flachwasserzone eingetragene Energie fast gleich groß. Dies verdeutlicht den bedeutenden Einfluss des Katamarans auf die hydrodynamische Exposition der im Bereich der Schifffahrtsroute liegenden Uferabschnitte.

Tab. 1:

Hydrodynamische Exposition (Wellenexposition) der sechs Untersuchungsgebiete des HyMoBioStrategie-Projekts zwischen Dezember 2015 und Dezember 2017). Die hydrodynamische Exposition ist durch die relative Häufigkeit und den Energiefluss von Wind- und Schiffswellen abgebildet. Die statistische Analyse ermöglicht aufgrund der unterschiedlichen Welleneigenschaften die Unterscheidung zwischen Wind- (WW) und Schiffswellen (SW). Sommer: April - September und Winter: Oktober - März. Die Werte in Klammern repräsentieren Wellen mit Höhen <0,05 m.

Standort	Sommer					Winter				
	rel. Häufigkeit		Energiefluss			rel. Häufigkeit		Energiefluss		
	WW (%)	SW (%)	Mittelwert (W m ⁻¹)	WW (%)	SW (%)	WW (%)	SW (%)	Mittelwert (W m ⁻¹)	WW (%)	SW (%)
Sipplingen - SI	17 (66)	3 (14)	2 (<1)	69 (10)	13 (8)	18 (76)	<1 (6)	2 (<1)	81 (13)	2 (5)
Unteruhldingen - UU	24 (43)	19 (14)	6 (<1)	47 (3)	46 (3)	32 (65)	1 (2)	9 (<1)	85 (11)	3 (1)
Hagnau - HG	32 (26)	25 (18)	14 (<1)	72 (1)	25 (2)	34 (40)	12 (14)	28 (<1)	70 (3)	24 (3)
Kirchberg - KI	46 (30)	14 (10)	24 (<1)	80 (2)	17 (1)	37 (44)	7 (11)	24 (<1)	82 (2)	14 (2)
Langenargen - LA	44 (29)	19 (7)	25 (<1)	87 (<1)	12 (<1)	53 (30)	6 (11)	45 (<1)	89 (3)	5 (3)
Kressbronn - KR	40 (39)	13 (7)	15 (<1)	78 (2)	19 (<1)	34 (56)	4 (5)	20 (<1)	87 (3)	9 (<1)

HINTERGRUNDSTRÖMUNG UND WELLENINDUZIERTER STRÖMUNG

Die Strömung in Gewässern kann gerichtet oder ungerichtet bzw. oszillierend sein. In Seen spielen im Gegensatz zu Fließgewässern, in denen meist eine gerichtete Strömung vorherrscht, beide Strömungsarten eine wichtige Rolle. Bei der gerichteten Strömung werden das Wasser und die darin gelösten

und suspendierten Stoffe im Mittel in eine bestimmte Richtung transportiert. Dieser Prozess wird als die Hintergrundströmung bezeichnet. Die großskalige Hintergrundströmung wird durch Windscherung an der Wasseroberfläche und durch interne Wellen an der Thermokline angetrieben. Die oszillierende Strömung dagegen wird durch Oberflächenwellen erzeugt. Sind die Teilchenbahnen geschlossen, gibt es keinen Netto-

transport (lineare Wellentheorie, vgl. [17]). Sind die Teilchenbahnen nicht geschlossen, können Wasser und Partikel in eine bestimmte Richtung transportiert werden.

In der Flachwasserzone von Seen sind die gerichtete und die oszillierende Strömung von großer Bedeutung und interagieren miteinander, mit Folgen z. B. für den Sedimenttransport. Die durch Oberflächenwellen induzierte, oszillierende Strömung erzeugt in geringen Wassertiefen Strömungsgeschwindigkeiten, die ausreichen, um Partikel von der Sedimentoberfläche loszulösen bzw. zu resuspendieren ($>0,1 \text{ m s}^{-1}$). Diese werden dann mit der wesentlich langsameren (typischerweise $0,01 - 0,05 \text{ m s}^{-1}$) Hintergrundströmung verfrachtet (Suspensions-transport).

Messverfahren

In Seen werden typischerweise folgende Messverfahren zur Erfassung der Strömung und des dreidimensionalen Strömungsfelds verwendet:

- akustische Messverfahren, die auf dem Doppler-Effekt beruhen,
- autonome, GPS-gestützte Drifter.

Bei beiden Messverfahren sind Spezialkenntnisse nötig, sowohl für die Anpassung der Messgeräte und Messintervalle an die Fragestellung, als auch für die spätere Validierung und Auswertung der Daten. Die aktuell am häufigsten verwendete Methode sind akustische Messverfahren, die das dreidimensionale Strömungsfeld (u, v, z) punktuell oder vertikal aufgelöst erfassen. Das Messprinzip beruht auf dem Doppler-Effekt und einem umfassenden post-processing ([29]). Die weltweit führenden Hersteller solcher Geräte sind Teledyne-RD Instruments (Poway, USA), Nortek (Rud, Norwegen) und SonTek (San Diego, USA). Diese bieten eine große Auswahl an Geräten an, die für bestimmte Messanforderungen ausgelegt werden. In Seen und im speziellen in der Flachwasserzone von Seen sind Messanwendungen notwendig, die eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung mit einer hohen Messauflösung (cm s^{-1} bis mm s^{-1}) ermöglichen.

Autonome, GPS-gestützte Drifter sind mit einem GPS-Empfänger ausgestattete Datenlogger, die in eine kleine Boje integriert sind. Die Boje ist mit einer dünnen Leine an einem sich im Wasser befindlichen zylinderförmigen Segel verbunden (Abbildung 5). Das Segel sollte möglichst groß dimensioniert sein, um Messartefakte zu minimieren. Aus den Drifterpfaden kann die Hintergrundströmung abgeleitet werden ([28]).

Beide Methoden wurden am Bodensee erfolgreich erprobt und sind auf andere Seen übertragbar. Für die punktuelle Messung des mittleren Strömungsfelds sind die akustischen Messgeräte am besten geeignet, da sie über lange Zeiträume und auch bei Starkwind bzw. Sturmereignissen eingesetzt werden können. Der entsprechend dimensionierte und konstruierte autonome

Drifter ist ein sehr geeignetes Werkzeug, um horizontal aufgelöste, kontinuierliche Strömungsfelder in der Flachwasserzone von Seen über einige Stunden zu messen.

Mittleres, punktuell und horizontal hochaufgelöstes Strömungsfeld: Anwendungen im Bodensee

Zur Erfassung der Strömungsdynamik in Zeit und Raum sind sowohl punktuelle Messungen über lange Zeiträume (Wochen bis Monate) als auch räumlich gut aufgelöste Messungen über kürzere Zeiträume notwendig. Im HyMoBioStrategie-Projekt wurde das Strömungsfeld (Hintergrundströmung) durch punktuelle Messungen über viele Wochen und als horizontal aufgelöste Momentaufnahmen durch Punktmessungen in kurzer zeitlicher Folge (horizontal aufgelöstes Vektorfeld) oder durch zehn gleichzeitig ausgebrachte Driftkörper (kontinuierlich fortschreitende Vektorfelder) gemessen.

Die mittlere Hintergrundströmung in der Flachwasserzone des Bodensees (0,5–3 m Wassertiefe) verläuft meist uferparallel und beträgt $0,02-0,04 \text{ m s}^{-1}$ wie am Beispiel des Untersuchungsgebiets in Kressbronn zu erkennen ist (Abbildungen 3 und 4). Während Starkwindereignissen ist die Strömungsgeschwindigkeit mit zum Teil $>0,1 \text{ m s}^{-1}$ wesentlich größer (Abbildung 3).

Die horizontal aufgelösten Strömungsfelder bekräftigen die Aussagen der punktuellen Langzeitmessung sowohl für die Strömungsrichtung als auch für die typischen Strömungsgeschwindigkeiten (Abbildungen 4 und 5). Das räumlich aufgelöste Vektorfeld (Abbildung 4) erfasste darüber hinaus das Auftreten von lokalen Wirbeln (Kreisströmung) innerhalb der Kressbronner Bucht. Ebenfalls zeigten sich kleinräumige Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Untersuchungsgebiets. Die Drifter-Experimente, die die Erfassung der Hintergrundströmung als horizontal aufgelöste, kontinuierlich fortschreitende Vektorfelder ermöglicht, sind von besonderer Bedeutung für die Validierung numerischer Modelle (siehe unten). Damit können nicht nur räumliche Unterschiede im Vektorfeld, sondern auch dessen zeitliche Variabilität über ausgeglichene Zeiträume gemessen werden. Dies ist am Beispiel des Drifter-Experiments am 08.12.2016 zu erkennen (Abbildung 5), während dessen das Strömungsfeld bei nahezu konstanter Magnitude innerhalb von einer Stunde seine Richtung von Nord/Nordwest- auf eine uferparallele Südost-Strömung änderte.

ERFASSUNG VON UMLAGERUNGS- UND TRANSPORT-PROZESSEN

Der Transport von Sedimenten lässt sich durch den Sohl-, Intermediär- und den Suspensionstransport beschreiben (vgl. Kapitel 7, S. 75 ff.). Dabei werden die Partikel durch überkritische Bodenschubspannungen aus dem Sediment herausgelöst und

transportiert. Beim Suspensionstransport werden feine Partikel in der Wassersäule gehalten (Gleichgewicht zwischen Resuspension und Sedimentation) und mit der Hintergrundströmung transportiert. Dabei korreliert die Transportstrecke mit der Verweildauer der suspendierten Partikel in der Wassersäule und der mittleren Strömungsrichtung und -geschwindigkeit). Eine detaillierte Übersicht zum Suspensionstransport (Beschreibung der Messmethoden, Dynamik und Muster der Partikelresuspension) und ein Beispiel zur Abschätzung der Sedimenttransportraten während Starkwindereignissen oder während der durch Schiffswellen dominierten Zeitperioden wird in Kapitel 7, S. 75–76 gegeben.

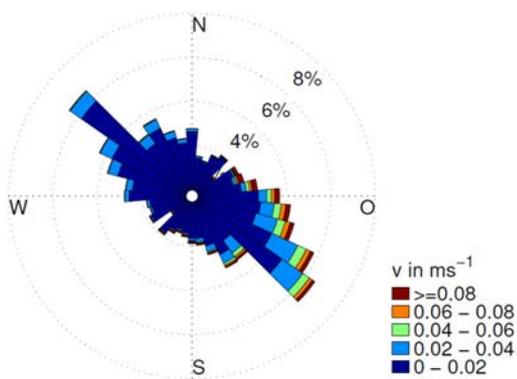


Abb. 3:

Mittleres Strömungsfeld an einer Messstelle (siehe Abbildung 4) im Untersuchungsgebiet Kressbronn während eines mehrere Tage andauernden Starkwindereignisses (28.2. - 2.3.2017). Das mittlere Strömungsfeld ist als Kompassrose (richtungsabhängige Häufigkeitsverteilung) dargestellt. Anders als beim Wind bezeichnet die die Strömungsrichtung die Richtung in die die Strömung geht (und nicht woher sie kommt).

Punktuelle Messung des Sedimentnettotransports

Im HyMoBioStrategie-Projekt wurden eine Vielzahl von Techniken zur punktuellen Niveaumessung der Gewässersohle erprobt und weiterentwickelt, die eine Ableitung des Sedimentnettotransports ermöglichen (vgl. Kapitel 7, S. 71 ff.). Die einzelnen Messtechniken mit dem jeweiligen Messprinzip, erzielbare Genauigkeiten, Vor- und Nachteile und mögliche Anwendungsbereiche sind in einer Tabelle zusammengefasst (Kapitel 7, Tabelle 1). Die anzuwendende Messtechnik bzw. Dauer der Messung ist von der jeweiligen Fragestellung abhängig. Für das mehrjährige Monitoring der Sohl-niveaudynamik im Bereich von Unterwasserdenkmälern haben sich ortsfeste E/A-Marker bewährt, die von Forschungstauchern halbjährlich oder jährlich abgelesen werden (Kapitel 7, S. 73–74). Für die Erfassung der kurz- und mittelfristigen Dynamik im Bereich von Minuten bis Monaten können hochauflösende hydroakustische Erosionsmarker verwendet werden (Kapitel 7, S. 74–75). In beiden Fällen entsprechen die gemessenen Sohl-niveau-Änderungen dem lokalen Sedimentnettotransport, d. h. einer Akkumulation oder einer Erosion von Feststoffen.

Horizontal aufgelöste Messung des Sedimentnettotransports

Horizontal aufgelöste Informationen über den Sedimentnettotransport sind zur Validierung von Sedimenttransportmodellen und für die Identifizierung von Erosions- und Akkumulationszonen in der Flachwasserzone von Seen, beispielsweise im Zuge des Monitorings von archäologischen Fundstellen, von Bedeutung (vgl. Kapitel 10). Aktuell stehen diese Informationen aber nur für kleine Messareale mit geringer Auflösung zur Verfügung, die meist mit punktuellen Messungen erzielt wurden.

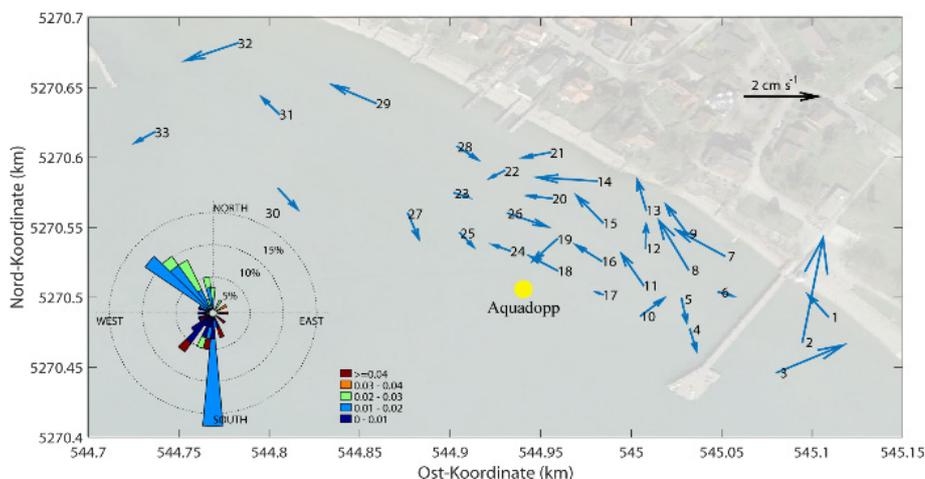


Abb. 4:

Mittleres horizontal aufgelöstes Strömungsfeld (Vektorfeld) und mittleres Strömungsfeld (Kompassrose) am Standort des Strömungssensors (Aquadopp) in der Flachwasserzone des Untersuchungsgebiets Kressbronn am 04.04.2016. Das Vektorfeld wurde aus lokalen Einzelmessungen über einen Zeitraum von 4 Stunden mit einem zweiten Strömungssensor erstellt.

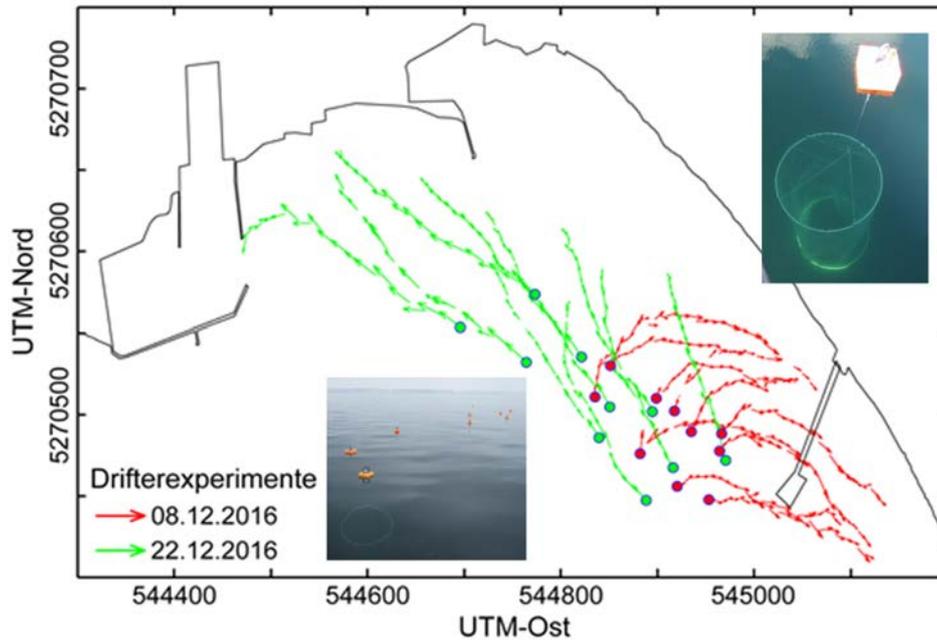


Abb. 5:

Zeitlich und horizontal aufgelöstes Strömungsfeld (kontinuierlich fortschreitende Vektorfelder) in der Flachwasserzone des Untersuchungsgebiets Kressbronn am 08. und 22.12.2016 (rote bzw. grüne Richtungspfeile). Das zeitlich und horizontal aufgelöste Strömungsfeld wurde mit Hilfe von je zehn autonom operierenden Driftkörpern über einen Zeitraum von vier bis fünf Stunden gemessen. Die Drifter bestanden aus einem kleinen Oberflächenschwimmer und einem sich im Wasser befindenden Driftkörper (Zylinder mit 1 m Durchmesser und 1 m Länge).

Die punktuellen, zeitlich hochaufgelösten Messungen mit den akustischen Erosionsmarkern im Bodensee haben gezeigt, dass die jährliche \downarrow Sohldynamik mit nur wenigen Zentimetern wesentlich geringer ist als etwa an Meeresküsten (Kapitel 7, Abbildung 9). Deswegen sind nur räumlich, d. h. lateral wie vertikal hochaufgelöste Techniken geeignet, die in Wassertiefen zwischen 0 und 5 m die geforderte Genauigkeit liefern können.

Eine Möglichkeit, die räumliche Verteilung des Sedimentnettotransports zu erfassen, besteht in der wiederholten flächigen Vermessung mit dem neu entwickelten ‚HydroCrawler‘ (vgl. Kapitel 5). Dieser verfügt über die notwendige Genauigkeit im Bereich von rd. 0,02 m horizontal wie vertikal. So sind wiederholte Messfahrten vor und nach einem Starkwindereignis, nach einem halben oder einem ganzen Jahr als mögliche zeitliche Taktung optimal. Die jeweiligen Geländemodelle können miteinander überlagert und somit Veränderungen in der Sedimentverteilung in der Flachwasserzone quantifiziert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur flächigen Erfassung des Sedimentnettotransports besteht in einer wiederholten luftgestützten LIDAR (Light Detection And Ranging)-Vermessung ([35]). Dieses Messverfahren ist in der Lage, große Flächen in kurzer Zeit zu vermessen. Dabei können durch die Wasserstandsdynamik sowohl trocken gefallene, als auch wasserbedeckte Bereiche des Litorals erfasst werden. Die Methode kann allerdings nur von Expert*innen durchgeführt und ausgewertet werden und

ist zudem sehr kostenintensiv. Ein weiterer Nachteil ist aktuell noch die vertikale Genauigkeit bei der Vermessung des wasserbedeckten Seebodens, die je nach Sicht- und Wassertiefe zwischen 0,05 und 0,15 m liegt. In ganzjährig mit Makrophyten bestandenen Wasserzonen ist diese Methode nicht anwendbar. So ist dieses Verfahren bevorzugt an Meeresküsten oder in Seen mit einer großen Sohldynamik ohne nennenswerten Makrophytenbewuchs anwendbar.

MODELLANSÄTZE

Numerische Modellansätze zur Simulation des Oberflächenwellenfelds, des Strömungsfelds und von Sedimenttransportprozessen ermöglichen im Gegensatz zu empirischen Ansätzen sowohl zeitlich als auch räumlich hochaufgelöste Ergebnisse und gestatten einen gesamtheitlichen Blick auf die Hydro- und Morphodynamik an Seeufern. Auf der anderen Seite sind empirische Daten eine wichtige Grundlage für die Kalibrierung und Validierung numerischer Modelle ([2], [10], [32]). Gekoppelte numerische Modelle wie z. B. Sedimenttransportmodelle sind in der Lage, nicht nur die Hydrodynamik (Wellen- und Strömungsfeld), sondern auch den Sedimenttransport und die resultierenden Reliefveränderungen (Morphodynamik) abzubilden. Die Entwicklung und Anwendung numerischer Modelle zur Simulation des Wellen- und Strömungsfelds und des Sedi-

menttransports haben ihren Ursprung in der Ozeanographie und Küstenforschung ([1], [4], [9], [23], [25]). Die Etablierung und Anwendung dieser Modelle in Seen ist erst seit den letzten ein bis zwei Jahrzehnten zu beobachten, wobei der Fokus auf sehr großen Seen wie den nordamerikanischen Great Lakes liegt ([21], [13], [33]).

Im Folgenden werden numerische Modelle zur Simulation des Wellenfelds (SWAN), der Propagation von Wellen und welleninduzierten Strömungen in der Flachwasserzone (SWASH) und ein Sedimenttransportmodell (Delft3D) anhand von Anwendungsbeispielen im Bodensee vorgestellt.

Modellierung des Wellenfelds

Für die Modellierung des Oberflächenwellenfelds stehen neben sehr einfachen Fetch-basierten Modellen ([6]) verschiedene fortgeschrittene numerische Modelle wie SWAN (Simulating WAves Nearshore, TU Delft, NL) und WAM ([36]) zur Verfügung. Fetch-basierte Modelle sind in der Lage, aus der Windwirklänge (engl. fetch), der Windgeschwindigkeit und der Wassertiefe Wellenparameter abzuleiten. In kleinen Seen mit einfacher Uferlinienführung lassen sich damit sehr gute Ergebnisse erzielen ([32]). Im Unterschied zu fortgeschrittenen Modellen wie SWAN können Fetch-basierte-Modelle allerdings Prozesse wie Wellen-Wellen-Interaktionen, ↻Wellenrefraktion und ↻Wellendiffraktion nicht abbilden und liefern in schmalen Seen oder Seeteilen, im Bereich von Inseln, Buchten und Landspitzen oder rund um Hafenanlagen keine realitätsnahen bzw. plausiblen Ergebnisse ([32]). Deswegen sollte für die detaillierte Berechnung des Wellenfelds und die Abschätzung der Wellenexposition von einzelnen Uferabschnitten ein fortgeschrittenes numerisches Modell wie SWAN verwendet werden. Das Modell wurde vor allem für Anwendungen an der Küste entwickelt ([3], [30]), es ist aber bei entsprechender Parametrisierung auf Seen übertragbar. Eine Übersicht über die verwendete Parametrisierung und Modellvalidierung für den Bodensee findet sich in [32], [16] und [28].

Das von uns verwendete Modell wies eine Gitterauflösung von 100×100 m für den gesamten Bodensee auf und wurde darüber hinaus in allen Untersuchungsgebieten des HyMoBioStrategie-Projekts mit einer sehr hohen Auflösung von 5×5 m durch sukzessive Nested-Grid Simulationen (von 100 m → 25 m → 5 m) realisiert (Abbildung 7). Der energetische Antrieb des dynamischen Wellenmodells erfolgte aus dem dynamischen (stündlich) und horizontal aufgelösten (1,1 × 1,1 km) Windfeld COSMO 1 (COnsortium for Small-scale MOdelling, COSMO, [31]), dessen Daten von MeteoSchweiz bezogen wurden. Das verwendete Sohlerief basiert auf dem digitalen Geländemodell (DGM) für den Bodensee mit einer Auslösung von 10×10 m bzw. 3×3 m ([35]). In unserem Modell wurde ebenfalls die Änderung der Wasserspiegellage berücksichtigt (Tagesmittelwerte der Pegels Konstanz, LUBW). Die Ausgabe von

Modelldaten ist zum Zwecke detaillierter Kurzzeitbetrachtungen im Minutentakt und bei Langzeitstudien im Stundentakt sinnvoll.

Ereignisbezogene Kurzzeitdynamik des Wellenfelds

Auf Basis eines parametrisierten und validierten Wellenmodells können hochaufgelöste Kurzzeitsimulationen für einzelne Starkwindereignisse gerechnet werden. Im HyMoBioStrategie-Projekt wurden für alle sechs Untersuchungsgebiete Simulationen für das Starkwindereignis aus westlichen Richtungen zwischen dem 21. und 29. April 2016 gerechnet und mit empirischen Messdaten verglichen (Abbildung 6). Der Vergleich zeigt, dass die gefundene Parametrisierung des Modells für alle Untersuchungsgebiete unabhängig von der Windwirklänge gleichermaßen geeignet und somit seeweit anwendbar ist. Aus den Magnituden der Wellenhöhen lässt sich bereits die unterschiedliche Exposition der Untersuchungsgebiete erkennen: Sipplingen mit der geringsten und Langenargen mit der höchsten Exposition (Abbildung 6). Dagegen unterscheidet sich die zeitliche Dynamik des Wellenfelds nur geringfügig zwischen den Untersuchungsgebieten.

Ein wesentlicher Vorteil von numerischen Wellenmodellen ist die räumliche Auflösung, d. h. es stehen nicht nur Wellendaten an der jeweiligen Messstation, sondern für das gesamte Seebecken zur Verfügung. Die räumliche Verteilung des Wellenfelds mit seinen Eigenschaften ist pro Zeitschritt darstellbar und auswertbar. Die hohe räumliche Variabilität, hier am Beispiel der signifikanten Wellenhöhe (H_s) im Bereich des Bodensees (Abbildung 7) wird vor allem auf kleiner räumlicher Skala innerhalb der Kressbronner Bucht sichtbar. So ist die signifikante Wellenhöhe im Norden der Kressbronner Bucht mit rd. 0,3 m nur etwa halb so groß wie im südlichen Teil der Bucht (Abbildung 7B). Deswegen sind in Seen neben der beckenweiten Simulation des Wellenfelds räumlich hochaufgelöste Simulationen für bestimmte Uferabschnitte und die Flachwasserzone notwendig und werden deswegen hier empfohlen.

Langzeitsimulation des Wellenfelds: Wellenbelastung der Seeufer

Seewite Langzeitsimulationen des Wellenfelds über mehrere Jahre hinweg können mit Hilfe eines validierten Modells (siehe oben) zur Abschätzung der Exposition der Ufer gegenüber windinduzierten Oberflächenwellen verwendet werden. Ein Maß für die Exposition des Seeufers gegenüber Oberflächenwellen ist die signifikante Wellenhöhe (H_s). Wellenhöhen >0,15 m führen in der Flachwasserzone (1 m Wassertiefe) zur Resuspension von Partikeln.

Die Modellergebnisse für den Bodensee zeigen, dass die Wellenbelastung der Uferzonen saisonal und räumlich sehr stark variiert. Generell ist die Exposition aller Ufer rund um dem Bodensee im Winterhalbjahr höher als im Sommer. Der Unterschied wird aber in einzelnen Uferabschnitten durch die hohe

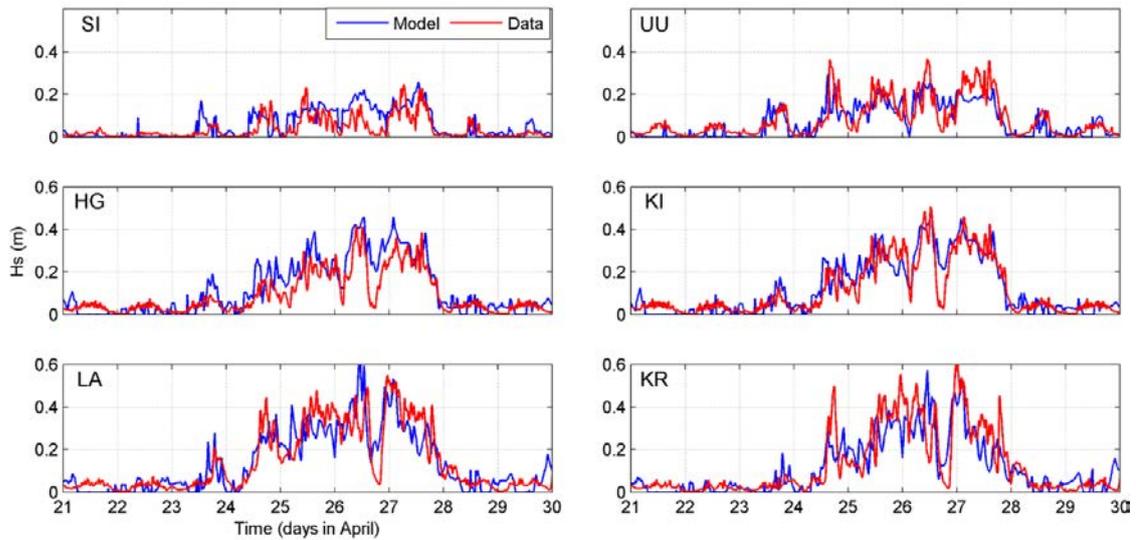


Abb. 6:

Zeitliche Dynamik des Wellenfelds und Validierung der Modellergebnisse anhand der gemessenen (Data, rot) und simulierten (Model, blau) signifikanten Wellenhöhen H_s in allen sechs Untersuchungsgebieten (SI...Sipplingen, UU...Unteruhldingen, HG...Hagnau, KI...Kirchberg, LA...Langenargen, KR...Kressbronn) zwischen dem 21. und 29.04.2016.

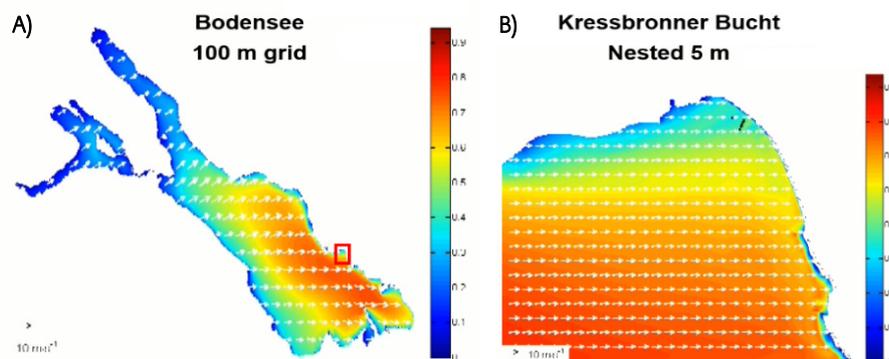


Abb. 7:

Numerische Simulation des Oberflächenwellenfelds, der signifikanten Wellenhöhe H_s , im Bodensee: A) Modellausschnitt: gesamter Bodensee mit 100×100 m Gitterauflösung. B) Modellausschnitt: Kressbronner Bucht mit 5×5 m Gitterauflösung. Die Farbkodierung gibt die räumliche Verteilung der signifikanten Wellenhöhe wieder und die weißen Pfeile stellen das zu Grunde liegende dynamische und horizontal aufgelöste Windfeld (COSMO 1) für ein Starkwindereignis am 27.04.2016 um 2 Uhr dar.

Exposition gegenüber Schiffswellen (nicht im Modell abgebildet) abgeschwächt. Die langjährig mittlere Exposition der Untersuchungsgebiete auf Basis der Modellsimulationen bestätigt prinzipiell die Ergebnisse der Messungen zur Exposition der sechs Untersuchungsgebiete gegenüber Windwellen und ist wie folgt: $LA > KR > KI > HG > UU > SI$ (Abbildung 8). Verschiebungen in der Reihenfolge zwischen Monitoring- und Modellergebnissen gibt es zwischen KR, KI und HG, was vor allem mit der Exposition gegenüber Schiffswellen zu erklären ist, die im Wellenmodell nicht berücksichtigt sind. Der prozentuale Anteil

der signifikanten Wellen mit $H_s > 0,15$ m an der betrachteten Gesamt-Modellzeit ist wie folgt: $LA = 27 \%$, $KR = 23 \%$, $KI = 17 \%$, $HG = 15 \%$, $UU = 6 \%$ und $SI = 1 \%$. Das heißt, die Untersuchungsgebiete LA und KR sind am stärksten exponiert, gefolgt von KI und HG, und die geringste Exposition weisen UU und mit großem Abstand SI auf. Im Untersuchungsgebiet KR tritt im langjährigen Mittel zu 23 % der Zeit Resuspension auf (Abbildung 8). Das entspricht genau der Resuspensionshäufigkeit von windinduzierten Wellen der Jahresmessreihe (vgl. Kapitel 7, S. 75 ff.). Am Beispiel aller am nördlichen Ufer des Boden-

sees gelegenen Untersuchungsgebiete zeigt sich der hohe Einfluss der Windwirklänge in Kombination mit den dominanten Windrichtungen auf die spezifische Exposition der Uferabschnitte. Auch auf kleiner räumlicher Skala kann es sehr große Unterschiede in der Exposition gegenüber Wellen geben (Abbildung 8, magentafarbene Ellipsen).

Wie am Beispiel des Bodensees gezeigt, kann ein validiertes Wellenmodell als Prognose-Tool eingesetzt werden: i) für die Bestimmung des zukünftigen Wellenfelds (z. B. mehr und stärkere Windereignisse im Zuge des Klimawandels) und ii) für die Abschätzung der Exposition der Flachwasserzone und Ufer gegenüber Wellen unter Berücksichtigung von Windprognosen, Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Extremereignisse und variierender Wasserstände.

Besonders die räumlich hochaufgelöste Kenntnis der Wellenbelastung ist für das Management der Uferabschnitte, geplante Renaturierungen, die Anpassung von Schutzmaßnahmen im Bereich der Ufer, das Monitoring der beiden Qualitätskomponenten der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), Makrophyten und Makrozoobenthos, oder die Gefährdungsabschätzung von archäologischen Unterwasserdenkmälern des UNESCO-Welterbes gegenüber Erosion von hoher Relevanz.

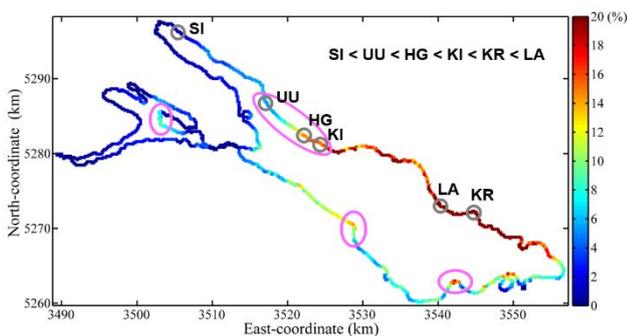


Abb. 8:

Räumlich aufgelöste, mittlere Wellenexposition der Ufer rund um den gesamten Bodensee. Die Exposition ist als die relative Häufigkeit von signifikanten Wellen mit $H_s > 0,15$ m dargestellt. Erklärung der Abkürzungen der Untersuchungsgebiete siehe Abbildung 6. Die Darstellung basiert auf dem Zeitraum 2009–2010. Die magentafarbenen Ellipsen verweisen auf Gebiete, in denen sich die Exposition auf sehr kleiner räumlicher Skala stark verändert.

Anwendung des Wellenmodells in der Praxis: Unterstützung in der Planungsphase

Wellenmodelle können bereits in der Planungsphase von wasserbaulichen Maßnahmen, z. B. Uferbefestigungen, Renaturierungen, Hafenanlagen und Wellenschutzwänden, wichtige Informationen über die zu erwartende Wellenbelastung geben. Diese sind für die Dimensionierung und Auslegung des Bauwerks wichtig und tragen insofern zur langfristigen Funktionalität und Standsicherheit des Bauwerks bei.

Im konkreten Beispiel ist das Regierungspräsidium Tübingen (RPT) an der Planung und Umsetzung von Uferrenaturierungs- und Umgestaltungsmaßnahmen am baden-württembergischen Ufer beteiligt, wozu auch die in Durchführung befindliche Maßnahme in der Kressbronner Bucht gehört (vgl. Kapitel 11). Westlich der geplanten Renaturierungsstrecke befindet sich der private Yachthafen der ‚Bodan-Werft Freizeit und Hafen GmbH‘, der durch eine Schutzwand vor den häufig auftretenden Föhnstürmen geschützt werden sollte. Zur Dimensionierung der Föhnschutzwand wurde im Vorfeld eine Abschätzung der Wellenexposition und des Wellenfelds mit seinen Eigenschaften für mehrere Föhnsturmsszenarien gemacht. Diese Vorgehensweise ist neu, da bis dahin keine gesicherten, hochaufgelösten Modellsimulationen möglich waren. Es wurde ein Föhnsturm aus Süd-Süd-Ost mit 120 km h^{-1} bei unterschiedlichen Wasserspiegellagen von 394,51 m (mNW), 395,30 m (mMW), 396,37 m (mHW) und 397,10 m (15-jähriges HW) simuliert.

Die Ergebnisse der Szenarien (Abbildung 9) verdeutlichen den starken Einfluss der Wasserspiegellage auf die im Bereich der Föhnschutzwand (schwarzer Strich in Abbildung 9) zu erwartenden Wellenhöhen und die damit einhergehende hydrodynamische Belastung des Bauwerks. Im Winter bei niedrigem Wasserstand wird ein Großteil der Wellenenergie bereits vor der Föhnschutzwand in der Flachwasserzone abgebaut, so dass die zu erwartenden Wellenhöhen mit 0,6 m moderat sind. Je höher die Wasserspiegellage, desto höher die Wellen im Bereich der Föhnschutzwand und desto größer die hydrodynamische Belastung des Bauwerks. Ein Föhnsturm im Sommer bei hohem Wasserstand stellt die höchste Belastung für die Föhnschutzwand dar. Bei diesem Szenario können Wellenhöhen von bis zu 1,8 m erreicht werden. Allerdings sind Föhnlagen bei niedrigem Seespiegel im Winterhalbjahr häufiger als im Sommerhalbjahr bei hohem Wasserstand.

Anwendung des Wellenmodells zur Abschätzung der räumlichen Verteilung von Partikel-Resuspensionen

Aus der zeitlich und räumlich durch das Nested-Grid-Verfahren hochaufgelösten Modellierung der Eigenschaften des Oberflächenwellenfelds (hier nur Windwellen) kann unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung der Oberflächensedimente und der jeweiligen Wasserstände das Resuspensionspotential abgeschätzt und damit eine Gefährdungsabschätzung einzelner Uferabschnitte gegenüber Erosion vorgenommen werden.

Dabei werden die pro Zeitintervall (hier: eine Stunde) modellierten Wellenparameter (z. B. die welleninduzierten bodennahe Strömungsgeschwindigkeit U_{max}) mit den Daten zur räumlichen Korngrößenverteilung der Silt- und Sandfraktion des Sediments unter Verwendung empirischer Relationen zur Mobilisierung von Sedimenten ([6]) herangezogen. Dadurch lassen sich pro Zeitschritt räumlich hochaufgelöste Aussagen zum Auftreten von Resuspension machen.

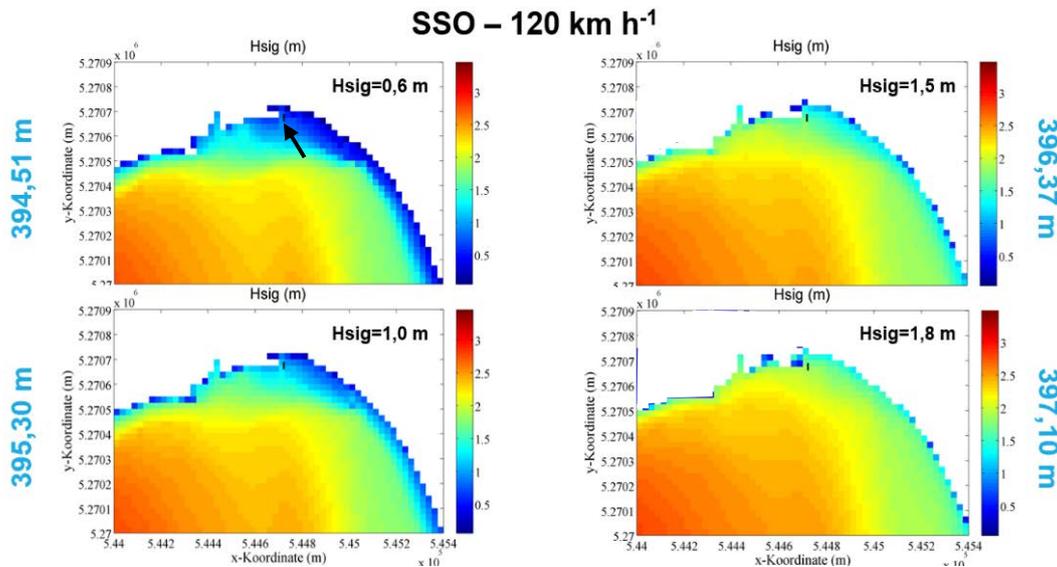


Abb. 9:

Numerische Simulation der signifikanten Wellenhöhe H_{sig} im Bereich der Kressbronner Bucht für ein Föhnsturm aus Süd-Süd-Ost mit einer Windgeschwindigkeit von 120 km h^{-1} bei unterschiedlichen Wasserspiegellagen: 394,51 m, 395,30 m, 396,37 m und 397,10 m ü. NHN. Die gewählten Wasserspiegellagen grenzen den Bereich der minimalen und maximalen Pegelstände ein. Die Föhnschutzwand ist maßstabsgetreu durch einen schwarzen Strich (Bild oben durch Pfeil markiert) dargestellt.

Exemplarisch wurde das Untersuchungsgebiet Unteruhldingen-Stollenwiesen betrachtet, welches als UNESCO-Welterbestätte besonders stark durch Erosion betroffen ist. Aus der simulierten räumlichen Verteilung der mittleren Resuspensionshäufigkeit (Jahresmittel) in der Flachwasserzone lassen sich Zonen mit hohem Resuspensionspotential von Zonen mit geringer Resuspensionshäufigkeit abgrenzen (Abbildung 10). Im Bereich Unteruhldingen ist besonders die östlich und weiter südlich der Hafeneinfahrt gelegene Flachwasserzone durch Resuspension gekennzeichnet. Die Ausbildung von uferparallelen Bändern in der Langzeitsimulation (rote Bänder in Abbildung 10) verdeutlichen das Zusammenspiel zwischen dem Auftreten einzelner Starkwindereignisse und der Wasserstandsdynamik. Das heißt, eine Folge von Starkwindereignissen bei ähnlichem Wasserspiegel führt in Zonen maximaler U_{max} -Werte zu einer Erhöhung der Resuspensionshäufigkeit. Dieses Muster ist in Seen mit einer großen saisonalen Magnitude des Wasserstands wie dem Bodensee besonders ausgeprägt. Daraus folgt, dass die Wasserstandsdynamik einen sehr großen Einfluss auf die räumliche Verteilung und damit die typischen Muster der zu erwartenden Resuspension hat. Die seeweit zur Verfügung stehenden Wellendaten ermöglichen eine problemlose Anwendung bzw. Übertragbarkeit auf andere Untersuchungsgebiete eines Sees.

Es wird empfohlen, Wellenmodelle zur Abschätzung der räumlichen Verteilung und Muster der Partikel-Resuspension einzusetzen, d. h. für die Frage: Wo, wieviele und wie häufig werden Partikel remobilisiert? Dies ermöglicht Aussagen über die zu erwartende räumliche Verteilung der Erosion und damit die Gefährdung von Unterwasserdenkmälern oder auch über die Stabilität von Schutzschüttungen und Renaturierungsflächen.

Anwendung eines Wellenpropagationsmodells

Die Auswirkungen eines künstlich veränderten Uferreliefs können nur mit Modellen betrachtet werden, die in der Lage sind, die komplexen Prozesse in der Flachwasserzone, wie Wellen-Wellen-Interaktionen, nichtlineare Effekte, Rotation (Wirbel), \hookrightarrow Energiedissipation und weitere Transportphänomene, z. B. Stokes-Drift und \hookrightarrow Ripströmungen abzubilden. Ein häufig dafür genutztes Modell ist SWASH (Simulating WAVes till SHore; TU Delft, NL). Das Modell wurde entwickelt, um unter anderem die Transformation \hookrightarrow dispersiver Oberflächenwellen vom Freiwasser bis zum Ufer, die Dynamik in der Wellenbrecherzone (z. B. Wellenbrechung, Energieabbau, Turbulenz) oder die Interaktion von Wellen mit der Hintergrundströmung zu untersuchen².

² Weitere detaillierte Informationen sind auf der SWASH Homepage zu finden (<http://swash.sourceforge.net/>).

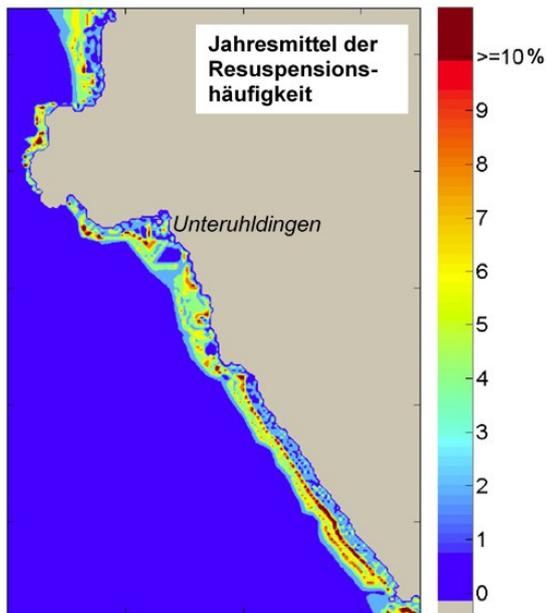


Abb. 10:

Simulierte räumliche Verteilung der mittleren Resuspensionshäufigkeit (Anteil der Zeit, zu der an einer bestimmten Stelle Resuspension auftritt, bezogen auf ein Jahr) in der Flachwasserzone rund um das Untersuchungsgebiet Unteruhldingen-Stollenwiesen. Die Farbcodierung gibt an, wo und wie häufig Oberflächensedimente durch Windwellen resuspendiert werden. Die Ergebnisse beruhen auf den simulierten räumlich aufgelösten welleninduzierten, bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten U_{max} ($m\ s^{-1}$), der gemessenen räumlichen Verteilung der Oberflächensedimente und berücksichtigen die saisonalen Wasserspiegelschwankungen.

Am Beispiel der geplanten Seeuferrenaturierung in der Kressbronner Bucht wurde der Einfluss der geplanten Vorschüttung auf das Wellen- und Strömungsfeld mit dem Modell SWASH untersucht. Im Zuge der Renaturierung sollen die Uferlinie verändert, Ufermauern und Stege entfernt und durch Anschüttung mit Kies das Relief gerade in der sehr flachen, ufernahen Wasserzone verändert werden. Die Ausführung dieser Maßnahme ist typisch für Renaturierungsmaßnahmen am gesamten Bodenseeufer („wasserbauliche Grundvariante“). Wie sich diese Veränderungen auf die Eigenschaften des Wellenfelds und die Bodenschubspannung in der Uferzone auswirken, ist ohne eine detaillierte, allerdings sehr rechenintensive Modellierung nicht abschätzbar. Diese sollte eine sehr hohe räumliche (cm) und zeitliche (s) Auslösung aufweisen. Die numerischen Experimente wurden für die aktuelle Reliefsituation und den Planzustand nach der Uferrenaturierung durchgeführt. Der Vergleich der beiden Szenarien zeigt, dass sich nur im ufernahen Bereich die Welleneigenschaften und die Bodenschubspannung verändern (Abbildung 11). Durch die Vorschüttung werden die Wellenlängen in Ufernähe kleiner, die Wellenhöhen bleiben etwa konstant und erhöhte Bodenschubspannungen sind bereits in größerer Entfernung von der Uferlinie zu beob-

achten. Dafür sind die erzeugten Bodenschubspannungen direkt in der Wellenbrecherzone etwas geringer, d. h. die Wellenenergie wurde bereits entlang der weniger steil verlaufenden Uferplattform durch Sohlreibung \rightarrow dissipiert. Insgesamt sind die Auswirkungen aber gering, d. h. das durch die Renaturierung erzeugte neue Uferrelief hat im Vergleich zur Ausgangssituation nur einen geringen Einfluss auf die Welleneigenschaften und die Strömungen in der Uferzone.

Die Modellsimulationen haben gezeigt, dass das Wellenpropagationsmodell die zu erwartende Veränderung des Wellen- und Strömungsfeld durch ein modifiziertes Uferrelief im Zuge von Umgestaltungen des Ufers und der vorgelagerten Flachwasserzone abbilden kann, beispielsweise bei Renaturierungsmaßnahmen mit Vorschüttung. Es wird empfohlen, im Vorfeld vom Uferumgestaltungen Wellenpropagationsmodelle als Prognose-Tool in die Planungen mit einzubeziehen, um mögliche negative Auswirkungen des modifizierten Uferreliefs auf das Wellen- und Strömungsfeld und damit auf den langfristigen Sedimenttransport rechtzeitig zu erkennen und ggf. zu minimieren.

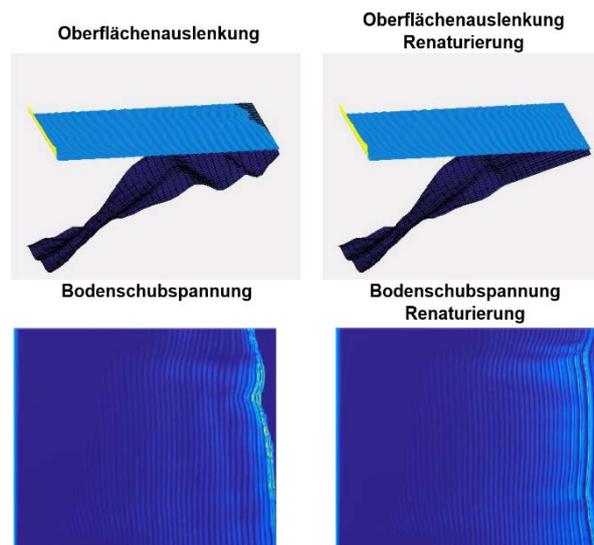


Abb. 11:

Modellszenarien der Oberflächenauslenkung (Wellenfeld) und der Bodenschubspannung (Scherung am Boden) für die zwei Szenarien des aktuellen und des geplanten Uferreliefs (nach der Uferrenaturierung) im Bereich der Kressbronner Bucht.

Sedimenttransportmodell

Die Sedimentdynamik in der Flachwasserzone von Seen wird durch die Eigenschaften des Oberflächenwellen- und Strömungsfelds, des Reliefs sowie durch die Wasserstandsdynamik beeinflusst. Empirische Untersuchungen zur Sedimentdynamik

liefern meist nur räumlich und zeitlich begrenzte Informationen. Im HyMoBioStrategie-Projekt wurde ein gekoppeltes numerisches Modell auf Grundlage von Delft3D (Deltares, NL) entwickelt, welches gleichzeitig die räumliche und zeitliche Dynamik des Wellen- und Strömungsfelds, des Sedimenttransports und die resultierende Morphodynamik in einem See abbilden kann ([14]). Durch Modell-Szenarien und die Simulation einer Sturmperiode im Bereich der Kressbronner Bucht konnte der Einfluss unterschiedlicher Windrichtungen und Wasserstände auf das Wellen- und Strömungsfeld sowie den Sedimenttransport analysiert werden. In weiteren Modellszenarien wurde der Einfluss des Hafens in Unteruhldingen untersucht, dessen Ausbau als eine der Ursachen für die starke Erosion im Bereich der archäologischen Fundstelle östlich des Hafens gesehen wird.

Die räumlich und zeitlich hochaufgelöste Modelldomäne wurde jeweils mit Freiland-Messdaten validiert. Die Ergebnisse der Modellsimulationen ermöglichten unter anderem die Identifizierung der Sedimenttransportdynamik und -bedingungen, lokaler Erosions- und Akkumulationszonen sowie Aussagen über langfristige Reliefänderungen.

Modellaufbau

Die Modellierung des Sedimenttransports in der Flachwasserzone erfordert eine sehr hohe räumliche Auflösung, sowohl vertikal als auch horizontal, um die zu Grunde liegenden komplexen physikalischen Prozesse – Wechselwirkungen zwischen Sohlrelief, Hintergrundströmung, Oberflächenwellen und den Sedimenteigenschaften – abzubilden. Auf der anderen Seite muss immer das gesamte Seebecken simuliert werden, um die meist durch interne Wellen (z. B. Kelvin Wellen) erzeugte Hintergrundströmung und das sich über große Windwirklängen aufbauende Wellenfeld abzubilden. Deswegen wurde als Lösungsansatz eine Kombination aus einem etwas gröberen, seeweiten und einem in der Flachwasserzone lokal verfeinerten Modell-Gitter verwendet. Weitere Details zum Modellaufbau, der Parametrisierung und Validierung des Modells sowie detaillierte Szenarien zum Einfluss von Windrichtung und Wasserstand finden sich in [14].

Sturmperiode: Kressbronner Bucht

Dynamische Simulationen des Wellen- und Strömungsfelds und des Sedimenttransports wurden exemplarisch für den Zeitraum 22.–29. April 2016 durchgeführt, welcher ein mehrtägiges Sturmereignis vom 24.–28. April mit Wind aus meist westlichen Richtungen umfasste und gegenüber denen die Kressbronner Bucht (KB) besonders exponiert ist. Zum Vergleich wurden während der Sturmperiode drei Zeitpunkte mit unterschiedlicher Windrichtung (t1 – Südwind, t2 – Südwestwind und t3 – Westwind) und ähnlich hohen Windgeschwindigkeiten (t1 – 6 m s^{-1} ; t2 – $8,7 \text{ m s}^{-1}$ und t3 – $7,3 \text{ m s}^{-1}$) ausgewählt. Diese Momentaufnahmen ermöglichten eine detaillierte Betrachtung des sich unter ständig leicht ändernden Windge-

schwindigkeiten und -richtungen ausbildenden Strömungsfelds, des Sedimenttransports und vor allem der räumlichen Verteilung des Sedimentnettotransports.

Zu allen drei Zeitpunkten betrug die signifikante Wellenhöhe im Bereich der KB $H_s = 0,2\text{--}0,6 \text{ m}$ (Abbildung 12a). Die räumlichen Muster des Wellenfelds (z. B. Wellenrichtung und Exposition der einzelnen Uferabschnitte in der KB) und damit die lokale Exposition der Ufer variierten aber sehr stark mit der Wind- bzw. Wellenrichtung. Im Freiwasser korrelieren typischerweise Wind- und Wellenrichtung sehr stark. Durch Refraktion der in die Flachwasserzone einlaufenden Wellen entkoppeln sich Wind- und Wellenrichtung. Dieser Effekt war besonders gut bei Südwind im Südosten der KB zu beobachten. Bei Südwind trat die größte Wellenexposition der Ufer im Westen und bei Westwind im Südosten der Bucht auf. Bei Südwest, der häufigsten Windrichtung am Bodensee, war die gesamte Uferzone der Bucht einer hohen Wellenbelastung ausgesetzt. Im Allgemeinen reagierte das Wellenfeld sehr schnell auf die Dynamik des Windfelds in der KB. Das ist typisch für Seen mit einer begrenzten Windwirklänge.

Die Magnituden der mittleren Geschwindigkeit der Hintergrundströmung, mit der die suspendierten Partikel transportiert werden, waren in der Flachwasserzone der KB mit $0,05\text{--}0,1 \text{ m s}^{-1}$ zu allen drei Zeitpunkten in einem für Seen typischen Bereich (Abbildung 12b). Das oberflächennahe Strömungsfeld in der KB, berechnet für einen Meter unter der Wasseroberfläche, wies je nach Zeitpunkt (t1, t2, t3) unterschiedliche Strömungsmuster auf (Abbildung 12b). Bei Südwest- und Westwind war die Strömungsrichtung von Nordwest nach Süd gerichtet und folgte damit dem Verlauf der Uferlinie in der Bucht. Dagegen unterschied sich das Strömungsfeld zum Zeitpunkt t1 mit Südwind dahingehend, dass im Süden eine nordwestliche Strömung und im Nordwesten eine östliche Strömung entlang der Flachwasserzone der KB vorherrschte. Die beiden entgegengesetzten Strömungen trafen sich im Nordosten der Bucht und führten zu einem vom Ufer weg gerichteten oberflächennahen Strömungskeil (Abbildung 12b, oben). Das heißt, die uferparallele Strömung wird ins Freiwasser abgelenkt, also in Wassertiefen von mehr als 10 m in einer Entfernung von rd. 400 m von der Uferlinie. Die suspendierten Partikel werden mit der Strömung aus der Flachwasserzone ins Freiwasser transportiert. Bei nicht ausreichendem Nachschub von Sedimenten, z. B. durch Zuflüsse, kann dies zu einer negativen Feststoffbilanz, also zur Erosion führen.

Entgegengesetzte Strömungen und resultierende Strömungskeile entstehen bei sich ändernden Windrichtungen im Zusammenspiel mit dem Uferrelief. Gerade das oberflächennahe Strömungsfeld, welches der Scherung des Windes folgt, kann schnell seine Richtung ändern. Diese in der Flachwasserzone kleinskalig auftretenden Muster können nur mit hochaufgelösten (Gitterweite $<10 \text{ m}$), dynamischen Simulationen abgebildet werden, d. h. die für die beckenweite Simulation von großen

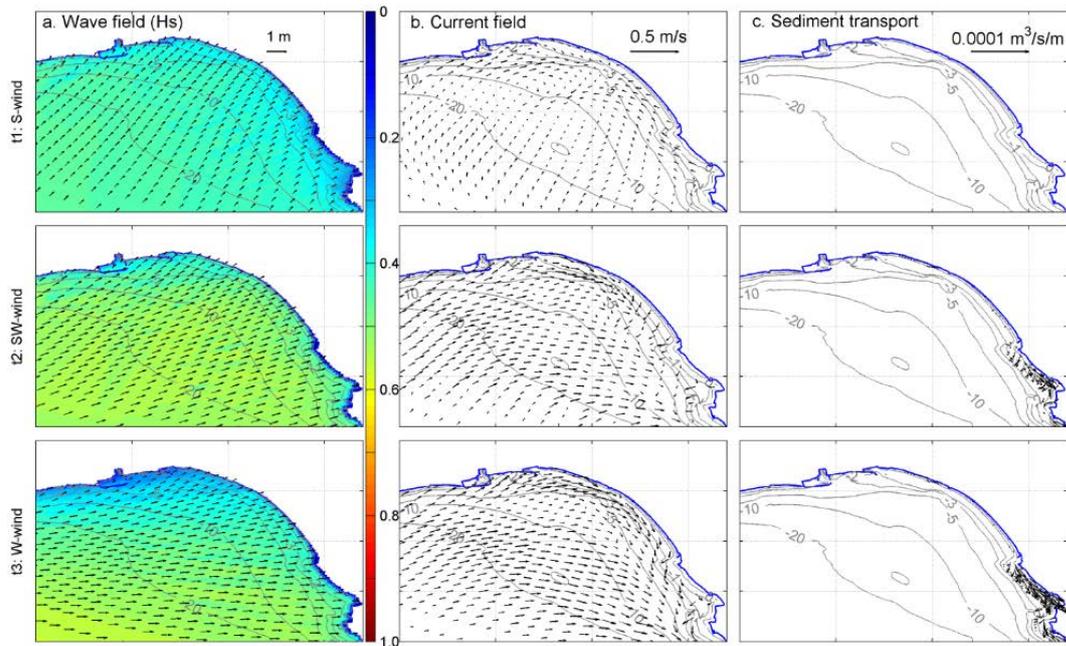


Abb. 12:

Wellenfeld (a), oberflächennahe Strömungsgeschwindigkeiten (b) und Verteilung der Sedimenttransportrate (c) in der Kressbronner Bucht für die drei betrachteten Zeitpunkte t1 – Süd-, t2 – Südwest- und t3 - Westwind während einer Sturmperiode. Zur besseren Veranschaulichung ist nur jeder 6. (a und b) und jeder 3. (c) Gitterpunkt dargestellt. In a) stellen die Pfeile die Wellenrichtung und die Farbcodierung die signifikante Wellenhöhe dar (aus [14]).

Seen wie dem Bodensee typischerweise verwendeten Gitterauflösungen von 200 bis 500 m (z. B. LUBW: Bodensee-Online, <<https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/bodenseeonline>>) sind für die Sedimenttransportmodellierung nicht ausreichend.

Signifikanter Sedimenttransport in der Flachwasserzone der KB war nur im Südosten zu den Zeitpunkten t2 und t3 zu beobachten (Abbildung 12c, Mitte und unten). Dieser war zu beiden Zeitpunkten auf die ufernahe Flachwasserzone bis rd. 3 m Wassertiefe begrenzt und hauptsächlich nach Südwest bis Südost gerichtet. Die Magnitude des Sedimenttransports war zu t3 etwas größer als zu t2, obwohl die signifikante Wellenhöhe um rd. 0,1 m geringer war, was geringere bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten und weniger Partikel-Resuspension zur Folge hatte. Grund dafür ist, dass kurz vor t3 die höchsten Windgeschwindigkeiten (bis 12 m s^{-1}) und signifikanten Wellenhöhen (0,55 m) der gesamten Sturmperiode erreicht wurden, die den Anteil an suspendierten Partikeln in der Flachwasserzone erhöhten. Bei nachfolgend niedrigeren Wellenhöhen werden zwar weniger Partikel neu resuspendiert, aber die noch in Suspension befindlichen, nur langsam sedimentierenden Partikel wurden weiter mit dem Strömungsfeld transportiert, was zu dem beobachteten Phänomen führt. Zum Zeitpunkt t1 war ein sehr geringer Sedimenttransport zu beobachten (der graphisch nicht abbildbar ist), obwohl die Geschwindigkeiten des Strömungsfelds nur geringfügig niedriger waren als zu t2 oder t3 (Abbildung 12b und c, oben). Ursache dafür war die geringe

signifikante Wellenhöhe sowie die geringe resultierende welleninduzierte, bodennahe Strömungsgeschwindigkeit, sowohl während als auch im Vorlauf zu t1 (Abbildung 12a, oben), die nur zu einer sehr geringen Resuspension von Partikel geführt hat.

Während der betrachteten Sturmperiode waren Winde aus westlichen Richtungen vorherrschend. Dadurch war vor allem der Südosten der KB gegenüber Oberflächenwellen exponiert (Abbildung 12a), was ein hohes Potential zur Mobilisierung und damit zur Umlagerung der Decksedimente zur Folge hatte (Abbildung 12c). Genau dieses Muster wurde als Ergebnis der dynamischen Simulation in der zeitlich integrierten, räumlichen Verteilung des Sedimentnetttransports wiedergefunden (Abbildung 13a). Im Südosten der KB wurden im Laufe der Sturmperiode rechnerisch eine rund 0,1 m mächtige Sedimentschicht in der ufernahen Flachwasserzone bis etwa 1 m Wassertiefe erodiert und zum Teil parallel zum Ufer innerhalb der 2 m Tiefenlinie wieder angelagert. Der verbliebene Rest der Sedimente wurde innerhalb der 5 m Tiefenlinie sedimentiert. Der Export von Sedimenten in größere Tiefen, die beim nächsten Sturmereignis aufgrund der Wassertiefe kaum mehr remobilisierbar sind und damit dauerhaft der Flachwasserzone verloren gehen, war gering. Im nördlichen und westlichen Teil der KB war die Umlagerung der Decksedimente mit maximal 20 bis 40 mm weniger stark ausgeprägt. Der Vergleich der gemessenen und modellierten Änderung des Sohl-niveaus an der Messstelle westlich des Anlegers in Kressbronn für die genannte

Sturmperiode verdeutlicht die Validität der Ergebnisse des Sedimenttransportmodells (Abbildung 13b). Sowohl die gemessenen als auch die simulierten Werte zeigten eine Akkumulation von Sedimenten (4 mm im Modell und 6 mm für die Messung) an dieser Stelle der Flachwasserzone. Die hohe zeitliche Dynamik der Sedimentumlagerung zwischen +15 mm und -10 mm innerhalb eines Tages, die durch den akustischen Abstandssensor an der Messstelle beobachtet wurde, kann das Modell aufgrund der immer noch zu groben Gitterauflösung von 5 bis 10 m, die einen integrierenden Effekt hat, nicht wiedergeben.

In Abbildung 13a lässt sich ein Muster von sich abwechselnden, uferparallelen Bändern erkennen, die hellgrün und gelb codiert sind. Diese korrelieren mit den vorhandenen uferparallelen Sanddünen, die während der hochauflösenden Vermessung des Bodensees in diesem Bereich der KB gefunden wurden ([35]). Aktuelle Messungen mit dem ‚HydroCrawler‘, der eine hochauflösende, flächige Vermessung der Decksedimente und deren Umlagerung ermöglicht ([8]), lässt vermuten, dass diese Sanddünen wandern bzw. ihre Form ändern. Größere Umlagerungen, die der Dimension der Sanddünen (Höhe 0,3 m und ufernormale Breite von 15 bis 40 m) entsprechen, müssen demnach das Resultat vieler aufeinanderfolgender Sturmereignisse sein.

In Seen ist der Sedimenttransport meist durch sehr geringe Magnituden gekennzeichnet und räumlich sowie zeitlich sehr heterogen. Signifikante, großflächige Sedimentumlagerungen wie z. B. die Ausbildung und Dynamik von Unterwasserdünen

oder die Feststoffbilanz sind nur über sehr lange Zeiträume möglich, gepaart mit immer wiederkehrenden, intensiven Sturmereignissen. Nur durch hochaufgelöste Simulationen über sehr lange Zeiträume können diese Prozesse abgebildet und weiter untersucht werden. Dabei dienen die modellbasierten Untersuchungen nicht nur dem Prozessverständnis der Hydro- und Morphodynamik in der Flachwasserzone von Seen unter Berücksichtigung von sich ändernden Umweltbedingungen und der Uferstruktur, sondern ermöglichen darüber hinaus die Abschätzung des Gefährdungspotentials einzelner Seeuferabschnitte, z. B. solcher mit Unterwasserdenkmälern, und bieten Entscheidungshilfen für das zukünftige Management der Seeufer (z. B. Planung von Seeuferrenaturierungen und Hafenanlagen).

Modellszenario: Hafen Unteruhldingen

Eine zentrale Fragestellung in Seen ist, wie sich Uferquerneubauten auf die hydro- und morphodynamischen Prozesse in der Flachwasserzone von Seen auswirken. Besonders Hafenanlagen mit weit vorspringenden Schutzmoln sind bekannt dafür, einen signifikanten Einfluss auf das Wellen- und Strömungsfeld und als Folge dessen auf den Sedimenttransport zu haben. In den letzten Jahrzehnten wurde vor allem im Bereich der archäologischen Fundstelle Unteruhldingen-Stollenwiesen, die seit 2011 zum UNESCO-Welterbe gehört (vgl. Kapitel 10), eine sehr starke Erosion beobachtet ([22]). Von Seiten des Landesamts für Denkmalpflege Baden-Württemberg wurden schon seit langem der Hafen und vor allem die Hafenerweiterung in

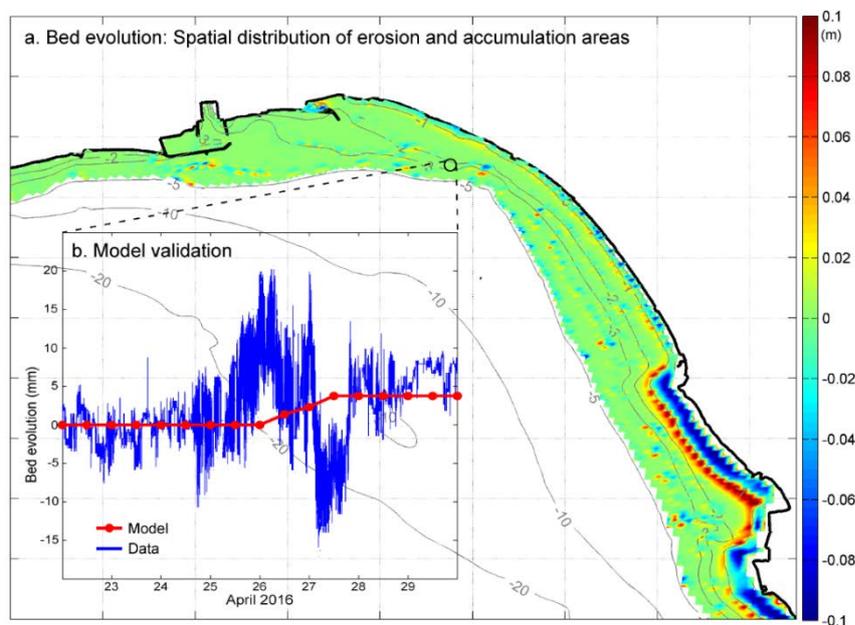


Abb. 13:

Sohniveauperänderungen in der Kressbronner Bucht in der betrachteten Sturmperiode vom 22.–29. April 2016. a) Modellerte, räumliche Verteilung der Sohniveauperänderungen in der Flachwasserzone bis zur 5 m-Tiefenlinie in einem Zeitraum von 8 Tagen. Gebiete mit Sediment-Erosion in Blau und mit Sediment-Akkumulation in Rot. b) Vergleich der gemessenen und modellierten, zeitlichen Änderung der Sedimentoberfläche an der Messstelle (schwarzer Kreis). Die zeitliche Änderung der Sedimentoberfläche wurde mit einem hochauflösenden akustischen Abstandssensor aufgezeichnet (vgl. Kapitel 7, S. 74). Aus [14].

den 1970er Jahren als Ursache für die fortschreitende Erosion angesehen. Der kausale Nachweis konnte aber aufgrund der komplexen räumlichen und zeitlichen Dynamik nicht erbracht werden. Das neu etablierte Sedimenttransportmodell für den Bodensee wurde nun zur Klärung dieser Vermutung eingesetzt.

In einzelnen Modellszenarien sollte der Einfluss des Hafens in Unteruhldingen auf die Sedimenttransportdynamik im Bereich der östlich des Hafens gelegenen Fundstelle untersucht werden. Dazu wurden zwei Modellszenarien, (i) die aktuelle Uferlinienführung mit den vorspringenden Schutzmolens und (ii) die Situation ohne jegliche Verbauung in der Flachwasserzone, durchgeführt und analysiert. Beide Modellszenarien wurden mit dem gleichen Wind aus Nordwest mit 120 km h^{-1} gerechnet.

Die Ergebnisse der Modellsimulationen sprechen für sich (Abbildung 14). Sowohl das Wellen- und Strömungsfeld als auch der resultierende Sedimenttransport in der Flachwasserzone sind durch den Hafen massiv verändert. Durch Wellendiffraktion an der Spitze der Hafenmole ist die signifikante Wellenhöhe (H_s) östlich des Hafens besonders hoch (Abbildung 14a, oben). Dies führt zu welleninduzierten, bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten von rd. $0,4 \text{ m s}^{-1}$, die in der Lage sind, die Partikel an der Sedimentoberfläche zu resuspendieren. Das Strömungsfeld ist rund um den Hafen signifikant gestört und das unter natürlichen Bedingungen vorherrschende uferparallele Strömungsfeld ist unterbrochen, was der Vergleich der Szenarien mit und ohne Hafen eindrucksvoll zeigt (Abbildung 14b). Aus dem Zusammenspiel zwischen der Hintergrundströmung und den durch Wellen resuspendierten Partikeln ergibt sich der Sedimenttransport. Im Falle eines natürlichen Uferreliefs ohne Hafen ist der Sedimenttransport uferparallel gerichtet (Abbildung 14c). Für das gezeigte NW-Wind-Szenario ist der Sedimenttransport von Nord nach Süd gerichtet. Im Fall von südöstli-

chen Winden, die vor allem im Sommer vorkommen, ist der Sedimenttransport entgegengesetzt von Süd nach Nord gerichtet (Modellszenario hier nicht gezeigt). Bei uferparallelem Sedimenttransport herrscht im Gebiet der archäologischen Fundstelle ein Gleichgewicht zwischen an- und abtransportierten Sedimenten. Das mögliche Sedimentdefizit im Norden des modellierten Uferabschnitts wird durch den Sedimenteintrag der Seefelder Aach ausgeglichen. Das Szenario mit Hafen zeigt, wie die von Norden her transportierten Sedimente vor der nördlichen Hafenmole in Richtung Freiwasser abgelenkt werden und dort in größerer Wassertiefe sedimentieren. Demnach wird der ursprüngliche uferparallele Sedimenttransport durch die Hafenmole unterbrochen, d. h. die Sedimente aus dem Delta der Seefelder Aach erreichen heute nicht mehr die archäologische Fundstelle im Osten des Hafens. Da gleichzeitig aus dem Gebiet der Fundstelle Sedimente in Richtung Süden verfrachtet werden, kommt es dort zu einem dauerhaften Sedimentdefizit (Abbildung 14c).

Mit dem hochaufgelösten Sedimenttransportmodell konnte erstmals gezeigt werden, welchen Einfluss der Hafen auf das Wellen- und Strömungsfeld und den resultierenden Sedimenttransport hat. Unter den vorherrschenden westlichen Winden am Bodensee kommt es durch die Unterbrechung des uferparallelen Sedimenttransports durch den Hafen zu einem Defizit an Sedimenten im Bereich der Fundstelle. Der Hafen und vor allem die Erweiterung der Hafenmole können im Zusammenspiel mit dem leicht sinkenden Wasserspiegel des Bodensees seit den 1930er Jahren als Hauptursachen für die beobachtete Erosion betrachtet werden.

Die Anwendung von Sedimenttransportmodellen ist noch immer eine kosten- und zeitintensive Methode und erfordert Expertenwissen. Dennoch ermöglicht deren Anwendung neue Einblicke in die Dynamik der Sedimente in Seen. Es wird empfohlen, zukünftig diese Modelle für ausgesuchte Fragestellungen

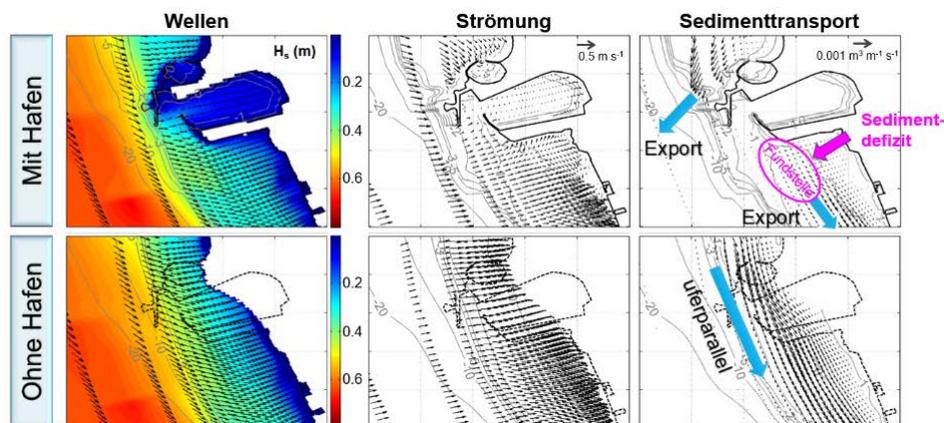


Abb. 14:

Einfluss des Hafens Unteruhldingen auf das umliegende Wellenfeld (a), das oberflächennahe Strömungsfeld (b) und den Sedimenttransport (c) für das Modellszenario Wind aus Nordwest (NW) mit einer Geschwindigkeit von 120 km h^{-1} . Die oberen Szenarien beziehen sich auf die aktuelle Situation mit Hafen, die unteren auf die historische Situation ohne den Hafen.

gen mit hoher gesellschaftlicher Relevanz, wie in diesem Beispiel die UNESCO-Welterbestätte Unteruhldingen-Stollenwie-sen, oder bei großräumigen Uferumgestaltungen als Prognose-Tool einzusetzen.

EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Für die Charakterisierung und Bewertung der hydromorphologischen Bedingungen in der Flachwasserzone von Seen sind empirische und modellbasierte Ansätze gleichermaßen von Bedeutung. Diese Ansätze erfordern ein umfangreiches Expertenwissen, sind aber von erheblicher Bedeutung für das zukünftige und nachhaltige Management der Flachwasser- und Uferzonen in Seen.

Folgende Empfehlungen lassen sich für die Praxis ableiten:

- Räumlich und zeitlich detaillierte Untersuchungen zur Charakterisierung der hydrodynamischen Exposition bzw. energetischen Belastung von Flachwasserzonen sollten elementarer Bestandteil einer gesamtheitlichen Betrachtung der Seeufer sein.
- Die Wasserstandsdynamik und vor allem die Uferverbauungen (z. B. Hafenanlagen, Molen und Uferbefestigungen) sind als wichtige Einflussgrößen zu berücksichtigen.
- Zur Erfassung und Beurteilung der Sedimentdynamik bedarf es eines gesamtheitlichen Blicks durch die Kopplung von hydrodynamischen, sedimentologischen und hydromorphologischen Parametern.
- Numerische Modelle sind als Prognose-Tools und Entscheidungshilfen für zukünftige Planungen im Bereich der Seeufer zu etablieren, z. B. bei wasserrechtlichen Planfeststellungsverfahren einschließlich Uferrenaturierungen, der Gefährdungsabschätzung von Unterwasserdenkmälern oder bei Erosionsschutzmaßnahmen und zur Unterstützung langfristiger Managementstrategien.
- Die vorhandenen Modelle sind szenarienbasiert einer Validierung mit detaillierten Messungen (z. B. Wellen, Strömungen und Sedimentdynamik) zu unterziehen, um eine hohe Plausibilität zu gewährleisten.
- Aufgrund der geringen Magnituden der Sedimentdynamik sind neben prozessorientierten Studien (z. B. anlässlich von Starkwindereignissen) Langzeitstudien zur Morphodynamik von Seeuferrn notwendig. Damit können die häufig erst nach Dekaden eintretenden signifikanten Veränderungen von Uferumgestaltungen abgebildet und schließlich bewertet werden

QUELLENVERZEICHNIS

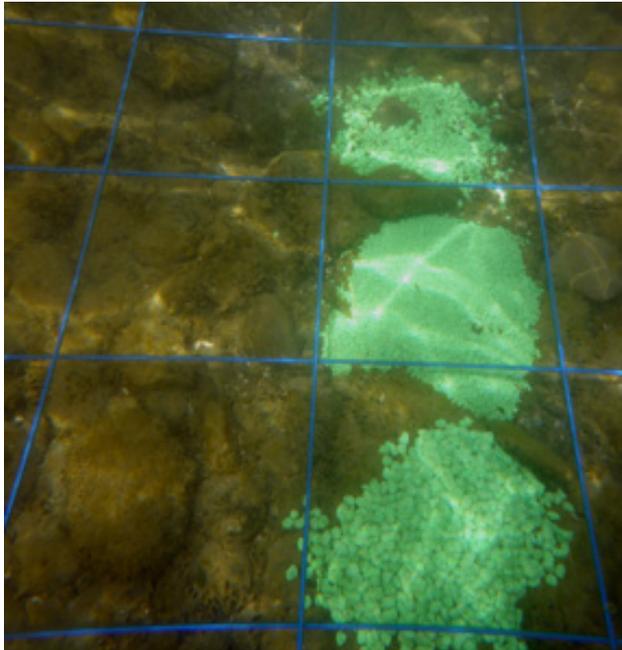
- [1] BARNARD, P. L., SCHOELLHAMER, D. H., JAFFE, B. E. und MCKEE, L. J. (2013): Sediment transport in the San Francisco Bay Coastal System: An overview. – *Marine Geology* 345: 3-17, DOI: 10.1016/j.margeo.2013.04.005.
- [2] BETTERIDGE, K. F. E., THORNE, P. D und COOKE, R. D. (2008): Calibrating multi-frequency acoustic backscatter systems for studying near-bed suspended sediment transport processes. – *Continental Shelf Research* 28: 227-235, DOI: 10.1016/j.csr.2007.07.007.
- [3] BOOIJ, N., RIS, R. C. und HOLTHUIJSEN, L. H. (1999): A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. – *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104 (C4): 7649-7666, DOI: 10.1029/98jc02622.
- [4] BOTTEMA, M. und BEYER, D. (2001): Evaluation of the SWAN wave model for the Dutch IJsselmeer area. – *Proceedings of the 4th International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, S. 580-589.
- [5] CAVALERI, L. (2000): The oceanographic tower Acqua Alta - activity and prediction of sea states at Venice. – *Coastal Engineering* 39 (1): 29-70, DOI: 10.1016/S0378-3839(99)00053-8.
- [6] COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, CERC (2009): Coastal engineering manual: No 1110-2-1100. – U.S. Army Corps of Engineers (Hrsg.). Download unter <<https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>> (zuletzt aufgerufen im Juli 2019).
- [7] DE VRIES, J. J., WALDRON, J. und CUNNINGHAM, V. (2003): Field tests of the new datawell DWR-G GPS wave buoy. – *Sea Technology Magazine* 44 (12): 50-55.
- [8] DEGEL, C. und HOFMANN, H. (2017). Autonome hydrographische Messplattform ‚HydroCrawler‘ System zur Vermessung von Umweltparametern, der Bodentopographie und Sedimentschichtung. – *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 10 (4): 216-220.
- [9] DISSANAYAKE, D., RANASINGHE, R. und ROELVINK, J. A. (2012): The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise. – *Climatic Change* 113 (2): 253-276, DOI: 10.1007/s10584-012-0402-z.
- [10] GANJU, N. K. und SCHOELLHAMER, D. H. (2009): Calibration of an estuarine sediment transport model to sediment fluxes as an intermediate step for simulation of geomorphic evolution. – *Cont. Shelf Res.* 29 (1): 148-158, DOI: 10.1016/j.csr.2007.09.005.
- [11] HASHIMOTO, N. (1997): Analysis of the directional wave spectrum from field data, S. 103-143. – In: LIU, P. L. F. (Hrsg.), *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, Bd. 3. Singapur, DOI: 10.1142/9789812797568_0004
- [12] HASHIMOTO, N., MITSUI, M., GODA, Y., NAGAI, T. und TAKAHASHI, T. (1996): Improvement of submerged Doppler-type directional wave meter and its application to field observations. – *Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE '96)*, Bd. 1: 629-642.
- [13] HAWLEY, N., HARRIS, C. K., LESHT, B. M. und CLITES, A. H. (2009): Sensitivity of a sediment transport model for Lake Michigan. – *Journal of Great Lakes Research* 35 (4): 560-576, DOI: 10.1016/j.jglr.2009.06.004.
- [14] HOFMANN, H. und DISSANAYAKE, P. (2018): Hochaufgelöste, numerische Modellierung von Wellen, Strömungen und dem Sedimenttransport in der Flachwasserzone des Bodensees. – *HyWa – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 62 (6): 387-399, DOI: 10.5675/HyWa_2018,3_2.
- [15] HOFMANN, H., LORKE, A. und PEETERS, F. (2008): The relative importance of wind and ship waves in the littoral zone of a large lake. – *Limnology and Oceanography* 53 (1): 368-380.
- [16] HOFMANN, H., SEIBT, C. und PEETERS, F. (2013): Wellenexposition und Resuspensionspotential ausgewählter Untersuchungsgebiete am Bodensee: Messungen und Modellierung. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 37-51, Bregenz.

- [17] HOLTHUIJSEN, L. H. (2010): *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. – Cambridge University Press.
- [18] HWANG, P. A., WALSH, E. J., KRABILL, W. B., SWIFT, R. N., MANIZADE, S. S., SCOTT, J. F. und EARLE, M. D. (1998): Airborne remote sensing applications to coastal wave research. – *Journal of Geophysical Research: Oceans* 103 (C9): 18791-18800, DOI: 10.1029/98JC00895.
- [19] HWANG, P. A., WANG, D. W., WALSH, E. J., KRABILL, W. B. und SWIFT, R. N. (2000): Airborne measurements of the wavenumber spectra of ocean surface waves. Part II: Directional distribution. – *Journal of Physical Oceanography* 30 (11): 2768-2787, DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<2768:Amotws>2.0.Co;2.
- [20] JEANS, G., PRIMROSE, C., DESCUSSE, N., STRONG B. und V. WEERT, P. (2003): A comparison between directional wave measurements from the RDI workhorse with waves and the Datawell Directional Waverider. – *Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology, 2003*, S. 148-151.
- [21] JIN, K. R. und JI, Z. G. (2004): Case study: Modeling of sediment transport and wind-wave impact in Lake Okeechobee. – *Journal of Hydraulic Engineering* 130 (11): 1055-1067, DOI: 10.1016/(asce)0733-9429(2004)130:11(1055).
- [22] KÖNINGER, J. und WESSELS, M. (2013). Zustandserfassung und Beobachtungen in der Station Unteruhldingen Stollenwiesen. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. – Vorarlberg Museum, S. 247-255, Bregenz.
- [23] LI, M. Z. und AMOS, C. L. (2001): SEDTRANS96: The upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental-shelves. – *Computers and Geosciences* 27 (6): 619-645, DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00120-5.
- [24] LOHRMANN, A., PEDERSEN, T., NYLUND, S. und SIEGEL, E. (2010): *Waves in the summer - ice in the winter*. – *Proceedings of the IEEE/OES/CWTM Tenth Working Conference on Current Measurement Technology*, S. 150-158.
- [25] MERRITT, W. S., LETCHER, R. A. und JAKEMAN, A. J. (2003): A review of erosion and sediment transport models. – *Environmental Modelling & Software* 18 (8-9): 761-799, DOI: 10.1016/s1364-8152(03)00078-1.
- [26] NAGAI, T., OGAWA, H., TERADA, Y., KATO, T. und KUDAKA, M. (2005): GPS buoy application to offshore wave, tsunami and tide observation, S. 1093-1105. – In: SMITH, J. M. (Hrsg.), *Coastal Engineering 2004*. DOI: 10.1142/9789812701916_0087.
- [27] PEDERSEN, T. (2002); *Wave measurements using the PUV method*. – Nortek AS Doc.No. N4000-720, 15 S.
- [28] RAGG, R. (2017): *Messung und Modellierung von Oberflächenwellen und deren Auswirkung auf die Remobilisierung von Sedimenten in der Flachwasserzone des Bodensees*. – Master-Arbeit am Limnologisches Institut der Universität Konstanz, 94 S.
- [29] TELEDYNE RD INSTRUMENTS INC., Hrsg. (2006): *Waves primer: Wave measurements and the RDI ADCP Waves Array Technique*. 30 S. URL <http://www.rdinstruments.com/rdi_library.html>.
- [30] RIS, R. C., HOLTHUIJSEN, L. H. und BOOIJ, N. (1999): A third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification. – *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104 (C4): 7667-7681, DOI: 10.1029/1998jc900123.
- [31] SCHÄTTLER, U. (2009): *A description of the nonhydrostatic regional COSMO-Model Part V. Pre-processing: Initial and boundary data for the COSMO-Model*. – CONSORTIUM FOR SMALL-SCALE MODELLING (Hrsg.), *User's Guide*. Offenbach.
- [32] SEIBT, C., PEETERS, F., GRAF, M., SPRENGER, M. und HOFMANN, H. (2013): Modeling wind waves and wave exposure of nearshore zones in medium-sized lakes. – *Limnology and Oceanography* 58 (1): 23-36, DOI: 10.4319/lo.2013.58.1.0023.
- [33] TEETER, A. M., JOHNSON, B. H., BERGER, C., STELLING, G., SCHEFFNER, N. W., GARCIA, M. H. und PARCHURE, T. M. (2001): Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons). – *Hydrobiologia* 444 (1-3): 1-24, DOI: 10.1023/a:1017524430610.
- [34] WALSH, E. J., HANCOCK III, D. W., HINES, D. E., SWIFT, R. N. und SCOTT, J. F. (1989): An observation of the directional wave spectrum evolution from shoreline to fully developed. – *Journal of Physical Oceanography* 19 (5): 670-690, DOI:10.1175/1520-0485(1989)019<0670:Aootdw>2.0.Co;2.
- [35] WESSELS, M., BRÜCKNER, N., GAIDE, S. und WINTERSTELLER, P. (2017): Tiefenschärfe – die hochauflösende Vermessung des Bodensees. – *Wasserwirtschaft* 107 (4): 30-35.
- [36] THE WAMDI GROUP (1988): *The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model*. – *Journal of Physical Oceanography* 18: 1775-1810.

Kapitel 7

Messtechniken zur Erfassung des Feststoffhaushalts in der Seeuferzone

Wolfgang Ostendorp, Christian Degel, Renate Ebersbach, Helmut Schlichtherle und Hilmar Hofmann ¹



Die Feststoffdynamik (Erosion, Akkumulation) an windexponierten Seeufern wird durch die drei Transportprozesse Suspensions-, Intermediär- und Sohltransport bestimmt. Wir empfehlen die Erfassung aller drei Komponenten:

- Identifikation von Erosion und Akkumulation anhand der Reliefformen (Kliffs, Bermen, Strandwälle) und der Sedimentstratigraphie (Schichtwechsel, Hiaten, Gradierung),
- Erfassung und Monitoring von Erosions- und Akkumulationsraten durch Sohlniveaumessungen (EA-Marker mit lokalem Fixpunkt; stationäre, zeitlich hochaufgelöste hydroakustische Distanzmessung; Multi-Beam-Echolot u. a.),
- Erfassung des Suspensionstransports durch kombinierte Trübe- und Strömungsmessungen,
- Erfassung des Intermediärtransports mittels litoralen Wasserschöpfern und litoralen Sedimentfallen,
- Bestimmung des Sohltransports durch Sohlfrachtsammler und Kiestracer (Magnetkern, FePP-Compound) in Experimenten mit Magnetfallen oder Rasterfeldern.

Dieses Kapitel enthält eine Übersicht der im HyMoBioStrategie-Projekt entwickelten und erprobten Messtechniken zur Erfassung der Feststoffdynamik (Erosion und Akkumulation) in der Flachwasserzone von Seen sowie der Messtechniken zur Erfassung des Suspensionstransports, des Intermediärtransports und des Sohltransports. Die Einsatzmöglichkeiten und die dabei gemachten Erfahrungen werden kurz beschrieben. Am Ende des Kapitels werden Handlungsempfehlungen ausgesprochen, die bei der Durchführung künftiger Messprogramme und eines langfristigen Monitorings hilfreich sein können. Mit ☞ sind Begriffe gekennzeichnet, die im Glossar näher erläutert werden.

FESTSTOFFE DES LITORALEN SEEBODENS

Die Feststoffe des ☞litoralen Seebodens im Bodensee und vergleichbaren Alpenseen bestehen hauptsächlich aus Gesteinstrümmern (Klastika), biogenen Kalkfällungsprodukten (z. B. Kalkkrusten der Armeleuchteralgen und anderer Unterwasserpflanzen), Schalenresten von Schnecken und Muscheln (Schill) sowie aus partikulärer organischer Substanz.

Hinzu kommen wechselnde Anteile rezenter anthropogener Abfallstoffe (Glas, Metallreste, Ziegel- und Betonschutt, Kunststoff- und Verbundmaterialien u. a.) und stellenweise auch die konsolidierten Abfallschichten stein- und bronzezeitlicher Uferdörfer (☞Kulturschichten). Bei gleicher Korngröße weisen die Materialien unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten auf (org. Substanz < Kalkkrusten, Schalenreste < Gesteinstrümmern), so

dass sie in unterschiedlichem Maße durch Wellen resuspendiert und durch Strömungen verfrachtet werden können.

Die sedimentierten Partikel können als einzelne, leicht bewegliche Körner (☞Einzelkorngefüge) oder bei genügendem Feinkornanteil in Form eines mehr oder minder festen, konsolidierten Sediments (☞Kohäsionsgefüge) auftreten. Die oberste Sedimentschicht, zumeist Sande und Kiese in einer Mächtigkeit von wenigen Zentimetern bis mehreren Dezimetern, liegt gewöhnlich im Einzelkorngefüge vor; hochglaziale Geschiebe, spätglaziale Seetone oder holozäne Seekreiden weisen ein Kohäsionsgefüge auf. Sedimente mit Einzelkorngefüge werden wesentlich leichter durch Wellen aufgearbeitet als dies bei konsolidierten, kohäsiven Sedimenten der Fall ist ([8]); so sind die

¹ Wolfgang Ostendorp, Hilmar Hofmann, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umwelphysik, wolfgang.ostendorp@uni-konstanz.de, hilmar.hofmann@uni-konstanz.de; Christian Degel, Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik, Hauptabteilung Ultraschall, christian.degel@ibmt.fraunhofer.de; Renate Ebersbach und Helmut Schlichtherle, Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie, reate.ebersbach@rps.bwl.de, helmut.schlichtherle@rps.bwl.de.

Seetone des Bodensees trotz ihrer feinkörnigen Textur vergleichsweise erosionsstabil. In menschlichen Zeitdimensionen nicht mobilisierbar ist der lokal anstehende felsige Untergrund.

Das Korngrößenspektrum reicht vom Ton (T, $d_n < 2 \mu\text{m}$) über Silt (U, $d_n = 2\text{--}63 \mu\text{m}$), Sand (S, $d_n = 0,063\text{--}2 \text{mm}$) und Kies (G, $d_n = 2\text{--}63 \text{mm}$) bis hin zu Geröllen (X, $d_n = 63\text{--}200 \text{mm}$) und zu Blöcken ($d_n > 200 \text{mm}$). Kiese und Gerölle werden nur in der ufernahen Brandungszone mobilisiert und transportiert, Blöcke (syn. Wacken) werden bisherigen Erfahrungen zufolge am Bodenseeufer nicht bewegt.

FESTSTOFFHAUSHALT

Die Erfassung des litoralen Feststoffhaushalts beinhaltet eine Bilanzierung des Feststoffvolumens in der Flachwasserzone eines vorab festgelegten Uferabschnitts einschließlich aller Feststoff-Einträge (ΣQ_{import}), Feststoff-Austräge (ΣQ_{export}) und der Volumenänderung (ΔV) ([25]):

$$R = \Sigma Q_{\text{import}} - \Sigma Q_{\text{export}} - \Delta V \quad (\text{Gl. 1})$$

Im dynamischen Gleichgewichtszustand ist $R = 0$.

Die wichtigsten **Eintragsgrößen** (Q_{import}) naturbelassener Seeufer sind die Einträge durch

- uferparallelen Transport aus benachbarten Uferabschnitten,
- Zuflüsse in die Flachwasserzone,
- Klifferosion und Hangprozesse (am Bodensee z. B. am Überlingersee),
- biogene Carbonatproduktion (Unterwasserpflanzen, Schnecken, Muscheln),

sowie unter menschlichem Einfluss

- der direkte Eintrag von Siedlungsabfällen durch den Menschen gefolgt von der Bildung prähistorischer und mittelalterlicher Kulturschichten,
- anthropogene Aufschüttungen oder Aufspülungen mit natürlichem mineralischen Material oder Bauschutt zur Uferbefestigung, Landgewinnung oder Uferrenaturierung.

Die wichtigsten **Austragsgrößen** (Q_{export}) sind

- der Austrag durch uferparallelen Transport in benachbarte Uferabschnitte,
- der Austrag über die Halde in das Tiefenbecken (z. B. durch ↻Ripströmungen, durch seewärts gerichteten Transport an Landvorsprüngen und Uferquerbauwerken (vgl. Kapitel 6, S. 60–62) oder durch An- und Ablegemaneöver der Fahrgastschiffahrt [vgl. Kapitel 9, S. 108–111]),
- die Lösung biogener Carbonate und die Fragmentierung und Mineralisation partikulärer organischer Substanzen,
- anthropogene Entnahmen (z. B. Ausbaggerungen von Häfen und Zufahrtsrinnen).

Die genannten Größen sind jedoch nur schwer voneinander zu trennen und zu quantifizieren, so dass häufig nur eine qualitative Beurteilung, z. B. der Auswirkungen menschlicher Eingriffe,

möglich ist. Betrachtungen zum Feststoffhaushalt eines Uferabschnitts beschränken sich daher meist auf die Bilanzgröße ΔV , die zeitabhängige Volumenänderung durch Erosion und Akkumulation, die auch in diesem Kapitel im Vordergrund steht.

IDENTIFIKATION VON EROSION UND AKKUMULATION

Erosion und ihr Gegenstück, die Akkumulation gehören zu einer Gruppe von Prozessen in der Flachwasserzone von Seen, die das Feststoffvolumen über einem vorab ausgewählten Höhenniveau lokal verändern. Weitere **Prozesse** sind

- Setzung (Konsolidierung) junger Sedimente unter Wasserverlust (z. B. Delta-Sedimente, ↻Seekreide-Schichten),
- subklaustrische Hangrutschungen (spontan, durch Erdbeben oder durch menschliche Aktivitäten verursacht),
- Erdkrustenbewegungen (mit lokal unterschiedlichen Hebung- bzw. Senkungsraten).

Diese Prozesse vollziehen sich spontan oder kontinuierlich innerhalb der nacheiszeitlichen Seengeschichte. Bei der Frage, ob an einem Seeufer Erosions- oder Akkumulationsprozesse aufgetreten sind, und welche Ursachen dem zugrunde liegen könnten, müssen auch diese Faktoren in die Betrachtung einbezogen werden.

Bevor über Ursachen nachgedacht werden kann, muss die Sedimenterosion bzw. -akkumulation als solche identifiziert werden. Hierzu bieten sich folgende **Methoden** an:

- die Vermessung und Analyse von Reliefformen,
- die stratigraphische Analyse von Sedimentkernen oder elektromagnetischer Messungen (vgl. Kapitel 4),
- die Zeitreihenanalyse von punktuellen, kontinuierlich gemessenen Niveauänderungen, und
- die Analyse wiederholter, hochaufgelöster, flächiger Vermessungen der Sedimentoberfläche (vgl. Kapitel 5).

Reliefformen

Typische Reliefformen der Erosion sind ↻**Kliffs**, also Steilböschungen im Wasserwechselbereich, die sich durch Welleneinwirkung in ein standfestes Substrat (z. B. Geschiebelehm, Seeton) eingeschnitten haben. Ursprünglich waren kleine Kliffkanten mit Sprunghöhen von wenigen Dezimetern bis etwa 2 Meter am Bodenseeufer weit verbreitet, wurden aber zwischenzeitlich durch Vorschüttungen und Ufermauern abgedeckt oder im Zuge von Erosionssicherungsmaßnahmen („Seehagsanierung“) durch Geröllschüttungen gesichert. Naturbelassene, aktive Kliffs finden sich heute v. a. am Südufer des Überlingersees (Felsufer) und am Südufer des Rheinsees (Untersee) (Abbildung 1).

Reliefformen, die auf Akkumulationsvorgänge hindeuten, sind unterseeische **Dünen** ([1]), wie sie beispielsweise am Neuenbur-

ger-, Bieler- und Genfersee (CH) vorkommen. Auch am nördlichen Bodenseeufer sind sublakustrische Dünen häufig anzutreffen (z. B. auf den HyMoBioStrategie-Untersuchungsflächen Langenargen und Kressbronn), während sie am Südufer und im Überlingersee fehlen oder undeutlicher ausgeprägt sind (Abbildung 2). Einige der Sedimentkörper bleiben offenbar über mehrere Jahre hinweg lagestabil.



Abb. 1:

(a) Geschiebekliff mit Hangrutschungen und Sturzbäumen (Mammern, Bodensee-Untersee, Foto: 25.03.2011), (b) mit einer Stützmauer gesicherte Uferböschung südlich Hornstaad (Bodensee-Untersee, 30.03.2011).

Bei den ufernahen **Bermen**, die während aufländiger Stürme im oberen Brandungsbereich des jeweiligen Wasserstands entstehen, handelt es sich um Sand- oder Kieswälle geringer Höhe, die keilförmig gegen das aufsteigende Relief des Strandes aufgespült werden. Bei höheren Wasserständen können die Bermen eingeebnet werden, oder sie bleiben als Reliktformen erhalten (Strandwälle, s. u.) und werden durch die aufkommende Strandvegetation (Weißes Straußgras, Rohrglanzgras, Schilf, Seggen) stabilisiert. Während des HyMoBioStrategie-Projekts konnten wir die Entwicklung einer Berme auf der Renaturierungsfläche Langenargen verfolgen (Abbildung 3). Sie bildete sich durch Stürme zwischen dem 12. und 14. Juni 2016 mit Windstärke 5 aus West. Die Berme wurde nach wenigen Wochen von der Gemeinde Langenargen eingeebnet und das Treibgut wurde abgeräumt. Durch solche Maßnahmen wird häufig die natürliche Dynamik unterbunden und eine natürliche Entwicklung der Seeufer verhindert.

Spülsäume bestehen im Unterschied zu Bermen überwiegend aus organischem Material, wobei im jahreszeitlichen Wechsel



Abb. 2:

Sublakustrische Dünen (a) am Neuenburger See bei Gampelen/Witzwil, (b) am Bodensee-Obersee bei Wasserburg (Quelle: Google Earth).



Abb. 3:

Entwicklung einer Berme auf der Renaturierungsfläche Langenargen (a) nach einem Sturmereignis (Foto: 28.06.2016), (b) nach Auffüllung und Einplanierung durch den Gemeindedienst (Foto: 24.07.2016).

überwiegend Schneckenschalen, Wasserpflanzenreste oder Astholz und Laub zur Ablagerung gelangen (Abbildung 4). Die Spülsäume werden bei höheren Wasserständen aufgearbeitet

oder zerfallen im Laufe des Winters, so dass ihnen keine dauerhaft reliefverändernde Wirkung zukommt.

Eine dritte Reliefform, die **Strandwälle**, stellen reliktsche Oberflächenformen an flach geneigten Ufern dar, die bei höheren Wasserständen als den heutigen gebildet worden sind ([24]). Sie sind in den ausgedehnten Seeniederungen des Bodensees (Hornspitze und Wollmatinger Ried im Untersee, Eriskircher Ried im Obersee) und anderer Alpenseen erhalten geblieben. Einige von ihnen tragen prähistorische Siedlungsplätze bzw. haben prähistorische Kulturschichten abgedeckt und dadurch zu ihrer Erhaltung beigetragen ([26], [29], [30]).

Die erosiven und akkulativen Oberflächenformen des Bodenseeufer stellen **landschaftsgeschichtliche Zeugen** dar, die in ihrer dynamischen Entwicklung nach Möglichkeit erhalten werden sollten. Die Ausbildung von Kliffkanten oder Bermen allein ist kein Grund, die weitere Dynamik durch wasserbauliche Maßnahmen zu unterbinden. Uferrenaturierungen sollten in weit gefassten Grenzen eine naturnahe dynamische Entwicklung mit höchstens geringfügigen menschlichen Eingriffen ermöglichen (vgl. Kapitel 11). Hierfür sind entsprechende Bauweisen (Relief, Körnung) und Unterhaltungspläne vorzusehen. Auch die Nachnutzungen sollten auf dieses Ziel Rücksicht nehmen.

Sedimentstratigraphie

Der stratigraphische Aufbau der Litoralsedimente kann Hinweise über die Abfolge von erosiven und akkulativen seegeschichtlichen Phasen geben. Geeignete Informationen können je nach Lithologie und geophysikalischen Eigenschaften anhand von Sedimentkernen, archäologischen Schürfen und Grabungen, Unterwassergeoradar (vgl. Kapitel 4) und hydroakustischen Methoden gewonnen werden.

Die Bergung, Auftrennung und lithostratigraphische Analyse von **Sedimentkernen** und die Schürfen sind bezüglich des technischen Aufwandes die einfachste Möglichkeit. Wichtige Merkmale, die für die Interpretation herangezogen werden können, sind:

- das Matrixmaterial des Schichtkörpers sowie die dominierende Korngröße,
- lithologische Wechsel, oft verbunden mit einer Schichtlücke (Hiatus), die durch Erosion ehemaliger Zwischenschichten (kenntlich z. B. am abrupten Wechsel von feinerem Material im Liegenden zu größerem Material im Hangenden) oder durch fehlende Ablagerung zustande gekommen ist,
- gradierte Schichtungen (Akkumulationssequenz).

Im HyMoBioStrategie-Projekt haben Forschungstaucher an 18 Positionen Kurzkerne von etwa 0,3 bis 0,4 m Länge genommen, die Auskunft über die jüngere Erosions- und Akkulationsgeschichte in den gemeinsamen Untersuchungsflächen geben ([11]). Die Abbildung 5a zeigt beispielhaft einen Kern der naturbelassenen Referenzfläche Kirchberg, die Abbildung 5b



Abb. 4:

(a) Spülsaum aus Armeleuchteralgenwatten am Bürglehorn (Insel Reichenau, Bodensee-Untersee, 26.01.2014), (b) Spülsaum aus Dreikantmuschel-Schalen und Schneckenschalen bei Hagnau (Bodensee-Obersee, 18.10.2014).

eine Abfolge in der Kressbronner Bucht. Der Kirchberger Kern weist eine einfache Erosionssequenz auf, bei der würmzeitliche Geschiebe im Liegenden durch Wellenschlag und bodennahe Strömungen aufgearbeitet wurden. Dabei wurde das Feinmaterial suspendiert und abtransportiert, während das Grobmaterial in der nur wenige Zentimeter mächtigen mobilen Sedimentoberschicht angereichert wurde. Zwischen der modernen Sedimentoberschicht und dem unveränderten glazialen Geschiebe liegt eine Schichtlücke von mindestens 17.000 Jahren. Am Kirchberger Ufer liegen demnach zumindest für die jüngere Vergangenheit erosive Verhältnisse vor. Die Abfolge aus der Kressbronner Bucht wird als rezente Umlagerungs- bzw. Akkulationssequenz interpretiert (vgl. Kapitel 6, S. 59-60). Bei Sturmtagen wurden die in der Bucht verbreiteten Fein- und Mittelsande ($d_n = 0,112-0,355$ mm) suspendiert und kamen bei nachlassendem Wellengang zur Ablagerung; dabei sedimentierten zunächst die schweren Sandkörner (hellere Schichten), während sich die leichteren organischen Bestandteile erst später abgelagerten (dunklere Schichten).

Die Analyse einzelner Sedimentkurzkerne hat den Nachteil, dass sie die Verhältnisse nur für einen sehr begrenzten Geländeausschnitt wiederzugeben vermögen. Umfangreiche Bohrnetze oder andere Verfahren sind nötig, um die Schichten zu korrelieren und einen räumlichen Gesamteindruck zu erzeugen

(vgl. Kapitel 4). Eine weitere Schwierigkeit besteht in der absoluten **Datierung** der jüngeren Schichten, für die mehrere Methoden zur Verfügung stehen².

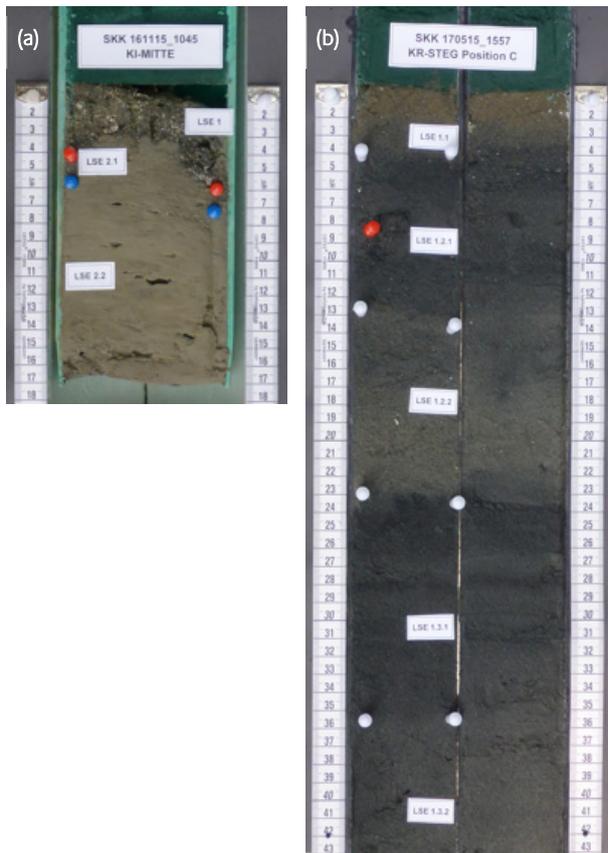


Abb. 5:

(a) Sedimentkern der naturbelassenen Fläche Kirchberg: Unter einer dünnen Lage aus rezenten mobilen Sedimenten lagert würmzeitliche Grundmoräne; die lithostratigraphischen Einheiten (LSE) sind gekennzeichnet. (b) Sedimentkern aus der Kressbronner Bucht: Wechsellagerung aus dunkleren und helleren Sandlagen; am Top die ockerfarbene (oxidierte) moderne Sedimentoberschicht; die weißen Markierungen weisen auf die hauptsächlich lithologischen Wechsel hin, die anhand der Färbung (Eisensulfid-Beläge) wahrnehmbar sind.

Eine weitere Möglichkeit der Analyse von lokalen Erosions- und Akkumulationsvorgängen besteht darin, prähistorische **Kulturschichten** als zumeist flächig ausgebildete und gut datierbare Bezugshorizonte zu verwenden. Wie natürliche Sedimente unterliegen auch Kulturschichten erosiven Prozessen, die die unterschiedlichen Komponenten unterschiedlich stark betreffen. Greift die Ufererosion tiefer, werden zunächst die organischen und sandigen Bestandteile der Kulturschichten ausgeräumt, schließlich werden die Pfahlspitzen freigelegt und ausgeschwemmt oder – in den landwärtigen Abschnitten –

durch Austrocknung und Frostsprengung zerstört. Was dann auf dem Seegrund zurückbleibt, ist eine lockere Streuung von schweren Gesteinsartefakten, die ähnlich wie natürliche Gerölle nur wenig vom Wellengang bewegt werden. Damit liefert der aktuelle Zustand der Kulturschichterhaltung zusammen mit älteren Beschreibungen und dem Fundinventar aus der Entdeckungszeit wichtige Indizien für das lokale Akkumulations- und Erosionsgeschehen der letzten beiden Jahrhunderte.

Gleichzeitig stehen die Kulturschichten einschließlich ihrer Degradationsstadien im Zentrum des Interesses, wenn es um das Erosionsmonitoring und den Schutz der Unterwasserdenkmäler an den Ufern der Alpenseen geht (vgl. Kapitel 11). Allerdings sind Kulturschichten nicht gleichmäßig entlang der Seeufer verteilt, vielmehr treten sie lediglich in siedlungsgünstigen Lagen gehäuft auf und fehlen dafür entlang anderer Uferstrecken.

MESSUNG VON EROSIONS- UND AKKUMULATIONS-RATEN

Die Analyse von Reliefformen und Sedimentstratigraphien kann Informationen darüber liefern, ob in der Vergangenheit Erosion oder Akkumulation stattgefunden hat. Daraus lässt sich jedoch nicht zwingend ableiten, dass diese Prozesse auch gegenwärtig noch von Bedeutung sind. Für einen Nachweis der aktuellen Relevanz bedarf es eines längerfristigen Monitoringprogramms (vgl. auch Kapitel 6).

Erosion und Akkumulation äußern sich in einer Veränderung des Sedimentvolumens oberhalb eines vorab festgelegten Bezugsniveaus (vgl. S. 68). Bezogen auf einen einzelnen Messort ist dies gleichbedeutend mit einer **Veränderung Δz** des Sohlniveaus. Unsere Erfahrungen haben gezeigt, dass die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahren gemessenen Δz -Werte zumeist im Bereich von etwa ± 30 mm liegen (vgl. Abbildung 8), so dass der Messfehler ± 5 mm nicht überschritten werden sollte, um die Magnitude der Änderung abbilden zu können.

Festlegung des Sohlniveaus

Die **Gewässersohle** ist die Grenzfläche zwischen dem freien Wasserkörper (einschließlich etwaig vorhandener Unterwasserpflanzenrasen) und dem Sohlsubstrat. Bei Vorliegen eines sandigen oder feinkiesigen Substrats bereitet die Festlegung der lokalen Grenzfläche zumeist keine Schwierigkeiten. In anderen Fällen können jedoch Probleme auftreten, die im Rahmen der geforderten Messgenauigkeit (s. o.) von Bedeutung sind:

² Für die Datierung junger Schichten stehen neozoische Mollusken (*Viviparus ater* ab 1956, *Dreissena polymorpha* ab ca. 1968, *Potamopyrgus antipodarum* ab 1972, *Physella acuta* ab ca. 1982, *Gyraulus parvus* ab ca. 1995, *Corbicula fluminea* ab 2003 im Bodensee; vgl.

<http://www.neozoen-bodensee.de> zur Verfügung. Subrezente ufernahe Ablagerungen des 19. und 20. Jahrhunderts enthalten Glas, glasierte Keramik, Ziegel- und Mörtel-Bruchstücke u. a., die leicht zu identifizieren sind. Ihr Auftreten liefert einen *terminus post quem*.

- bei Vorliegen siltig-feinsandiger Sedimente, eventuell mit einem hohen Gehalt an feinputikulärer organischer Substanz: hier kann sich die Übergangszone zwischen freiem Wasser und konsolidiertem, wasserarmem Sediment auf eine vertikale Distanz von mehreren Zentimetern erstrecken (Beispiele: Sedimente in Röhrichten, lokale Schlamm-Auflandungen in Fließgewässer-Deltas oder im Umfeld von Uferquerbauwerken);
- bei oberflächlicher Bedeckung mit Spülsaumaterial, Ästen, Laub oder Mollusken, also mit Materialien, die sichtlich nicht zum eigentlichen Sediment gehören;
- bei kleinräumig unebenem Substrat mit (i) Strömungsrippele oder (ii) mit hervorstehende Grobkiesen und Geröllen und sandigen Zwischenflächen.

Wir empfehlen eine pragmatische und dennoch reproduzierbare Vorgehensweise, bei der (i) Materialien, die nicht zum Sedimentkörper gehören, unberücksichtigt bleiben, und (ii) die Sedimentoberfläche durch den mechanischen Eindringwiderstand definiert wird (hierzu vgl. Abbildung 7).

Messverfahren

Für die Niveau-Messung der Gewässersohle steht eine Vielzahl von bekannten Messtechniken zur Verfügung, von denen einige im HyMoBioStrategie-Projekt erprobt und weiterentwickelt wurden (Tabelle 1).

Die Verfahren haben ihre spezifischen **Einsatzbedingungen** und **Vor- und Nachteile**. Einige haben ihren Anwendungsschwerpunkt im landfesten Bereich (Zeile 6, Tabelle 1) andere können auch am überschwemmten Ufer bis ca. 1,5 m Wassertiefe (1, 2) oder in noch größeren Wassertiefen (3, 4, 5) angewandt werden. Am Bodensee mit seinen periodischen Wasserstandsschwankungen kann der Anwendungsbereich erweitert werden, wenn bei sommerlichem Hochwasser bzw. bei winterlichem Niedrigwasserspiegel gemessen wird. Andere Verfahren erfordern eine beträchtliche Wasserbedeckung (1, 5), sind dafür aber auch in größeren Wassertiefen einsetzbar.

Der technische bzw. Sachkosten-Aufwand ist unterschiedlich. Zu den technisch sehr einfachen und betriebssicheren Verfahren gehören (Zeile 1, Tabelle 1) und (3), wobei allerdings der Nachteil einer geringen Höhen- und Lagegenauigkeit (1) bzw. eines erhöhten Personalaufwands (3) in Kauf genommen werden muss. Bei (2), (5) und (6) handelt es sich um marktgängige Messgeräte, für die Leasing-Angebote oder Dienstleistungen von Fachfirmen bereitstehen. Hingegen ist (4) ein Messgerät, das nach Bedarf produziert und durch die Firma NKE (Hennebont, Frankreich) vertrieben wird.

Einige der Messverfahren beschränken sich auf Einzelpositionsmessungen (1, 2, 3, 4), wobei allerdings je nach Einsatzbedingungen mehrere Hundert Messungen pro Tag möglich sind (1, 2, 3). Die meisten Verfahren eignen sich für Wiederholungsmessungen, sofern es gelingt, die vorangegangene Messposition mit guter Lagegenauigkeit (<0,5 m) wieder aufzusuchen.

Im unübersichtlichen Ufer- und Flachwasserbereich ist dies oft nur mit einem beträchtlichen Zeitaufwand möglich. Hierbei helfen Vermarkungen (Pflöcke o. ä. mit Schwimmseilen), die beim Verfahren (3) ohnehin vorgesehen sind.

Messgeräte des Verfahrens (4) können für mehrere Wochen oder Monate an einem Ort verbleiben und liefern zeitlich hochaufgelöste Messdaten, so dass die Dynamik der Sedimentsohle, z. B. wandernde Strömungsrippele oder unterseeische Dünen vermessen werden können (vgl. Kapitel 6, Abbildung 13). Zudem besitzt das Verfahren mit etwa 1 mm die höchste vertikale Auflösung. Unter Feldbedingungen liegt die Messgenauigkeit bei < 5 mm – je nach Dichte, Packung und Korngröße der Partikel an der Gewässersohle. Die Kombination aus hoher vertikaler und zeitlicher Auslösung ermöglicht die Erfassung der Sohldynamik und damit die Möglichkeit, die Transportprozesse während und nach dem Sedimentnettotransport als Resultat eines Sturmereignisses zu erfassen. Für mehrjährige Messungen, z. B. Erosionsmonitoring in Pfahlbau-Stationen sind aber die Verfahren (1) bis (3) aufgrund der robusten Ausführung oder die flächige Vermessung mit einem entsprechend ausgestatteten ‚Hydrocrawler‘ (vgl. Kapitel 5) besser geeignet. Mit dem Verfahren (3), bei dem Forschungstaucher unter Sichtkontrolle und mit einer Unterwasser-Messhilfe arbeiten, können Genauigkeiten um ± 5 mm erzielt werden.

Anwendung von EA-Markern mit lokalen Fixpunkten

Die bisherigen taucharchäologischen Beobachtungen und unsere eigenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich Erosionsprozesse in der Flachwasserzone des Bodensee mit einer eher geringen Netto-Rate (<30 mm a⁻¹) vollziehen ([10]), dafür aber über längere Zeiträume (>10 Jahre) verlaufen (vgl. Kapitel 10).

Als Messverfahren haben wir die **Distanzmessung** mit lokalem Fixpunkt (Verfahren (3) in Tabelle 1) gewählt, die eine gute vertikale Messgenauigkeit liefert. Die bautechnischen Einzelheiten und die Auswertungsoptionen sind auf ein langfristiges Monitoring (>10 Jahre) ausgerichtet. Im bisherigen Beobachtungszeitraum vom Frühjahr 2016 bis zum Herbst 2018 haben sich folgende **Vorgehensweisen** bewährt ([10]):

- Die Verwendung von unten zugespitzten Eiche-Vierkantpflöcken von rd. 1 m Länge mit ebener Oberkante, die etwa 0,8 m tief in das Sediment eingeschlagen werden. Bei Geschiebe-Untergrund werden Torstahlstangen mit $d = 12$ mm verwendet, die oben umgebogen sind, um eine Verletzung bzw. Beschädigung (Badegäste, leichte Boote) auszuschließen. Die jeweilige Oberkante ist der unveränderliche Höhenfestpunkt.
- Die genaue lage- und höhenmäßige Einmessung der Pflöcke sowie eine seitliche Markierung mit einer Schwimmleine, um die Wiederfindung durch Forschungstaucher zu erleichtern.

Tab. 1:

Messtechniken zur Niveau-Bestimmung der Gewässersohle im Uferbereich des Bodensees.

	Bezeichnung	Messprinzip	Bezugshorizont	Präzision unter Freilandbedingungen	Vorteile	Nachteile	Anwendung und Weiterentwicklung im HyMoBioStrategie-Projekt
1	Distanzmessung zum Ruhewasserspiegel	Messung der Distanz zwischen Wasserspiegel und Gewässersohle mittels Messlatte oder Meterstab; Positionsmessung mit konventionellem GPS	tagesaktuelle Pegel-Ablesung	vertikal: ca. ± 30 mm horizontal: ca. ± 3 m	watend oder vom Boot aus durchführbar (1 Person)	Präzision stark vom Wellengang abhängig; nur bei windstillem Wetter und Wassertiefen bis etwa 3 m sinnvoll; geringe Lagegenauigkeit	Dämpfungsrohr mit Skala zur verbesserten Bestimmung des Ruhewasserspiegels bei Wellengang
2	Niveaumessung mit RTK (Real Time Kinematic)-GPS	Positionsmessung mit satellitengestützten Navigationssystemen (GPS u. a.) unter Verwendung eines Netzes von permanenten Referenzstationen, das Korrektursignale übermittelt	Messwerte umgerechnet auf DHHN 1992	vertikal: ca. ± 30 mm horizontal: ca. ± 20 mm	über dem Wasserspiegel oder watend durchführbar (1 Person); geeignet für Wiederholungsmessungen	nur bis etwa 1,5 m Wassertiefe durchführbar	Anwendung ohne Weiterentwicklung
3	Distanzmessung zu einem lokalen Fixpunkt („EA-Marker“)	Distanzmessung zwischen der Oberkante eines Pflocks o. ä. und der benachbarten Gewässersohle mittels Meterstab oder einer Messhilfe	unveränderliche Oberkante eines tief eingeschlagenen Pflocks o. ä.	vertikal: ca. ± 5 mm horizontal: ca. $\pm 0,1$ m	Sichtprüfung der Substratoberfläche möglich; präzise Auswahl des Messortes und Mehrfachmessungen möglich	unter Wasser: Durchführung mittels Forschungstauchern (2 Personen); zeitaufwändig und kostenintensiv	Unterwasser-Messhilfe zur Verbesserung der Ablesegenauigkeit
4	stationäre hydroakustische Distanzmessung (Punktmessung)	akustische Distanzmessung zwischen dem Sensorkopf (Schwinger) und der Sedimentoberfläche; die Messung erfolgt durch die Wassersäule mit einem Abstand zur Gewässersohle von 0,2–0,7 m (variabel)	relatives Niveau der detektierten Sedimentoberfläche am Beginn der Messung	vertikal: $< \pm 5$ mm horizontal: ca. $\pm 0,05$ m	sehr präzise Abstandsmessung (± 1 mm); hohe zeitliche Auflösung, z. B. alle 10 s). Erfassung der zeitlichen Dynamik, z. B. Messung der Wanderung von Strömungsrippeln	Positionierung nur mittels Forschungstaucher möglich; sehr genaue Ausrichtung des Sensors notwendig; hohe Anschaffungskosten (ca. 10.000 € pro Gerät)	Praxistest und Etablierung der Messmethode; erste Langzeitmessungen in verschiedenen Untersuchungsgebieten
5	Echolot-Messfahrten (Einstrahl-Verfahren, Fächerecholot)	Laufzeitmessung zwischen ausgesendetem und empfangenen Schallsignal eines am Boot unter der Wasseroberfläche montierten Schwingers	tagesaktueller Wasserspiegel (Pegel-Ablesung) oder RTK-GPS-Messwert	abhängig von der Temperatur des Wasserkörpers, Frequenz, verwendeten Geräten u. a.	hohe Samplingraten (bis 30 Hz), üblicherweise linien- bzw. flächenhafte Messungen	technisch aufwändig, schwierig in sehr flachen Wasser; aufwändige Auswertesoftware; Kompensation der Schiffsbewegungen (Rollen, Stampfen, Tauchen) erforderlich	nicht angewendet/weiterentwickelt
6	ALS (airborne laser scanning)/LiDAR (light detection and ranging)	Laufzeitmessung zwischen ausgesendetem und empfangenen Lichtsignal (Laser-Impulse) eines stationären oder mobilen Messgeräts (Flugzeug, ALS)	konstante oder variable Höhe des Messgeräts (RTK-GPS)	vertikal: ca. $\pm 0,1$ m horizontal: ca. $\pm 0,2$ bis ± 1 m	hohe Samplingraten (bis MHz-Bereich); üblicherweise linien- bzw. flächenhafte Messungen	aufwändig und kostenintensiv; bei trübem Wasser reduzierte vertikale Genauigkeit und Messtiefe; dichter Makrophytenbewuchs verhindert die genaue Detektion der Sedimentoberfläche	nicht angewendet/weiterentwickelt

- Die Anlage von Gruppen aus vier EA-Markern in einem Quadrat aus 5 m Seitenlänge; die Messergebnisse stützen sich gegenseitig, so dass zweifelhafte Ablesungen identifiziert werden können.
- Die Verbesserung der Ablesegenauigkeit durch Benutzung einer Unterwasser-Messhilfe, die es erlaubt, mehrere Distanzmessungen im Umkreis von etwa 0,3 m um den EA-Marker herum durchzuführen (Abbildung 7). Die Messwerte können insbesondere bei kleinräumig unebenem Substrat zu Mittelwerten zusammengezogen werden.
- Die Verwendung von Kragen aus feuerverzinkten Eisenplatten, die über die EA-Marker geschoben und auf der Sedimentoberfläche abgelegt werden, um die langfristige *maximale* Erosionstiefe zu ermitteln (Abbildung 6).
- Die genaue Instruktion der Forschungstaucher sowie ein vorgefertigtes Unterwasser-Protokollformular mit Angaben zur Lage und zum Aussehen der EA-Marker, um Verwechslungen mit anderen Unterwasser-Markierungen auszuschließen.

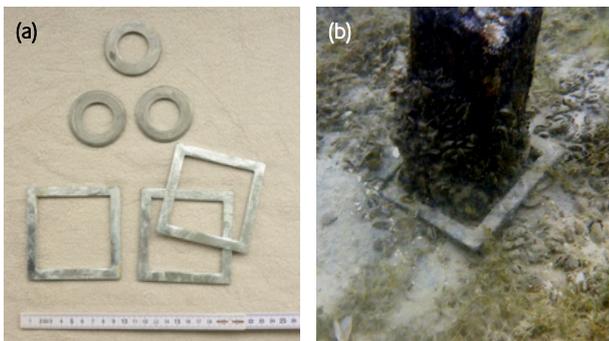


Abb. 6:
(a) verschiedene Arten von Eisenkragen für Torstahlstangen (oben) und Eiche-Vierkantpflocke (unten). (b) Metallkragen um einen Eiche-Vierkantpflock in der Station Unteruhldingen (Foto 13.11.2018).

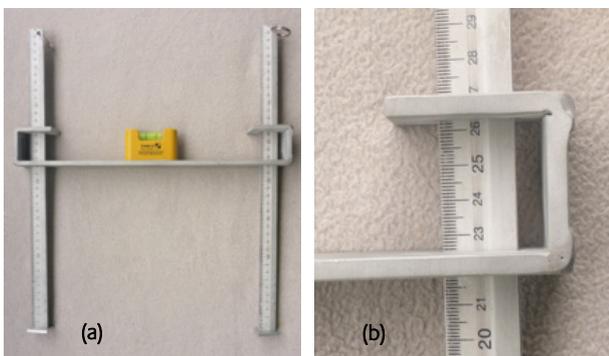


Abb. 7:
Unterwasser-Messhilfe: (a) Gesamtansicht, mit Wasserwaage und kleinen Fußplatten, die ein kontrolliertes Absinken in die weichen Oberflächensedimente gewährleisten. (b) Detailansicht: die Alu-Schienen ermöglichen ein parallaxefreies Ablesen der Skala.

Die Stammdaten und die Messergebnisse aufeinanderfolgender Monitoringperioden sollten in einer **Datenbank** organisiert werden, um durch gezielte Abfragen bestimmte Auswertungen zu erleichtern. Hierzu wurde bereits ein Datenmodell entwickelt.

Eine ähnliche Vorgehensweise wird seit etwa 2010 vom Landesamt für Denkmalpflege an 42 Unterwasserdenkmalstationen verfolgt ([7]). Die im HyMoBioStrategie-Projekt gewonnenen Erfahrungen und technischen Weiterentwicklungen werden zukünftig in das Monitoring von Unterwasserdenkmälern integriert.

Die Abbildung 8 stellt die vereinigten **Distanz-Differenzen** aller Messorte und aller bisherigen Monitoringperioden dar (Stand Nov. 2018). In 19,2 % aller Fälle (100 % - 250 Messungen) war der Differenzbetrag Null, in weiteren 32,8 % lagen die Differenzen zwischen -0,01 m (Erosion) bzw. +0,01 m (Akkumulation), d. h. im Bereich des Messfehlers. Somit wiesen 52,0 % aller Ablesungen keine signifikante Erosion oder Akkumulation auf. 18,8 % der Messungen zeigten deutlich negative Differenzen ($> -0,09$ m bis $< -0,02$ m), während in 20,4 % der Fälle die Differenz positiv ($> 0,02$ m bis 0,14 m) war. Es kamen demnach sowohl Erosions- als auch Akkumulationsprozesse zum Tragen, wobei sich beide etwa die Waage hielten. Nur bei 4,8 % der Messungen ergaben sich **Sohlerniedrigungen** von mehr als 0,06 m und in 3,6 % aller Messungen waren die **Sohlerhöhungen** größer als 0,06 m.

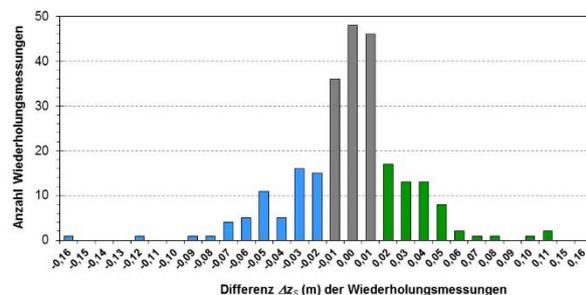


Abb. 8:
Häufigkeitsverteilung der Sohldifferenzen Δz_2 zwischen zwei aufeinanderfolgender Ablesungen (Monitoring-Periode); vereinigte Datensätze aller Lokalitäten und Monitoring-Perioden ($n = 250$, Stand Nov. 2018). Die stark fehlerbehafteten Messwerte zwischen -0,01 und 0,01 m sind grau dargestellt, Sohlerniedrigungen (Erosion) blau und Sohlerrhöhungen (Akkumulation) grün.

Anwendung des hydroakustischen Erosionsmarkers

Mit hochauflösenden hydroakustischen Erosionsmarkern wurde an verschiedenen Messstellen die zeitliche Dynamik des Niveaus der Sedimentoberfläche als Maß für die Erosion und Akkumulation gemessen. Im Untersuchungsgebiet Kressbronn am nördlichen Bodensee-Ufer wurden zwei ufernahe, ca. 100 m

uferparallel voneinander entfernte (3A und 3B in Abbildung 9A) und ein uferferner (5A) Erosionsmarker installiert. Die ufernahen Messgeräte lagen ca. 40 m von der Uferlinie entfernt in etwa 1,5 m mittlerer Wassertiefe, das andere Gerät befand sich ca. 100 m vor der Uferlinie in 2,5 m Tiefe.

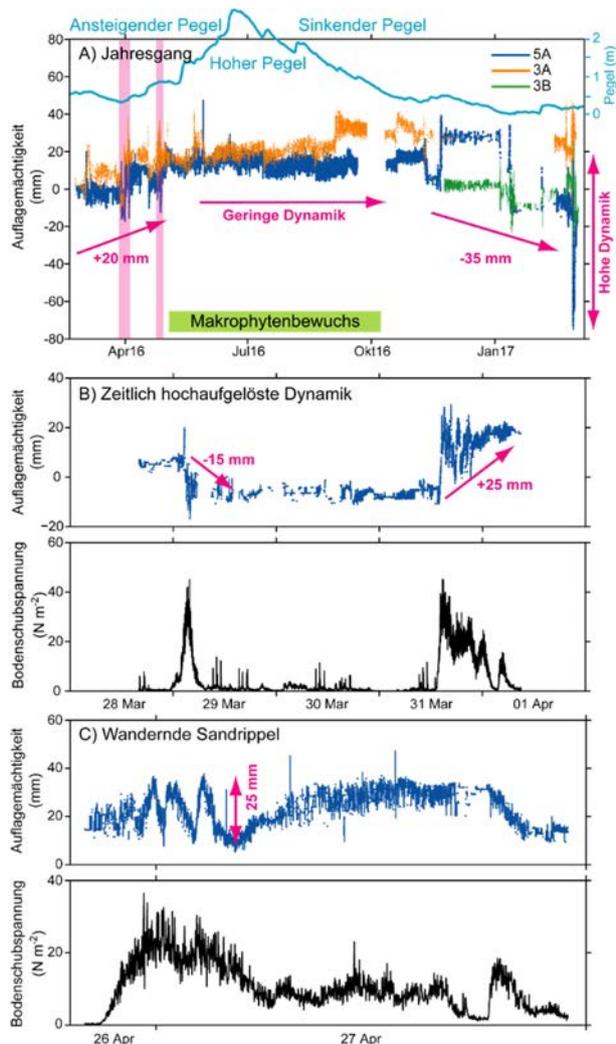


Abb. 9:

Zeitlich hochaufgelöste Messung der vertikalen Änderungen der Sedimentoberfläche in der Flachwasserzone des Bodensees, Kressbronner Bucht, zwischen Februar 2016 und März 2017 und der Wasserstandsänderung gemessen am Pegel Konstanz (A). B) Zeitlich aufgelöste Änderung der Sedimenthöhen und der welleninduzierten Bodenschubspannung während zweier Starkwindereignisse zwischen dem 28.3. und 1.4.2016 (linker magentafarbener Balken in A). C) Dynamik und Magnitude wandernder Strömungsrippel während eines Starkwindereignisses zwischen dem 26. und 27.4.2016 (rechter magentafarbener Balken in A).

Die vertikale Änderung der Sedimentoberfläche an den Messstellen über mehr als ein Jahr hinweg zeigt, dass die mittlere Profiltzu- oder -abnahme mit -14 mm (5A) und +29 mm (3A) relativ gering, aber räumlich variabel war (Abbildung 9 A). Den-

noch wurde über kurze Zeiträume (im Zuge von Starkwindereignissen) eine hohe **zeitliche Dynamik** von bis zu ± 100 mm beobachtet (Abbildung 9). In der Untersuchungsperiode zeigte sich zudem ein **saisonales Muster** (Abbildung 9 A): Akkumulation im Frühjahr und Frühsommer, relativ wenig Veränderung bis in den September und Erosion im Herbst und Winter bei niedrigen Wasserständen. Dieses Muster verdeutlicht den großen Einfluss der saisonalen **Wasserspiegelschwankungen** und des Makrophytenbewuchses im Zusammenspiel mit Starkwindereignissen auf die Sedimentdynamik in der Flachwasserzone von Seen. Bei steigendem Wasserspiegel im Frühjahr bis Frühsommer wird im Mittel Sediment in der Flachwasserzone angelagert. Im Sommer, bei hohem Wasserstand, wenn die gesamte Sedimentoberfläche mit Makrophyten bewachsen ist, können die auftretenden Windereignisse kaum Oberflächensedimente mobilisieren bzw. umlagern. Der Sedimenttransport ist großflächig unterbunden, was an der fast konstanten Sedimentauflagemächtigkeit an den Messstellen 5A und 3A sichtbar ist (Abbildung 9 A). Bei fallendem Wasserstand und sukzessive absterbenden Makrophyten nimmt die Sedimentdynamik, im flachen Wasser beginnend, wieder zu und die Sedimentoberfläche erodiert (im Beispieljahr ca. 35 mm, Abbildung 9 A). Schon einzelne Starkwindereignisse können zu einer Nettoänderung der Sedimenthöhe von 10 bis 30 mm führen. Kurz aufeinanderfolgende Starkwindereignisse gleicher Magnitude (Bodenschubspannung, Abbildung 9 B) können deshalb lokal sowohl zu Erosion als auch zur Akkumulation von Sedimenten führen. Prinzipiell gilt, dass bei niedrigem Wasserstand im Winterhalbjahr die Umlagerungsdynamik am größten ist. Archäologische Fundstellen, die der **Erosion** unterliegen, sind deswegen besonders im **Winterhalbjahr** gefährdet (vgl. Kapitel 10).

Mit dem hydroakustischen Erosionsmarker lässt sich nicht nur die vertikale Änderung der Sedimentoberfläche im Zuge eines Starkwindereignisses messen, sondern auch die Dynamik während eines Ereignisses. Bei sandiger Sedimentauflage und hohen Strömungsgeschwindigkeiten kann die Dynamik und Magnitude wandernder **Strömungsrippel** (Sandrippel) beobachtet werden (Abbildung 9 C). Die typischen Strömungsrippel am Bodensee haben Höhen von 1-3 cm und eine Periodizität von 50-70 Minuten, d. h. die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Rippeln. Je höher die bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten, desto höher und schneller sind die wandernden Rippel.

ERFASSUNG VON TRANSPORT- UND UMLAGERUNGSPROZESSEN

Wenn die einlaufenden Oberflächenwellen Grundberührung haben (d. h. ab einer Wassertiefe, die der halben Wellenlänge entspricht) oder wenn die Brecher auf den Strand treffen, werden durch die wirksam werdenden Scherkräfte Feststoffe aus dem oberflächennahen, mobilen Sediment herausgelöst und transportiert (vgl. Kapitel 6). Grobe und schwere Körner bewegen sich rollend oder hüpfend an der Gewässersohle (↳Sohl-

transport). Feine Partikel werden in die Wassersäule aufgenommen und mit dem Wasserkörper transportiert (↻Suspensions-transport); erst bei nachlassender Wellenbewegung werden sie wieder abgelagert. Zwischen diesen beiden Transportformen vermittelt der ↻Intermediärtransport, bei dem sich die Partikel zwar kurzzeitig aus dem Substrat lösen, aber aufgrund ihrer großen Sinkgeschwindigkeit alsbald wieder absinken, um eventuell erneut remobilisiert zu werden.

Suspensionstransport

Die durch Oberflächenwellen induzierten bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten führen zur Resuspension (Remobilisierung) von Sedimentpartikeln (Abbildung 10). Die in der Wassersäule suspendierten Partikel können sowohl mit optischen (optische Rückstreustärke - Trübung) als auch akustischen Sensoren (akustische Rückstreustärke) zeitlich hochaufgelöst über lange Zeiträume gemessen werden. Für die Messung der **optischen Rückstreustärke** wurde ein autonomer Trübelogger, ausgestattet mit einem Trübesensor (Turbidity Meter, Fa. Seapoint Sensors, Exeter, USA), Wischer und Datenlogger mit interner Batterie, verwendet. Die akustische Rückstreustärke wurde mit einem Strömungsmesser (Vector, Fa. Nortek, Rud, Norwegen) gemessen ([5]). Aus der optischen und akustischen Rückstreustärke kann durch Kalibrierung mit Wasserproben die Konzentration suspendierter Partikel abgeleitet werden (Abbildung 10; [5]). Dies ist die Grundlage, um zum einen die Dynamik der Partikelresuspension in Relation zu den Eigenschaften und Magnituden der Oberflächenwellen und der welleninduzierten Strömungsgeschwindigkeit und zum anderen die des Suspensionstransports unter Verwendung der gemessenen Hintergrundströmung zu bestimmen.

Muster und Dynamik der **Resuspension** entsprechen den Eigenschaften Wellenhöhe, -periode und -länge des Wellenfelds und sind stark von der Wassertiefe abhängig ([5], [6]). Bei gleichbleibenden Welleneigenschaften nimmt die bodennahe Strömungsgeschwindigkeit mit abnehmender Wassertiefe stark zu. Bei größeren bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten können nicht nur mehr, sondern auch größere Partikel resuspendiert werden. Die Zeitreihen der bodennahen Strömungsgeschwindigkeit $U_{max,ADV}$ und der Partikelkonzentration in Abbildung 10 spiegeln typische Muster und die Dynamik von schiffswelleninduzierter (Abbildung 10 A, B, C) und windwelleninduzierter Resuspension (Abbildung 10 C, D, E) wider. Jedes vorbeifahrende Schiff führt zur Resuspension von Partikeln in der Flachwasserzone, wobei die kurzfristig erhöhten bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten zu einem Peak in der Partikelkonzentration führen. Ist die zeitliche Abfolge der einzelnen Peaks hoch, werden immer mehr Partikel resuspendiert und die Partikelkonzentration steigt. Am Abend und in der Nacht, wenn kaum noch Schiffswellen in die Flachwasserzone einlaufen, sedimentieren die Partikel wieder ab. Die schiffswelleninduzierte Resuspension kreiert dadurch einen Tag-Nacht-Zyklus der Parti-

kelkonzentration, gekennzeichnet durch hohe Konzentrationen am Tag und niedrige in der Nacht. Signifikante windwelleninduzierte Resuspension tritt nur sporadisch, aber über einige Stunden auf, ebenso wie die Starkwindereignisse selbst (Abbildung 10 D, E, F). Langanhaltende, hohe U_{max} -Werte führen zu sehr hohen Partikelkonzentrationen, wobei die suspendierten Partikel über mehrere Stunden in der Wassersäule gehalten und durch meist uferparallele oder zum Teil ufernormale Strömungen transportiert werden. Windwellen sind deswegen in der Lage, nicht nur mehr Partikel, sondern diese auch über größere Entfernungen zu transportieren als Schiffswellen.

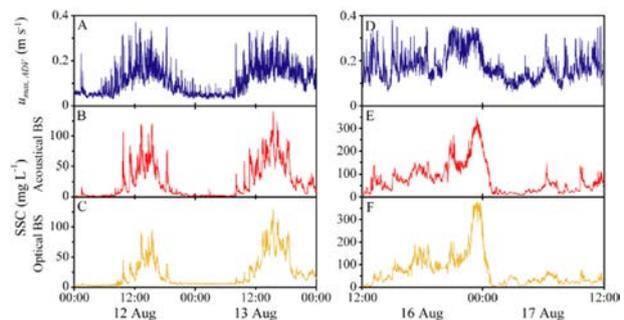


Abb. 10:

Schiffs- und windwelleninduzierte Resuspension von Partikeln. Zeitreihen der (A) maximalen, bodennahen Strömungsgeschwindigkeit ($U_{max,ADV}$), (B) Konzentration suspendierter Partikel (SSC) nach Kalibrierung der akustischen Rückstreustärke und (C) Konzentration suspendierter Partikel (SSC) nach Kalibrierung der optischen Rückstreustärke (Trübung) während einer durch Schiffswellen dominierten Periode und (D), (E), und (F) während eines durch Windwellen dominierten Starkwindereignisses (nach [5]).

Der Suspensionstransport bzw. die **Transportrate** kann aus der Konzentration der suspendierten Partikel (SSC in $g\ m^{-3}$), der Hintergrundströmung (u in $m\ s^{-1}$), mit der die suspendierten Partikel in eine bestimmte Richtung – meist uferparallel – transportiert werden, und der durchströmten Querschnittsfläche (A in m^2) der Flachwasserzone bestimmt werden (Gl. 2).

$$SST = SSC \times u \times A \tag{Gl. 2}$$

Die potentielle Transportrate der suspendierten Partikel (SST) für eine windwellen- (SST_{Wind}) und eine schiffswellendominierte (SST_{Schiff}) Periode lässt sich am Beispiel von Messwerten aus dem Bodensee abschätzen. Die Mittelwerte für SSC und u in der Flachwasserzone während einer schiffswellendominierten Periode und während eines Sturmereignisses betragen typischerweise 50 bzw. 150 $g\ m^{-3}$ (Abbildung 10 B, C, E, F) und 0,02 bzw. 0,1 $m\ s^{-1}$. Die durchströmte Querschnittsfläche A der Flachwasserzone wird mit 50 m^2 (mittlere ufernormale Ausdehnung 50 m bei einer mittleren Wassertiefe von 1 m) an-

genommen. Daraus ergibt sich $SST_{Wind} = 750 \text{ g s}^{-1}$ und $SST_{Schiff} = 50 \text{ g s}^{-1}$, d. h. während eines Sturmereignisses ist die Fracht an suspendierten Partikeln 15-mal größer als am Tag während einer schiffswellen-dominierten Periode.

Intermediärtransport

Zur Charakterisierung des Intermediärtransports wurden zwei Messeinrichtungen konstruiert und eingesetzt, ein handbetriebener litoraler Wassers schöpfer und litorale Sedimentfallen.

Ein typischer Anwendungsbereich des **litoralen Wassers schöpfers** ist die simultane Beprobung der bodennahen Wasserschichten, um die Abnahme des Feststoffgehalts mit zunehmender Distanz von der Gewässersohle erfassen zu können. Im marinen Bereich wurde eine Vielzahl von Apparaturen entwickelt, die zumeist mit Unterdruck oder mit Pumpen arbeiten und dabei über speziell konstruierte Einsaugöffnungen eine definierte Wasserschicht entnehmen (Übersicht in [2], S. 194 - 221). Insgesamt handelt es sich um technisch sehr aufwändige und teure Einrichtungen, die stationär, z. B. auf Plattformen oder an Stegköpfen montiert, betrieben werden. Für Messserien an wechselnden Uferabschnitten des Bodensees kommt diese Technologie daher nicht in Betracht. Überdies haben Laborexperimente gezeigt, dass die Sauggeschwindigkeit und die Geometrie der Einsaugöffnung einen erheblichen Einfluss auf die Korngrößenverteilung in der Wasserprobe im Vergleich zur tatsächlichen Korngrößenverteilung in der umgebenden Wassersäule haben.

Wir haben einen handbetriebenen Wassers schöpfer sowie eine Auslaufvorrichtung konstruiert, die diese Nachteile vermeidet ([17]). Er besteht aus einem gekammerten Kunststoffkasten, der auf den Gewässergrund aufgesetzt wird, so dass das Seewasser frei durchströmen kann (Abbildung 11). Daraufhin werden zwei Schieber herabgedrückt, die die Wasservolumina ohne weitere Störung einschließen. Der Kasten wird an Bord gehievt oder ans Ufer gebracht und kann dabei schichtweise entleert werden. Der Trübstoffgehalt der Wasservolumina kann im Labor z. B. mit einem Trübesensor analysiert werden, wie er auch für die Kalibration der Suspensionsfracht eingesetzt wird (vgl. S. 75–76).

Eine kontinuierliche Messung ist mit dem Gerät allerdings nicht möglich. Die Einsatzmöglichkeiten werden weiterhin durch Sicherheitsaspekte begrenzt, d. h. bei zu starkem Wellengang und Wassertiefen von mehr als ca. 1,5 m kann nicht mehr von Hand gearbeitet werden. Hierzu wären weitere konstruktive Anpassungen nötig.

Die **litoralen Sedimentfallen** bestehen aus klaren Acrylglas-Röhren von 34 mm Innendurchmesser und 0,40 bzw. 0,60 m Länge ([12]). Sie entsprechen damit dem von BLOESCH und BURNS ([3]) favorisierten und auch im Bodensee-Pelagial eingesetzten Fallentyp. Die Röhren wurden im Substrat versenkt, so

dass die Öffnungen wahlweise 5 cm oder 25 cm über die Substratoberfläche hinausragten (Abbildung 12). Um das Wechseln der Röhren zu erleichtern, wurde zunächst eine unten zugespitzte Stahlhülse in das Substrat geschlagen, die die Röhren aufnahm. An jeder Messposition wurden jeweils eine längere und eine kürzere Röhre eingebracht, so dass die Feststoffsedimentation aus unterschiedlichen Distanzen zur Sedimentsohle erfasst werden konnte.



Abb. 11:

Litoraler Wassers schöpfer zur Beprobung der bodennahen Wasserschichten. (a) Gerät in der Brandungszone mit geöffnetem Schieber. (b) Ablassrinne mit Auffanggefäßen.

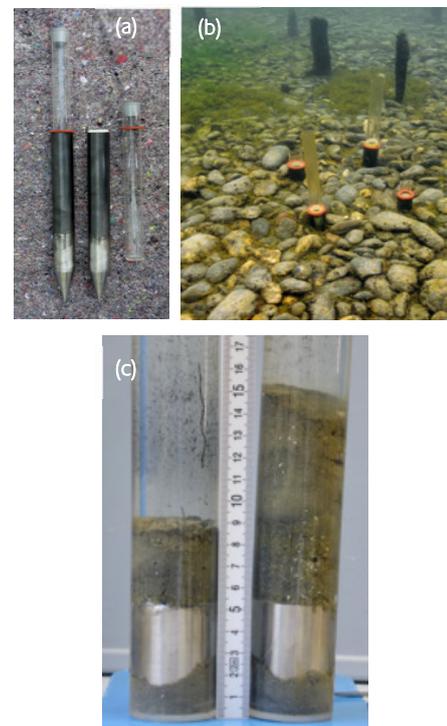


Abb. 12:

Litorale Sedimentfallen. (a) Gesamtansicht mit Hülse, Acrylglasröhren, Gummimanschetten und Stopfen. (b) Fallen auf der Erosionsschutzschüttung vor Unteruhldingen. (c) Fallen-Inhalte: links Falle mit Öffnung von ca. 25 cm über Grund, rechts Falle mit Öffnung ca. 5 cm über Grund; in der bodennahen Falle ist eine deutliche Gradierung (unten grobe, oben feine Partikel) zu erkennen, in der bodenfernen Falle haben sich nur die feinen Partikel abgelagert.

Die Beschickung und Bergung durch Forschungstaucher erwies sich als betriebssicher und unproblematisch. Ein ‚Verstopfen‘ der Röhren durch grobe Fremdkörper oder Algenwatten wurde nicht beobachtet. Allerdings hatten sich vielfach Dreikantmuscheln (*Dreissena polymorpha/bugensis*) auf der Innenwandung der Röhren angesiedelt, so dass sich der effektive Querschnitt verringerte. Auch Köcherfliegen-Larven besiedelten die Wandung.

Je nach Expositionsort und -dauer hatten sich unterschiedliche Sedimentmengen abgesetzt, die im Labor aufgearbeitet wurden (Korngrößenanalyse, sedimentchemische Analyse; vgl. [12]). Durch die klare Wandung der Röhren waren oftmals eine oder mehrere gradierte Schichtungen von gröberen und feineren Lagen zu erkennen (Abbildung 12 c). Wahrscheinlich repräsentiert jede Gradierung bzw. jede Doppelschicht den Beginn und Höhepunkt sowie die Abflauphase eines Sturmereignisses. Grundsätzlich ist es möglich, die Schichten zu trennen und getrennt zu analysieren.

Die Laboranalysen liefern wichtige Informationen über die mobilisierten Korngrößen sowie über eine Separierung mineralischer, carbonatischer und organischer Fraktionen während des Sturmereignisses. Die Berechnung von mittleren Sedimentationsraten ist nicht sinnvoll, da die Hauptmenge des Absatzes während relativer kurzer Sturmereignisse erfolgt und diese bisher erheblich kürzer waren als das Beprobungsintervall.

Die Expositionszeiten von etwa 150 bis 200 Tagen erwiesen sich als zu lang bemessen. Teils waren die Fallen randvoll gefüllt, teils hatte sich ein Belag aus Dreikantmuscheln gebildet. Wir empfehlen daher einen eher kurzzeitigen Einsatz im Bereich von ein bis sechs Wochen, beispielsweise, um die Auswirkungen eines vorhergesagten Sturmereignisses zu analysieren. Dabei können zusätzliche Messgeräte z. B. zur Messung des Suspensionstransports (S. 75–76) oder hydroakustische Erosionsmarker (S. 74–75) eingesetzt werden.

Sohltransport

Zur Erfassung des Sohltransports an Meeresküsten und in Fließgewässern wurden zahlreiche Messeinrichtungen entwickelt und eingesetzt, die grundsätzlich auch für die Flachwasserzone des Bodensees in Frage kommen. Der zu erwartende Korngrößenbereich erstreckt sich vom Grobsand ($d_n \geq 0,63$ mm) bis zum Grobkies ($d_n \leq 63$ mm). In Abhängigkeit von den Zielsetzungen wurden folgende **Methoden** angewandt:

- (a) Messungen *während* des relevanten Ereignisses (Tide, Sturm, Hochwasser):
 - die Messung des Massentransports von Sand durch handbetriebene Sohlfrachtsammler (d. h. stationäre Dredschens mit einer Drahtgitterbespannung),
 - Verfolgung von einzelnen Grobkiesen und Geröllen mit Hilfe von autonom arbeitenden Videokameras oder Hydrophonen,

- (b) Messungen *vor* und *nach* einem Ereignis:
 - Messung der Sohlneivaudifferenz (vgl. Tabelle 1),
 - Verlagerung von Tracern (markierte Sande, Kiese oder Gerölle).

Bei unseren Messungen kamen Sohlfrachtsammler und verschiedene Arten von Tracern zum Einsatz.

Bei dem **Sohlfrachtsammler** („Streamer“) handelt es sich um einen Gerätetyp, der v. a. in der Brandungszone von Meeresküsten für Sandtransportmessungen eingesetzt wird und von uns entsprechend angepasst wurde ([18]). Ähnliche Geräte werden auch für den Suspensionstransport sowie für Sohltransportmessungen in Fließgewässern verwendet.

Der kastenförmige Sammler besteht aus einem flachen Edelstahlrahmen und Eckversteifungen, über die ein Edelstahlnetz mit Maschenweite von 0,063 mm gezogen ist. Die Öffnung des Edelstahlrahmens beträgt 26 mm (H) × 146 mm (B), die Länge des Netzkastens liegt bei 400 mm (L). Der Netzkasten wird am Rahmen mit einer Schnellspannvorrichtung an einer Haltestange befestigt, die einen Handbetrieb bis in etwa 1,5 m Wassertiefe erlaubt (Abbildung 13). Die Öffnung wird für 5 bis 15 Minuten gegen die Strömung (oder gegen eine andere beliebige Richtung) ausgerichtet, so dass sich das transportierte Sandmaterial im Netzkasten sammeln kann. Der Netzkasten wird mit einem Druckwasserreiniger rückgespült und das aufgefangene Material wird nach Trocknung gravimetrisch bestimmt.

Bei ersten Geländetests erwies sich die Konstruktion als robust und betriebssicher. Dem manuellen Einsatz am Seeufer sind allerdings aus Sicherheitsgründen Grenzen gesetzt. Die bisherigen Messungen verliefen nur teilweise erfolgreich, weil das transportierte Material überwiegend zu fein war (Ton und Silt, $d_n < 0,063$ mm) und damit die Maschen passieren konnte.

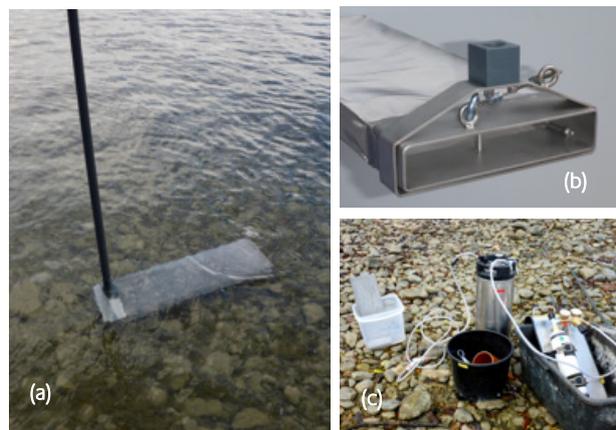


Abb. 13:

Sohlfrachtsammler. (a) Gesamtansicht. (b) Details des Öffnungsrahmens und der Klemmvorrichtung mit Gewindeblock für den Einsatz der Haltestange. (c) Reinigung mit Sprühpistole, Druckluftflasche und Druckausgleichsbehälter.

Die Erfassung des Sohltransports mit Hilfe von (Feststoff-)Tracern besteht darin, die Tracer zu Beginn einer Monitoringperiode an einem zuvor eingemessenen Ort auszubringen und am Ende der Periode erneut ihre Position zu bestimmen, um daraus Betrag und Richtung des Transports in der betreffenden Zeitspanne zu berechnen. Wichtig ist dabei, dass die Tracer hinsichtlich Korngröße, Form (unregelmäßig rundlich-eiförmig bis flach-elliptisch) und Dichte (2.700 kg m^{-3}) dem natürlicherweise am Seeufer auftretenden Material möglichst ähnlich sind, sich aber dennoch in einer bestimmten Eigenschaft von natürlichen Körnern unterscheiden.

Bei den von uns verwendeten Tracern handelte es sich um natürliche oder künstliche Partikel im Korngrößenbereich von etwa 0,1 bis 100 mm, die den obigen Anforderungen genügten. Zur Unterscheidung von natürlichen Körnern wurden sie oberflächlich eingefärbt oder bei der Herstellung mit einem Zuschlag aus Eisengruss bzw. mit einem Permanentmagneten versehen (Abbildung 14). Die magnetischen Eigenschaften erleichtern die Wiederfindung, Bergung und nachherige Anreicherung und Auszählung erheblich. Große Körner ab etwa $d_0 = 20 \text{ mm}$ können durch Aufschrift eines Codes individualisiert werden, bei kleineren Körnern ist dies mit einfachen Mitteln nicht möglich.

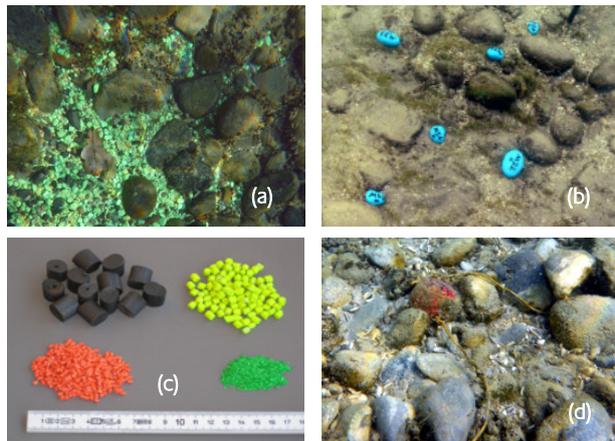


Abb. 14:

Tracer-Typen. (a) oberflächlich gefärbte Sände, Fein- und Mittel-Kiese; (b) oberflächlich gefärbte, individuell markierte Mittel- und Grobkiese, (c) künstliche Tracer aus einem Eisen-Polypropylen-Compound mit oberflächlicher Färbung, (d) künstlicher Grobkies (rot eingefärbt) mit einem Permanentmagnetkern und PP-Schnüren zur erleichterten Ortung durch Forschungstaucher.

Die Eigenschaften der eingesetzten Tracer sind immer in Zusammenhang zu sehen mit der Art des Experiments bzw. mit den Umgebungsbedingungen. Wir haben folgende Experimente durchgeführt:

- qualitative Dokumentation der Bewegung von individualisierten Kiesen in Testflächen (Abbildung 15),
- Langzeitmonitoring von künstlichen Grobkiesen und Geröllen mit Permanentmagnet (Abbildung 16),

- simultane Erfassung von Erosion und Akkumulation mit Hilfe von EA-Pfannen (Abbildung 17),
- Transportmessung mit Magnetfallen (Abbildung 18),
- Transportmessung mit Rasterrahmen (Abbildung 19).

Qualitative Dokumentation der Bewegung von Kies-Tracern

Die einfachste Möglichkeit, den Transport von Kiesen zu untersuchen, besteht darin, natürliches Material, das z. B. einer Kiesgrube entnommen wurde, nach Korngrößenfraktionen zu trennen, die Einzelkörner oberflächlich einzufärben und mit einem Code (Identifikator) zu versehen. Die Körner werden in einer eingemessenen Testfläche ausgebracht; am Anfang und am Ende der Monitoring-Periode wird die Testfläche aus möglichst senkrechter Position fotografiert. Durch Vergleich der Fotos können Betrag und Richtung der Verlagerung ermittelt werden ([19]).

Dieses Verfahren wurde von Forschungstauchern auf speziell vermarkten Foto-Feldern von 1 x 1 m Größe innerhalb der 5 x 5 m großen Messareale durchgeführt (Abbildung 15). Es stellte sich jedoch heraus, dass sich (i) die Körner innerhalb der mit etwa 150 bis 200 Tagen sehr langen Monitoringperiode überhaupt nicht bewegt hatten (z. B. in der Untersuchungsfläche Kirchberg) oder (ii) mit Sand zugedeckt und schwer auffindbar waren (z. B. Langenargen, Kressbronn) oder (iii) sich offensichtlich aus der Foto-Fläche herausbewegt hatten und daher nicht mehr fotografisch zu erfassen waren. Auch trübes Wasser und dichter Unterwasserpflanzenbewuchs behinderten die Erkennung der Tracer erheblich.

Dieses kostengünstige und technisch einfache Verfahren eignet sich demnach nicht für ein Langzeitmonitoring an Seeufern wie denen des Bodensees. Wir empfehlen daher kurzfristige Einsätze von ca. zwei bis sechs Wochen außerhalb der Vegetationsperiode, um beispielsweise die Auswirkungen einzelner Starkwindereignisse zu verfolgen. Während des Monitorings sollten Windstille und gute Sichtbedingungen herrschen. Durch das Unterwasserfoto und seine spätere Auswertung am PC wird der tauchtechnische Aufwand vor Ort erheblich reduziert.

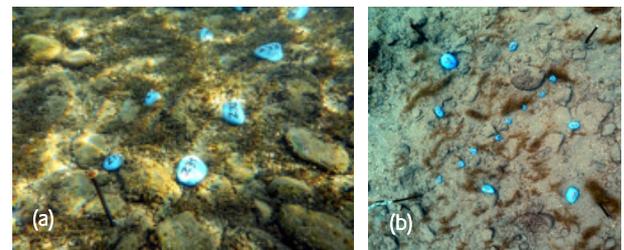


Abb. 15:

Individuell markierte Kies-Tracer. (a) Tracer, die entlang einer Bezugsstrecke (zu sehen ist eine der Passpunkt-Markierungen) ausgebracht wurden. (b) aufgerichtetes Bild einer Foto-Fläche mit Kies-Tracern; in den Ecken sind Torstahlstangen als Passpunkte zu erkennen.

Langzeitmonitoring von künstlichen Magnetkern-Tracern

Bei den Magnetkern-Tracern handelte es sich um künstliche Beton-Gerölle von ca. 55–100 mm Größe (längste Achse), die mit einem Permanentmagnetkern versehen waren, so dass sie mit einem Magnetometer geortet werden konnten ([22]). Im Mai 2010 waren insgesamt 180 Gerölltracer in den Unterwasserdenkmalstationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen ausgebracht worden. Im März 2017 wurde ein abschließendes Monitoring durchgeführt, bei dem die Position der Gerölle durch Forschungstaucher eingemessen und die Tracer selbst entnommen wurden, um sie einer eingehenden Materialkontrolle zu unterziehen ([13]). Zu diesem Zeitpunkt lagen die Tracer knapp sieben Jahre in bzw. auf der Sedimentoberfläche und waren damit deutlich länger exponiert als bei den längsten Geröll-Tracer-Experimenten, die bis dahin im marinen Bereich oder in Fließgewässern durchgeführt worden waren.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz von künstlichen Grobkies- und Geröll-Tracern auch über längere Zeiträume hinweg möglich und sinnvoll ist. Auch nach sieben Jahren waren die meisten Tracer intakt, d. h. der Gusskörper, die Magnete, die Oberflächenbeschichtung und die beiden Ösen waren unversehrt (Abbildung 16). Ein wichtiges konstruktives Merkmal war die Beschichtung der Magnete und des innen liegenden Eisenrohrs mit Silikonkautschuk als Schutz vor Feuchtigkeit und als Puffer gegenüber der unterschiedlichen Wärmeausdehnung der Materialien.

Die Wiederfindungsrate der Tracer in 2017 war erstaunlich hoch ([13]). Dies lag einerseits daran, dass sich der überwiegende Teil der Tracer nur um maximal 2 m von ihren Startpositionen wegbewegt hatte. Zum anderen lagen die meisten Tracer an der Oberfläche der Schüttungen bzw. der natürlichen Sedimente, waren also nicht – wie ursprünglich erwartet – mehr oder minder tief in die Feinsedimente eingebettet. Der Umstand, dass sich innerhalb von sieben Jahren keine nennenswerte Feinsedimentauflage bilden konnte, weist auf tendenziell erosive Bedingungen hin. Unter diesen Bedingungen ist die Ausstattung der Tracer mit Permanentmagneten entbehrlich. Die beiden Polypropylen-Schnüre, die an zwei in den Betonkörper eingegossenen Ösen angebracht waren, erwiesen sich bei der Ortung durch den Forschungstaucher als sehr hilfreich. Die Schnüre neigen bei Wellengang dazu, aufzutreiben und sich danach auf der Sedimentoberfläche abzulegen.

Die Kodierung der einzelnen Tracer erfolgte mit einem handelsüblichen Labor-Faserschreiber und war für einen Zeitraum von 1–3 Jahren gedacht. Unter günstigen Bedingungen, v. a. unter dem Schutz von Kalkkrusten auf der Tracer-Oberfläche blieb die Beschriftung 7 Jahre lang erhalten, blasse aber oft stark aus. Bei zukünftigen Langzeitversuchen sollte daher eine andere Kodierungs- bzw. Beschriftungstechnik gewählt werden. Hier bieten sich das Einfräsen des Buchstaben-Codes in den noch nicht völlig ausgehärteten Beton sowie die Beschriftung mittels Chlorkautschukfarbe an.



Abb. 16:

Magnetkern-Tracer. (a) Einmessung und Bergung eines Tracers (im Vordergrund). (b) kalkverkrustete Tracer nach Bergung, (c) Zustand nach Reinigung, die Beschriftung ist noch deutlich zu erkennen, (d) durch Dehnungsrisse zerstörter Tracer (erste Produktionsserie ohne Silikonkautschuk-Ummantelung der Magnete).

Die Magnetkern-Tracer eignen sich also für langfristige Einsätze, insbesondere dann, wenn mit einem Einsedimentieren der Partikel zu rechnen ist, so dass diese nicht mehr an der Oberfläche zu erkennen sind. Unter solchen Bedingungen ist die Ortung mittels Magnetometer notwendig. Die Ortung kann

vom Boot aus bis zu einer Tiefe von mehreren Metern vorgenommen werden. Für die Bergung und die Identifizierung des Codes sind weiterhin Forschungstaucher unentbehrlich.

Simultane Erfassung von Erosion und Akkumulation mittels EA-Pfannen

Erosions- und Akkumulationsprozesse in der Flachwasserzone von Seen sind zeitlich und räumlich eng miteinander gekoppelt. Im dynamischen Gleichgewichtsfall kommt es nur zu einer vertikalen Umlagerung der mobilen Sedimentdeckschichten, so dass sich auf längere Sicht keine Niveauänderung der Gewässersohle ergibt ($\Delta z = 0$). Um die mehr oder minder gleichzeitig ablaufenden Erosions- und Akkumulationsprozesse simultan zu erfassen, wurden ineinanderpassende quadratische Doppelschalen (EA-Pfannen) in das Substrat eingebettet, dort verankert und mit einer bekannten Menge an Tracern beschickt ([20]). Die Unterschale diente der Befestigung am Seegrund, die Oberschale war an der Unterschale befestigt und konnte von Forschungstauchern leicht ausgewechselt werden. Erosionsvorgänge werden anhand einer Verringerung der Tracermengen, Akkumulationsvorgänge durch den Eintrag von Sanden aus der Umgebung sichtbar (Abbildung 17). Im Labor werden die beiden Materialklassen nach Siebung getrennt, so dass schließlich eine Massenbilanz berechnet werden kann.

Grundsätzlich hat sich diese Technik bewährt. Die Oberschalen konnten von den Forschungstauchern einfach und ohne größere Materialverluste ausgewechselt und mit neuem Tracer-Material beschickt werden. Die Befestigung der Unterschalen erwies sich jedoch in einigen Fällen als unzureichend, indem die Doppelschalen durch Wellengang oder durch Bootsanker herausgezogen und verkippt wurden. In anderen Fällen wurde die Unterschale unterspült, wobei sich die Tracer in der Vertiefung ansammelten. In den meisten der geborgenen EA-Pfannen wurden sowohl Tracer als auch normale Sande in unterschiedlichen Anteilen angetroffen. An einigen Positionen waren die EA-Pfannen jedoch völlig leer oder unter einer dicken Sandschicht begraben. Insbesondere in diesen Fällen waren die Monitoring-Intervalle zu lang gewählt.

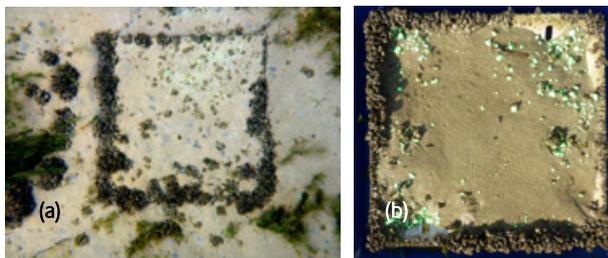


Abb. 17:

Erosions-/Akkumulationspfannen. (a) vollkommen einsedimentierte Pfanne, die Kanten sind mit Dreikantmuscheln besetzt. (b) geborgene Pfanne, weitgehend mit Sand gefüllt; außerdem sind noch viele grüne Tracer-Feinkiese erhalten geblieben.

Wir empfehlen EA-Pfannen für den kurzzeitigen Einsatz, um die Auswirkungen einzelner Ereignisse zu erfassen. Bei sehr starken Windereignissen ist mit einer kompletten Ausräumung der Pfannen zu rechnen. Wichtig ist die ebenerdige Einbindung in das Substrat und eine ausreichende Befestigung der Unterschale.

Transportmessungen mit Hilfe von Magnet-Fallen

Der Einsatz von FePP-Verbundmaterial als Tracer hat den Vorteil, dass die Körner während des Transports von Magneten angezogen und fixiert werden. Hierzu wurden Magnetfallen konstruiert, die aus Eisen-U-Schienen von rd. 20 cm Länge bestanden, die an der Unterseite mit Permanentmagneten bestückt wurden ([21]). Die Schienen wurden zu einem achteckigen horizontalen Ring von ca. 0,8 m Durchmesser verschraubt und am Seeboden abgelegt. Die eisenhaltigen Polypropylen-Tracer wurden im Zentrum des Rings exponiert und konnten sich frei in alle Richtungen bewegen, wobei sie schließlich auf die Magnetschienen trafen und dort festgehalten wurden (Abbildung 18). Laborexperimente legen den Schluss nahe, dass die eingefangenen Partikel sohnah transportiert wurden; Partikel, die in der turbulenten Wassersäule suspendiert sind, werden oberhalb einer Distanz von etwa 0,2 m nur noch schwach angezogen und können über die Magnetschienen hinweg in die Umgebung verdriftet werden (Abbildung 18b).

Experimente, die ufernah in den Untersuchungsflächen Hagnau und Kirchberg mit Hilfe von Forschungstauchern durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass ein ufernormal, landwärts gerichteter Transport parallel zur Fortpflanzungsrichtung der einlaufenden Wellen vorherrscht. Der relative Anteil der durch den Magnetring wieder eingefangenen Tracer, gemessen an der Ausgangsmenge an Tracern, hing von der Korngröße und der Art der Uferverbauung ab ([21]). Vor der Ufermauer in Hagnau war die Verlagerung wesentlich intensiver und der Anteil an eingefangenen Tracern geringer als an dem naturbelassenen Ufer vor Kirchberg. Die groben Tracer (14–15 mm) wurden in geringerem Maße erfasst als die feinkiesigen Tracer (2,0–2,5 bzw. 4,5–5 mm).

Insgesamt hat sich die Magnetfallen-Technik unter Verwendung magnetischer Tracerkörner als sinnvolles Hilfsmittel zur Abschätzung der Transportrichtung und der Transportrate von Tracerkörnern erwiesen. Durch die modulare Bauweise lassen sich grundsätzlich beliebig große Vielecke (mindestens vier Schienen) zusammensetzen und damit an die vorherrschenden hydrodynamischen Bedingungen und Transportprozesse anpassen.

Auch die Handhabbarkeit der Ringe durch Forschungstaucher und Bootpersonal ist hinreichend betriebssicher. Hier kommt es darauf an, unter Wasser und an Bord eisenhaltige Gegenstände von den Magneten fernzuhalten und die Magnetschie-

nen so zu demontieren und zu transportieren, dass Verletzungen (z. B. Quetschungen an den Händen) ausgeschlossen sind. Die Expositionsdauer war mit 174 Tagen vermutlich zu lang: Die Magnetfallen eignen sich eher für Kurzzeitexperimente, beispielsweise, um die Auswirkungen einzelner Sturmereignisse zu dokumentieren.

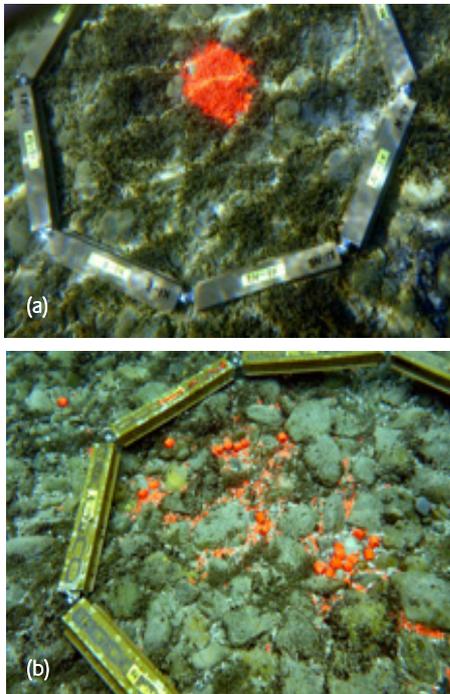


Abb. 18:

Magnetfallen. (a) Ring aus acht Magnetfallen-Schienen mit roten FePP-Tracern in der Mitte. (b) nach 26 Tagen Expositionszeit: ein Teil der Tracer befindet sich noch innerhalb des Ringes, ein anderer Teil wurde von der Magnetfalle festgehalten, einige wenige Körner wurden über die Falle hinaus transportiert.

Transportmessungen mit Hilfe von Rasterfeldern

Eine weitere Möglichkeit, Transportrichtung und -rate von Tracerkörnern zu bestimmen, besteht darin, ein Versuchsfeld am Seeboden in einzelne Raster von beispielsweise $0,2 \times 0,2$ m Zellengröße aufzuteilen. Die Tracer werden in bestimmten Rastern ausgebracht, können dann ungehindert wandern und werden am Ende des Monitoring-Intervalls nach Rasterzellen getrennt eingesammelt und gezählt. Die zweidimensionale Form der Häufigkeitsverteilung im Vergleich zur anfänglichen (punktförmigen) Verteilung gibt Aufschluss über die bevorzugte Transportrichtung sowie die mittleren Wegstrecken, die von den einzelnen Tracerkörnern zurückgelegt wurden.

Diesem Ansatz folgend haben wir quadratische Aluminium-Rahmen von 1,4 m Seitenlänge hergestellt, so dass ein Rasterfeld von 7×7 Zellen aufgebaut werden konnte ([14]). Ausgewählte Zellen im Zentrum des Rasterfeldes wurden wahlweise entweder mit magnetischen FePP-Tracern oder mit leuchtend grün gefärbten Fein- und Mittelkies-Tracer aus natürlichem

Kiesgrubenmaterial beschickt (Abbildung 19). Der zuvor vermarkte Rahmen wurde für die Dauer des Experiments entfernt und zur Bergung der Tracer wieder aufgesetzt. Während die Häufigkeit der farbmarkierten Kies-Tracer nur visuell geschätzt werden konnte, wurden die FePP-Körner mit Hilfe von Magnetabscheidern quantitativ bergungen und im Labor ausgezählt.

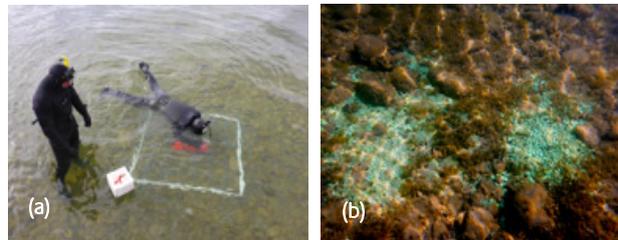


Abb. 19:

Rasterfeld-Experimente. (a) Forschungstaucher bei der Beschickung eines Rasterfelds mit roten FePP-Tracern drei verschiedener Korngrößenklassen. (b) Nach etwa 13 Tage haben sich die Tracer verteilt (hier: grün gefärbte, nicht magnetische Fein- und Mittelkies-Tracer) und je nach Korngrößenfraktion unterschiedlich weit vom Startpunkt entfernt.

Die Rasterfeldtechnik konnte auf den Untersuchungsflächen in Hagnau (Ufermauer und Uferrenaturierung) und Kirchberg (naturbelassenes Ufer) erfolgreich getestet werden ([14]; vgl. Kapitel 8, S. 92). Dabei wurden die beiden Arten von Fein- und Mittelkies-Tracern (magnetisch und nicht-magnetisch) in einem fest eingemessenen Rasterrahmen mit 7×7 Zellen ausgebracht. Das Monitoring erfolgte nach 13 Tagen. Die quantitative Bergung der magnetischen Tracer erlaubte die Berechnung der Wiederfindungsquote, der mittleren Transportrichtung und -rate (Schwerpunktverlagerung) sowie der Dispersion. Im Vergleich zum naturnahen Uferabschnitt ergaben sich vor der Ufermauer die höchsten Transportraten, die höchste Dispersion und die geringste Wiederfindungsquote. Der Transport ging auf zwei Starkwindereignisse am Anfang der Monitoringperiode zurück. Die Tracer wurden in Fortpflanzungsrichtung der Wellen nahezu senkrecht in Richtung Uferlinie transportiert.

Die Vorteile dieses Verfahrens sind die einfache Handhabung und kostengünstige Technik sowie die Betriebssicherheit unter unterschiedlichen Geländebedingungen. Die Größe und Anzahl der Rasterzellen können je nach hydrodynamischen Bedingungen variiert werden und sind lediglich durch den Zeitaufwand der Forschungstaucher beim Monitoring bzw. bei der Bergung der Körner begrenzt. Nach unserer Einschätzung stellt eine Zellengröße von $0,30 \times 0,30$ m und ein Rasterfeld von 9×9 Zellen unter praktischen Gesichtspunkten ein gewisses Maximum dar. Der Aufwand für das Monitoring der grün gefärbten, nicht-magnetischen Kiese ist zwar deutlich geringer als der Aufwand für das Absammeln und Auszählen der FePP-Tracer, liefert dafür aber auch nur einen sehr begrenzten Informati-

ongehalt. Von daher empfehlen wir die zeitintensivere Magnettracer-Technik. Dieses Verfahren eignet sich für ein kurzzeitiges Monitoring über 1 bis 2 Wochen, um die Auswirkungen charakteristischer Wellenereignisse zu analysieren.

SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Die durchgeführten Freilanduntersuchungen haben gezeigt, dass die Feststoffdynamik an windexponierten Seeuferabschnitten wie denen des Bodensee-Nordufers durch drei Transportprozesse bestimmt wird, d. h. durch den Transport in der Wassersäule (↪ Suspensionstransport), den ↪ Intermediärtransport in der bodennahen Wasserschicht und den Transport auf bzw. in unmittelbarer Nähe der Gewässersohle (↪ Sohltransport). Zur qualitativen und quantitativen Erfassung der Dynamik und zur Messung dieser Prozesse wurde eine Reihe von Messtechniken und Arbeitsweisen neu entwickelt oder nach Vorlagen aus der Küstenforschung an die Bedingungen von Seeufern angepasst und am Bodensee erprobt. Daraus können folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

- (1) Angesichts der kleinräumigen Strukturvielfalt des Ufers und der ufernahen Flachwasserzone empfehlen wir den Einsatz von Forschungstauchern für die Einbringung und Bergung von Messeinrichtungen unter Sichtbedingungen. Dadurch können störende Strukturen auf dem Seegrund umgangen und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht werden. Gleichzeitig können viele Geräte wesentlich einfacher und kostengünstiger konstruiert sein, wenn sie unter Sichtbedingungen betrieben werden, was den erhöhten personellen Kostenaufwand zumindest teilweise kompensiert.
- (2) Im tieferen, nicht mehr ‚stehfähigem‘ Wasser ab 1,5 m Tiefe sollten vor allem autonom messende Geräte eingesetzt werden. Hierzu gehören Wellen- und Strömungssensoren (vgl. Kapitel 6) sowie optische und akustische Sensoren, die die Trübung der Wassersäule und davon abgeleitet die Partikelkonzentration erfassen, außerdem akustische Erosionsmarker. Auch der Einsatz des ‚Hydrocrawlers‘ (vgl. Kapitel 5) zur hochauflösenden, flächendeckenden Vermessung der Sedimenttopografie und -stratigrafie ist für mittlere bis größere Wassertiefen zwischen 0,5 und 5 m besonders geeignet.
- (3) Wir empfehlen, Messungen und Experimente zum Sohltransport vorwiegend im Winter und Frühling vorzunehmen, wenn die Uferplattform weitgehend vegetationsfrei ist. Im Sommer und Herbst bedecken häufig dichte Armeleuchteralgendecken den Seeboden, die den sohnahen Feststofftransport unterhalb der Niedrigwasserlinie weitgehend unterbinden. Im Wasserwechselbereich dagegen können Starkwindereignisse ganzjährig von erheblicher Bedeutung sein.
- (4) Die zu bevorzugenden Messtechniken und Arbeitsstrategien zur Erfassung des Feststoffhaushalts und der einzelnen

Transportprozesse sind von der jeweiligen Fragestellung und den Besonderheiten des betreffenden Uferabschnitts abhängig, so dass hier keine allgemeingültigen Empfehlungen gegeben werden können. In jedem Fall sollten bei der Umsetzungsplanung die geologischen Verhältnisse, die Textur des Sohlsubstrats ([15]), die anthropogenen Veränderungen in der Uferlinie und ggf. auch im Sublitoral ([23]) sowie die mutmaßlichen Auswirkungen jüngerer Wasserstandstrends ([16]) bekannt sein. Im Vorfeld der Messprogramme sollte die potentielle hydrodynamische Exposition der Uferabschnitte mit einem Wellenmodell und/oder Wellenpropagationsmodell abgeschätzt werden (vgl. Kapitel 6), um die Planung des Messprogramms zu unterstützen.

- (5) Für die Dokumentation der mittel- und langfristigen Entwicklung empfehlen sich Wiederholungsmessungen in regelmäßigen Zeitabständen an den gleichen Positionen und zur gleichen Jahreszeit.
- (6) Dabei sind Messeinrichtungen für den kurzfristigen Einsatz (ca. eine bis sechs Wochen Expositionsdauer zur Dokumentation einzelner Ereignisse) von solchen zu unterscheiden, die sich für den langfristigen Einsatz eignen (ca. drei Monate bis mehrere Jahre zur Dokumentation der langfristig durchschnittlichen Entwicklung). Beide Perspektiven sind gleich bedeutsam und ergänzen einander. Dabei ist zu bedenken, dass die Wahrscheinlichkeit von Funktionsstörungen (Unterwasservegetation, Dreikantmuschel-Bewuchs, Badegäste), Beschädigung (Bootsanker), Entwendung usw. mit der Einsatzdauer zunimmt. Wichtig ist, dass die Positionen genau eingemessen und mit einer Vermarkung oder Sicherung versehen sind, um ein zügiges Wiederfinden zu gewährleisten. Entsprechend kommen für den langfristigen Einsatz eher robuste und ‚unauffällige‘ Messeinrichtungen in Frage. Beispiele sind die EA-Marker, Magnetkern-Tracer und FePP-Tracer. Dagegen eignen sich andere Messeinrichtungen eher für den kurzzeitigen Einsatz, wenn es beispielsweise darum geht, die Auswirkungen eines vorhergesagten Starkwindereignisses durch Vorher-/Nachher-Messungen zu erfassen, z. B. litorale Sedimentfallen, Erosions-/Akku-mulationspfannen, Magnetfallen-Ringe, Rasterfelder mit FePP-Tracern. Andere Messgeräte können, sofern die Sicherheit des Bedienungspersonals gewährleistet ist, auch *während* des Sturmereignisses eingesetzt werden, z. B. litorale Bodenwasser-schöpfer und Sohlfrachtsammler.

- (7) Die Auswahl der Messungen bzw. der zugehörigen Messgeräte hängt von den jeweiligen Fragestellungen ab. Wir empfehlen jedoch, die Messungen stets durch Wellen- und Strömungsmessungen (vgl. Kapitel 6) zu begleiten. Ist der kurz- oder langfristige Einsatz von mehreren Messeinrichtungen geplant, ist es empfehlenswert, diese am gleichen Ort zu installieren, so dass die Ergebnisse aufeinander bezogen werden können und eine wechselseitige Plausibilisierung möglich ist.

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] ASHLEY, G. M. (1990): Classification of large-scale subaqueous bedforms – a new look at an old problem. – *Journal of Sedimentary Petrology* 60 (1): 160–172.
- [2] BASINSKI, T. (1989): Field studies of sediment movement in the coastal zone. – Polish Academy of Sciences, Institute of Hydroengineering, Gdansk, Poland, 298 S.
- [3] BLOESCH, J. und BURNS, N. M. (1980). A critical review of sedimentation trap techniques. – *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* 42: 15–55.
- [4] HOFMANN, H., LORKE, A. und PEETERS, F. (2008): The relative importance of wind and ship waves in the littoral zone of a large lake. – *Limnology and Oceanography* 53 (1): 368–380.
- [5] HOFMANN, H., LORKE, A. und PEETERS, F. (2011): Wind and ship wave-induced resuspension in the littoral zone of a large lake. – *Water Resources Research* 47: W09505, DOI: 10.1029/2010WR010012.
- [6] HOFMANN, H., SEIBT, C. und PEETERS, F. (2013): Wellenexposition und Resuspensionspotential ausgewählter Untersuchungsgebiete am Bodensee: Messungen und Modellierung. In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 37–51. Bregenz.
- [7] MAINBERGER, M. und HOHL, W. (2013): Monitoring in archäologischen Denkmälern in der Flachwasserzone. Eine Einführung in Techniken und Methoden. In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H., SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 183–196. Bregenz.
- [8] NAIRN, R. B. und WILLIS, D. H. (2002): Erosion, transport, and deposition of cohesive sediments. In: US ARMY CORPS OF ENGINEERS (Hrsg.), *Coastal Engineering Manual, Part III, Chapter 5*. Publ. No. EM 1110-2-1100 (Download unter <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>).
- [9] NATIONAL RESEARCH COUNCIL, Hrsg. (2007): *Mitigating shore erosion along sheltered coasts*. – 188 S., ISBN 978-0-309-10346-6, DOI: 10.17226/11764 (Download unter <http://nap.edu/11764>).
- [10] OSTENDORP, W. (2018a): Einrichtung und Monitoring von konventionellen Erosions-/Akkumulationsmarkern (Stand November 2018). – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.010.
- [11] OSTENDORP, W. (2018b): Stratigraphischer Aufbau der Flachwasserzone in den Untersuchungsflächen des HyMoBioStrategie-Projekts. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.019.
- [12] OSTENDORP, W. (2018c): Konstruktion und Einsatz von litoralen Sedimentfallen in der Flachwasserzone des nördlichen Bodensees. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.020.
- [13] OSTENDORP, W. (2018d): Langzeitverhalten von Gerölltracern am Ufer des Überlingersees (2010 bis 2017). – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, ii + 10 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.009.
- [14] OSTENDORP, W. (2018e): Quantifizierung des Sohltransports anhand von Rasterfeld-Experimenten am nördlichen Bodenseeufer. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, ii + 14 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.012.
- [15] OSTENDORP, W. (2018f): Oberflächensedimente der Untersuchungsflächen im HyMoBioStrategie-Projekt. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.018.
- [16] OSTENDORP, W. (2018g): Veränderungen der Wasserstandsdynamik des Bodensees seit 1931. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.017.
- [17] OSTENDORP, W. (2019a): Konstruktion eines handbetriebenen litoralen Wasserschöpfers. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.021.
- [18] OSTENDORP, W. (2019b): Konstruktion eines handbetriebenen Sohlfrachtsammlers. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.022.
- [19] OSTENDORP, W. (2019c): Oberflächenmonitoring von Testflächen anhand entzerrter Senkrecht-Fotos. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.023.
- [20] OSTENDORP, W. (2019d): Simultane Erfassung von Erosions- und Akkumulationsprozessen mit Hilfe von Tracern und EA-Pfannen. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.024.
- [21] OSTENDORP, W. (2019e): Einsatz von Magnetfallen zur Erfassung des Transports von FePP-Tracern. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.025.
- [22] OSTENDORP, W. und HÄRTER, C. S. (2013): Sohltransport in der Flachwasserzone des Bodensees: Methodenentwicklung und erste Ergebnisse. In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H., SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 79–83. Bregenz.
- [23] OSTENDORP, W. und OSTENDORP, J. (2018): Uferstruktur-Klassifikation der Untersuchungsflächen des HyMoBioStrategie-Projekts nach dem HMS-Verfahren. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, ii + 28 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.014.
- [24] OTVOS, E. G. (2000): Beach ridges – definitions and significance. – *Geomorphology* 32: 83–108.
- [25] ROSATI, J. D. (2005): Concepts in sediment budgets. – *Journal of Coastal Research* 21 (2): 307–322.
- [26] SCHLICHTERLE, H. (1985): Prähistorische Ufersiedlungen am Bodensee. Eine Einführung in naturräumliche Gegebenheiten und archäologische Quellen. – *Berichte zu Ufer- und Moorsiedlungen Südwestdeutschlands 2*. Materialhefte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 7: 9–42. Stuttgart.
- [27] STAUBLE, D. K. (2004): An assessment of the nation's shoreline change: A Review of the 1971 National Shoreline Study. – IWR Report 04-NSMS-3, hrsg. vom U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, Vicksburg, 31 S.
- [28] SUNDBORG, A. (1956): The River Klarälven: Chapter 2. The morphological activity of flowing water – erosion of the stream bed. – *Geografiska Annaler* 38: 165–221.
- [29] VOGT, R. (2014): Kolluvien als Archive für anthropogen ausgelöste Landschaftsveränderungen an Beispielen aus der westlichen Bodenseeregion. – *Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg* 99. Stuttgart.
- [30] VOGT, R. (2015): Bodenkundlich-sedimentologische Untersuchungen im Bereich der Ausgrabungen Allensbach-Strandbad 2002–2003. In: *Allensbach-Strandbad AsC1*. Eine Ufersiedlung der späten Horgener Kultur am Bodensee-Untersee, Kreis Konstanz. – *Hemmenhofener Skripte* 10: 239–250. Gaienhofen-Hemmenhofen.
- [31] WOHLFARTH-MEYER, B. (1987): Étude géologique du cordon littoral III à Yverdon-les-Bains. – *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 78 (3): 321–348.

Kapitel 8

Ökologische Auswirkungen von Seeufermauern

Wolfgang Ostendorp, Ioanna Salvarina und Karl-Otto Rothhaupt ¹



Zur Analyse der ökologischen Auswirkungen von Uferverbauungen empfehlen wir:

- eine hydromorphologische Typisierung der Bauwerke und eine GIS-gestützten Kartierung,
- daraufhin die Ableitung von Szenarien mit dem naturbelassenen Ufer als Basisszenario,
- sowie die Zusammenfassung von szenariobasierten Expertenurteilen zu (abiotischen) Wirkungskomplexen, und zusammen mit den mutmaßlich betroffenen Taxa-Gruppen die Ableitung einer Wirkungsmatrix, und
- die Formulierung eines faktoriellen Untersuchungsplans (verbautes vs. naturbelassenes Referenzufer).

Die Anwendung dieser Vorgehensweise am Bodensee-Nordufer ließ eine Reihe von signifikanten Auswirkungen von Ufermauern auf Wasserbewegungen, Sohltransport, Sedimenttextur, Unterwasservegetation und Makrozoobenthos erkennen.

Dieses Kapitel beschreibt Konzepte zur Untersuchung und Beurteilung der Auswirkungen von Ufermauern mittels szenariobasiertem Expertenurteil und faktoriellen Untersuchungen. Beide Ansätze sind am Bodensee zur Anwendung gekommen. Demnach wirken sich Ufermauern in komplexer Weise auf aquatische, amphibische und terrestrisch lebende Organismengruppen aus. Im aquatischen Bereich spielt die Verstärkung der turbulenten Wasserbewegungen durch Wellenbrechung an der Mauer eine wichtige Rolle, die sich u. a. auf Sedimenttextur, Unterwasservegetation und die wirbellose Bodenfauna auswirkt. Mit ↗ sind Begriffe gekennzeichnet, die im Glossar näher erläutert werden.

UFERBAUWERKE

Weite Uferstrecken mitteleuropäischer Seen sind von **Uferbauwerken** gesäumt. Wenn von kleineren Einbauten (Anlegepfähle, Betonung der Fahrwasser, Bojen-Liegeplätze u. a.) abgesehen wird, handelt es sich um

- Einbauten entlang der ↗Uferlinie, z. B. Holzpalisaden, Erosionsschutzschüttungen, Strandbad-Aufkiesungen, Schüttstein-Deckwerke, verfugte Steinsetzungen, Stützmauern, Spundwände,
- Einbauten quer zur Uferlinie, z. B. Wellenschutzwände, Bühnen, Leitwerke, Hafentmolen,
- komplexe Einbauten, z. B. Steganlagen, Verladeanlagen, Hafenanlagen, Marinas.

Die **uferparallelen Einbauten** sollen die Uferlinie vor Erosion schützen, Erholungsflächen aufwerten (Strandbad-Aufkiesungen), Vorschüttungen stabilisieren und hydraulisch abdichten sowie einen bequemeren Zugang zur Wasserlinie ermöglichen.

Einbauten dieser Art finden sich sowohl an öffentlich genutzten Uferstrecken als auch vor privaten Wochenendhaus- und Dauersiedlungen. An den Alpen- und Voralpenseen dürften Ufermauern zu dem am häufigsten auftretenden Typ gehören. Am Bodensee nehmen sie eine gesamte Länge von 132 km ein, entsprechend 48,5 % der Uferlinie ([3]). Weitere 31,0 % sind durch andere Einbauten, u. a. Steinschüttungen befestigt. Eine detaillierte Analyse der Uferbefestigungen am Bodensee-Untersee ist in [10] zu finden.

Die **uferqueren Einbauten**, die zumeist von der Uferlinie bis in die tieferen Bereiche des Sublitorals reichen, dienen zumeist der Schifffahrt. Sie sollen die an Stegen vertäuten Boote vor Wellengang schützen (Wellenschutzwände), die Versandung von Häfen und Zufahrtsrinnen unterbinden (Hafentmolen), die litoralen Uferlängsströmungen beeinflussen (Bühnen, Leitwerke) oder die Sedimentfracht der Zuflüsse von der Flachwasserzone fernhalten, um eine zu rasche Verlandung zu verhindern (Leitdämme der Flussvorstreckungen). Hafentmolen dienen darüber hinaus als Anlegestellen der Schifffahrt im Fracht-

¹ Wolfgang Ostendorp, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umweltphysik, wolfgang.ostendorp@uni-konstanz.de; Karl-Otto Rothhaupt, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie, karl.rothhaupt@uni-konstanz.de; Ioanna Salvarina, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie, derzeit: Aristotle University of Thessaloniki, School of Biology, Laboratory of Ichthyology, Thessaloniki (Griechenland), iosalvarina@auth.gr.

und Personenverkehr. Auch diese Art von Bauwerken ist an Alpen- und Voralpenseen verbreitet anzutreffen, eine statistische Zusammenstellung fehlt jedoch.

Im Zuge von **komplexen Eingriffen**, z. B. dem Bau eines größeren Hafens oder einer Marina, kommt es häufig zu einer deutlichen Veränderung der aktuellen Uferlinie, verbunden mit Ausbuchtungen (Hafenbecken, Fahrwasser) und Aufschüttungen zur Landgewinnung (Infrastrukturgebäude, Bootslager). Entsprechend vielgestaltig sind die Einbauten, die neben den üblichen Stützmauern auch Rampen, Verladeeinrichtungen, Schiffshallen, Hellinge, Funktionsgebäude usw. umfassen. Auch über Anlagen dieser Art liegen uns keine Zusammenstellungen aus dem Alpenraum vor.

In diesem Kapitel und in den darin enthaltenen Empfehlungen liegt der Schwerpunkt auf uferparallelen Stützmauern (Ufermauern) als der am weitesten verbreiteten Art der Uferbefestigung.

Ufermauern sind senkrechte, hydrodynamisch undurchlässige Bauwerke aus Bruchsteinen oder Betonguss, die eine Vorschüttung stabilisieren, vor Erosion schützen und gegenüber dem See abdichten. Der Zweck besteht zumeist darin, eine klare Grenze zwischen Wasser und dem hinzugewonnenen festen Land zu schaffen und einen bequemen Zugang zur Wasserlinie zu gewährleisten. Die Breite der Vorschüttungen variiert zwischen einem schmalen Streifen von ein bis zwei Metern Breite bis hin zu umfangreichen Landgewinnungen mittels Bauschutt- und Hausmüll-Auffüllung ([10]). Dementsprechend finden sich Ufermauern nicht nur in den Ortskernlagen, sondern auch in der freien Landschaft.

Ufermauern können die **ökologischen Bedingungen** gegenüber dem ursprünglichen naturnahen Zustand (Referenzzustand) auf mehrfache Weise verändern:

- Durch ihre Grundfläche: Durch die Errichtung der Mauer (und die Vorschüttung) werden entsprechend den jeweiligen Abmessungen die ursprünglich vorhandenen Lebensräume vernichtet.
- Durch Schaffung neuer Lebensräume an der Mauerfront: Je nach Bauart und Ausbildung der Mauerverkleidung werden neuartige, flächenmäßig bedeutende Lebensräume geschaffen, die allerdings nur durch wenige Arten der Pflanzen- und Tierwelt genutzt werden können.
- Durch Wirkungen auf benachbarte Lebensräume: Durch die impermeable Mauer kommt es zum Unterbruch der Land-See-Verbindung (eindringendes Seewasser, austretendes Sickerwasser, wandernde Tierarten) und zu Veränderungen des Wellenverhaltens und möglicherweise auch der Uferparallelströmungen im Vorfeld der Mauer.

Von den ökologischen Auswirkungen einer Ufermauer können grundsätzlich alle **Pflanzen- und Tiergruppen** betroffen sein, die zumindest in bestimmten Lebensphasen an die (naturbe-

lassenen) Uferlebensräume gebunden sind. Hierzu gehören neben Unterwasser- und amphibischen Pflanzen auch Ufergehölze, neben obligat aquatischen Makrozoobenthos-Formen auch solche, die nur als Larven diese Lebensräume besiedeln. Außerdem können bestimmte Amphibien-, Reptilien- und Säugetierarten betroffen sein, und auf indirekte Weise auch Vogel- und Fledermausarten ([7]).

Die ökologischen Auswirkungen einer Ufermauer hängen von mehreren Faktoren ab, z. B.

- der Exposition gegenüber Wind- und Schiffswellen,
- dem Sohlniveau am Mauerfuß bzw. der jährlichen Benetzungsdauer durch den Seespiegel,
- dem Vorkommen bzw. Fehlen einer Vorlandvegetation (Röhrichte, Seggenriede),
- der Bauart und der Höhe,
- der Hinterlandnutzung (Vorhandensein bzw. Fehlen naturnaher Biotoptypen),

deren Zusammenwirken nur unzureichend bekannt ist. Im konkreten Fall kann eine Beurteilung anhand von **Expertenurteilen** und/oder anhand von gezielten **Freilanduntersuchungen** vorgenommen werden. Beide Strategien sind mit spezifischen Vor- und Nachteilen behaftet, können sich aber auf sinnvolle Weise ergänzen.

EXPERTENEINSCHÄTZUNGEN

Mitunter gelten Expertenbeurteilungen im Vergleich zu experimentell erzeugten Ergebnissen oder statistisch gesicherten Ergebnissen aus Freilandhebungen als Aussagen minderer Qualität. Tatsächlich aber spielen sie auch in ökologischen Zusammenhängen eine wichtige Rolle, insbesondere dann, wenn fallbezogene Messdaten fehlen oder inkonsistent sind ([5], [13]). Auch bei der Planung empirischer Untersuchungen und bei der Formulierung von ökologischen Modellen sind subjektiv geprägte Vorgaben, Vereinfachungen und Fallauswahlen durch Experten unvermeidlich. Es kommt folglich nicht darauf an, subjektives Expertenwissen auszuschließen, sondern darauf, bestimmte Regeln zu formulieren, nach denen Expertisen vorteilhaft in die Studien einfließen und wie sie für das Fachpublikum sichtbar gemacht werden können ([5]). Wichtige Elemente sind die Schulung von Expertenteams anhand von Testaufgaben oder Szenarien ([1], [4]) und die Heranziehung mehrerer Expertisen, um einer verzerrten Einschätzung vorzubeugen ([1], [2], [4]; vgl. Kapitel 3, S. 27 ff.). Für die Praxis besitzen Expertenbeurteilungen den Vorteil, dass sie schneller und effizienter zu entscheidungsrelevanten Resultaten führen, wobei die Zuverlässigkeit der Aussagen mit der Menge an verarbeitetem Detailwissen, der Realitätsnähe der Szenarien und der Zahl der befragten Experten zunimmt. Auf der Basis dieser Überlegungen haben wir die ökologischen Auswirkungen der Ufermauern am Bodensee-Untersee analysiert ([6], [7]).

Der erste Schritt bestand in der Festlegung der **uferstrukturellen Referenzbedingungen**, die einem Uferabschnitt entsprechen, der keinerlei Uferverbauungen aufweist. Alle weiteren Bedingungen, also auch trophische Belastungen, Schiffsverkehr, hydrologische Veränderungen, Abundanz gebietsfremder Pflanzen- und Tierarten u. a. wurden als gegeben vorausgesetzt.

Der zweite Schritt beinhaltete die Formulierung von **Szenarien**, die aus vorangegangenen Kartierungen abgeleitet wurden ([10]). Das Basisszenario (A) fasst die uferstrukturellen Referenzbedingungen zusammen. Das Szenario B beschreibt ein Ufer mit einer Ufermauer oberhalb der Mittelwasserlinie ohne umfangreiche Aufschüttungen, Gebäude, oder sonstige schwerwiegende strukturelle Veränderungen und ohne intensive (Freizeit-)Nutzungen. Das Szenario C stellt ein Ufer mit Ufermauer unterhalb der Mittelwasserlinie dar, mit umfangreichen Aufschüttungen, Gebäuden und weiteren erheblichen strukturellen Veränderungen und Nutzungen. Beschreibungen und Typ-Fotos dieser Szenarien wurden 27 Fachleuten vorgelegt, die mindestens eine relevante Organismengruppe vertreten können und durch ihre Geländekenntnisse am Bodenseeufer ausgewiesen sind. Die einzelnen Stellungnahmen wurden in synoptischer Form zusammengestellt und von den Expert*innen überarbeitet ([6], [7]).

In einem dritten Schritt wurden hypothetische **Wirkungskomplexe** formuliert ([7]), die die mutmaßlichen Auswirkungen der Mauern in den beiden Szenarien beschreiben und damit einer detaillierten Analyse und empirischen Untersuchung von Fallbeispielen zugänglich machen (in Klammern der Geltungsbereich für eines oder beide Szenarien):

- W1 – die Vielfalt von Biotopelementen in der Wasserlinie wird zugunsten einer monotonen Struktur verringert (Szenario B, C),
- W2 – die Mauern stellen zusätzliche, grundsätzlich besiedelbare Biotope bereit (Szenario B, C),
- W3 – im Vorland verstärken sich durch Wellenreflexion Turbulenzen und Strömungen (Szenario C),
- W4 – als Folge der reflektierten Wellenenergie kommt es im Vorland zu einem Feinmaterial-Austrag sowie zu häufigeren Umlagerungen von Feinsedimenten (Szenario C),
- W5 – die Häufigkeit und Mächtigkeit von Wasserpflanzen-Spülsäumen nimmt ab (Szenario C),
- W6 – die Schilftorf- und Treibholz-Spülsäume nehmen in Szenario B zu, in Szenario C fehlen sie,
- W7 – die hohe und lange Mauer wirkt als Barriere für einige mobile Tierarten (Szenario B, C),
- W8 – durch Überschüttung und Überbauung werden charakteristische Lebensräume großräumig beseitigt (Szenario C),
- W9 – durch Überschüttung und Überbauung werden spezifisch wirksame Biotopelemente beseitigt (Szenario C),
- W10 – die typischen landseitigen Nutzungsstrukturen und Störungen durch den Menschen (Szenario C) beeinträchtigen einige ufertypische Pflanzen- und Tierarten,

W11 – die seeseitigen Nutzungsstrukturen und menschlichen Störungen benachteiligen einige ufertypische Tierarten (Szenario C).

Die Wirkungskomplexe W3 und W4 und ihre Auswirkungen auf Unterwasserpflanzen und Makrozoobenthos wurden später anhand ausgesuchter Untersuchungsflächen vor Hagnau und Kirchberg untersucht (s. u.).

Der vierte Schritt bestand darin, die Auswirkungen der Wirkungskomplexe auf verschiedene Pflanzen- und Tiergruppen auf der Basis der verfügbaren Literatur und der Experten-Stellungnahmen zu **analysieren** und **bewerten** ([6]). Die Ergebnisse wurden zusammenfassend in einer Wirkungsmatrix dargestellt (Tabelle 1).

Die Auswertung der **Wirkungsmatrix** zeigt, dass keineswegs nur die üblicherweise betrachteten (semi-)aquatischen Organismengruppen, nämlich Makrozoobenthos, Fische, Röhrichte und Pflanzen der Strandrasen, betroffen sind, sondern darüber hinaus ein breites Spektrum an terrestrischen Pflanzen- und Tierarten bis hin zu Großpilzen und Fledermäusen. Es ist nicht ersichtlich, dass die rein aquatischen Organismengruppen generell stärker betroffen sind als Pflanzen und Tiere mit semiaquatischer oder terrestrischer Lebensweise. Weiterhin wird deutlich, dass sich die beiden Szenarien B und C in der Summe ihrer Auswirkungen unterscheiden, d. h. eine schlichte, über dem Mittelwasserspiegel gegründete Ufermauer (Szenario B) hat wesentlich geringere Auswirkungen als der Komplex aus tiefliegender Ufermauer, Aufschüttung und intensiver Nutzung (Szenario C).

Die negativen Wirkungen der eigentlichen Ufermauern (Szenario B) gehen überwiegend von der Einschränkung naturnaher Lebensräume (Wirkungskomplex W1) sowie von der Barrierewirkung (W7) für mobile, überwiegend semiaquatische Tierarten aus. Die Mauer wirkt sich in ufernormaler und in Uferlängsrichtung aus: Sie bringt zunächst ein erhebliches Mortalitätsrisiko für die betroffenen Individuen mit sich (z. B. Wasserspitzmaus, Grünfrosch-Arten, Ringelnatter), das sich bis zur Auslöschung von Teilpopulationen (z. B. schlupffreie Libellenlarven, evtl. auch Laufkäfer-Larven) steigern kann. Erst in zweiter Linie erscheinen diejenigen Wirkungskomplexe, die mit der vermuteten Wellenreflexion und Strömungsverstärkung sowie mit der möglicherweise veränderten Abundanz von Spülsäumen zu tun haben. Die zusätzlichen Wirkungen, die im Szenario C hinzukommen, rühren von der Überschüttung und Überbauung charakteristischer Uferlebensräume (W8) sowie aus der Beseitigung kleinräumig ausgeprägter Biotopelemente her (W9), woraufhin die land- und seeseitigen (immateriellen) Nutzungen und Störungen (W10, W11) nicht mehr sehr stark ins Gewicht fallen.

Tab. 1:

Zusammenstellung der mutmaßlichen Auswirkungen der Szenarien B und C auf die Komponenten der Uferbiozönosen an durchschnittlichen Uferabschnitten des Bodensee-Untersees auf Basis der Expertenfrage ([7]). Dargestellt sind die positiven, negativen oder neutralen Auswirkungen von 11 Wirkungskomplexen.

Farbsignaturen: grau – neutrale (0), gelb – negative (-), rot – stark negative Effekte (- -); hellgrün – positive (+), dunkelgrün – stark positive Effekte (++) im Hinblick auf die Überlebenswahrscheinlichkeit von Individuen und den Erhaltungszustand bodenständiger Populationen; blau – innerhalb der funktionellen Gruppe reagieren einige Mitglieder positiv, andere negativ (±); lila – neben positiven treten auch negative Effekte auf (+/-); nicht ausgefüllte Zellen – nicht relevant oder unzureichender Kenntnisstand.

		Wirkungskomplex																					
		W1		W2		W3		W4		W5		W6		W7		W8		W9		W10		W11	
		Szenario		Szenario		Szenario		Szenario		Szenario		Szenario		Szenario		Szenario		Szenario		Szenario		Szenario	
		B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C
Habitat	raum-zeitliche Dynamik	-	-																				
	mosaikartige Verteilung																						
Großpilze	Unterwasser-Pflanzen	0	0			0	0	+	+					0	0	0							-
	Schlammflur-Arten	0	-			+/-	-	+/-	-					0	0	-							0
	Strandrasen-Arten	-	-			+/-	+/-	+	+					0	0	-							-
	Flutrasen-Arten	-	-			±	±							0	0	-							0
	Armleuchteralgen	-	-			-	-	-						0	0	-							-
	Röhricht-Arten	-	-			-	-	-						0	0	-							-
	amphibische Moose des Felsgesteins			++	0																		
	Farne			+	0																		
	Pflanzen der Trockenmauern																						
	Ufergehölz-Arten	0	0																				
	Feuchtgrünland-Arten	0	0																				
	Streuobstwiesen-Arten	0	0																				
	Großpilze																						+/-
	Makrozoobenthos	ständig submers lebende Arten			0	0	±	±	±	±													
Arten mit emerser Imaginalphase				0	0	±	±																-
Libellen-Larven						-	-	-	-					-	-								-
semiaquat. u. terrestrische Wirbellose	bodenlebende Wirbellose	-	-																				
	Laufkäfer (ufertypische Arten)	-	-					+/-						-								-	
Fische	Laich, Larven	0	-			-	-	±	±					0	0								
	Jungfische	-	-			+/-	+/-							0	0							+	
	Adulte					0	0	-	-					0	0								
Amphibien	Grünfrösche		-			-	-						+		-	-							
	Erdkröte													-	-							+/-	
Reptilien	Ringelnatter		-			-	-						+		-	-						+/-	
	Zauneidechse, Blindschleiche																					+/-	
Vögel	Schwimmvögel	0	-			-	-							-	-							+/-	
	Watvögel							±	±														
	Röhrichtbrüter																						
	Singvögel													-									
	sonstige	-	-										-									+	
Kleinsäuger	Wasserspitzmaus, Schermaus, Bisam	-	-			-	-					0		-	-							0	
	Biber	-	-			0	0					0		-	-							0	
	Rötel-, Gelbhals-, Waldmaus			+	0									-	-							+/-	
	Raubsäuger (z. B. Iltis)													-	-							+	
	Kulturfolger (z. B. Igel)																					+	
Fledermäuse			+	0								-	-									0	

FREILANDUNTERSUCHUNGEN

Auf der Basis der Experteneinschätzungen und der daraus abgeleiteten Wirkungsfaktoren können Freiland- und experimentelle Untersuchungen geplant werden, um bestimmte Hypothesen empirisch zu prüfen. Wir haben dies für die Wirkungskomplexe W3 und W4 am Beispiel zweier Uferabschnitte am Bodensee getan und dabei die Auswirkungen auf die Wasserbewegung, die Oberflächensedimente, den Sohltransport, die Phytomasse der Unterwasserpflanzen sowie die Individuendichte des Makrozoobenthos analysiert. Im Anschluss daran wurde der Einfluss von Ufermauern auf das Sohlniveau des äußersten landseitigen Vorkommens von Unterwasserpflanzen (obere Makrophytengrenze, OMG) untersucht.

Vergleichende Untersuchung der Wirkungskomplexe W3 und W4

Als Referenzfläche (Basisszenario A) wurde einer der wenigen naturbelassenen Uferabschnitte am nördlichen Bodenseeufer ausgewählt (Untersuchungsfläche ‚Kirchberg‘ im HyMoBioStrategie-Projekt). Der verbaute Uferabschnitt (Szenario C) befand sich etwa 780 m weiter nordwestlich am östlichen Ortsrand der Gemeinde Hagnau. Die Untersuchungsfläche lag vor einer tiefliegenden Mauer mit großflächigen Hinterfüllungen, deren Mauerfuß ganzjährig überspült ist. Test- und Referenzfläche waren hinsichtlich Exposition, Breite der Uferplattform, Uferneigung und Substrat sehr ähnlich, so dass die erzielten Ergebnisse unmittelbar miteinander vergleichbar sind.

Am mauerbewehrten Abschnitt (HGM) und am naturbelassenen Referenzufer (KBN) wurden zwei Uferzonen ausgeschieden, eine ufernahe Zone (1 bis ca. 3 m Entfernung vor der Mauer bzw. entsprechende Positionen mit gleicher Wassertiefe in KBN) und eine uferferne Zone (5 bis 20/25 m), die jeweils durch drei Probennahmepositionen repräsentiert waren. Die Erwartung war, dass sich die Messparameter in der uferfernen Zone nicht signifikant voneinander unterscheiden, während sich in der ufernahen Zone signifikante Unterschiede zeigen sollten. In diesem Fall war davon auszugehen, dass Unterschiede der Reaktionsgrößen nur auf das Bauwerk, nicht aber auf etwaige standörtliche Unterschiede zwischen den Uferabschnitten zurückgehen. Als Reaktionsgrößen, die im Zusammenhang für W3 und W4 indikativ sind, wurden

- die Intensität der Wasserbewegungen,
- die Korngrößenverteilung der Oberflächensedimente,
- Sohltransportparameter anhand von Tracern (Schwerpunktverlagerung, Dispersion),
- die Phytomasse der Unterwasserpflanzen,
- das Sohlniveau der oberen Makrophytengrenze (OMG),
- die Individuendichte des Makrozoobenthos

ausgewählt. Die Untersuchungen fanden im April 2016, Juli 2017 bzw. im April und Juli 2018 statt.

Die Intensität der Wasserbewegungen wurde durch die Korrosion von Gips-Modellkörpern ermittelt (*gypsum dissolution technique*; GDT, [8]). Hierzu wurden Gips-Halbkugeln von 8 cm Durchmesser und bekannter Trockenmasse hergestellt, an den eingangs genannten Positionen am Seegrund verankert und nach ca. 190 Stunden wieder geborgen, getrocknet und rückgewogen. Die spezifischen Massenverluste ($\Delta m\%$) der Gipskörper sind, wie zahlreiche Untersuchungen in der Literatur gezeigt haben, unter sonst gleichen Bedingungen proportional der gerichteten und der turbulenten Wasserbewegungen.

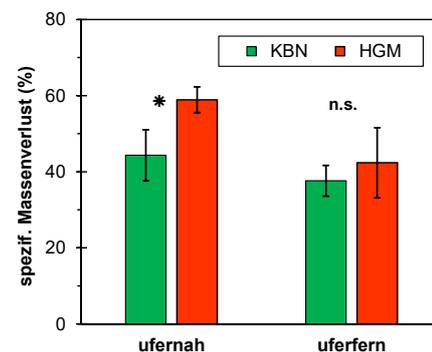


Abb. 1:

Spezifische Massenverluste ($\Delta m\%$) von Gips-Halbkugeln in den ufernahen und uferfernen Zonen der Uferabschnitte KBN (naturnah) und HGM (mit Mauer). Mittelwerte \pm einf. Standardabweichung, $n = 3$; die Mittelwertdifferenzen in der Gruppe ‚ufernah‘ waren signifikant mit $p \leq 0,05$.

Bei unseren Experimenten war $\Delta m\%$ vor der Ufermauer (HGM) signifikant höher als am naturnahen Ufer bei gleicher Wassertiefe, während sich im uferfernen Bereich keine signifikanten Unterschiede ergaben (Abbildung 1). Diese Ergebnisse und eine ausführliche Diskussion der hydrodynamischen Vorgänge an Ufermauern bei auflandigen Windereignissen ([12]) stützen den postulierten Wirkungskomplex W3.

An den eingangs erwähnten Positionen wurden Oberflächensedimentproben entnommen, um den Wirkungskomplex W4 zu analysieren. An beiden Uferabschnitten dominierte Grobkies (GG), der etwa 20–53 Gew.-% ausmachte, gefolgt von mittelgroben Sedimenten (GS+FG+MG) mit etwa 18 bis 58 % (Abbildung 2). Den Rest nahmen die Feinsedimente (T bis MS) ein. In der uferfernen Zone waren keine greifbaren Unterschiede zwischen KBN und HGM festzustellen, so dass anzunehmen ist, dass etwaige Unterschiede im geologischen Ausgangsmaterial und im Wellenangriff von untergeordneter Bedeutung sind. Im ufernahen Bereich jedoch wiesen die vor der Mauer liegenden Sedimente einen deutlichen Überschuss an

mittelgroben Sedimenten auf, während Feinsedimente fast völlig fehlten ([12]). In beiden Fällen waren die Mittelwertdifferenzen zwischen HGM und KBN signifikant (Welch-Test, $p \leq 0,05$).

Dieses Ergebnis legt den Schluss nahe, dass vor der Ufermauer die Feinsedimente durch die verstärkten Wasserbewegungen ausgeschwemmt wurden, wodurch sich die mittelgroben Fraktionen anreicherten. Der Massenanteil des Grobmaterials war annähernd gleich, d. h. Grobkies und Gerölle wurden vor der Mauer wahrscheinlich nicht oder jedenfalls nicht stärker mobilisiert als am naturnahen Ufer.

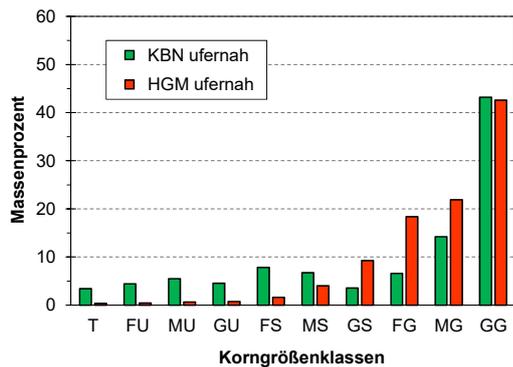


Abb. 2:

Mittlere Korngrößenverteilungen der ufernahen Oberflächensedimente (1 m, 2 m, 3 m) des naturbelassenen Uferabschnitts (KBN) und des mauerbewehrten Ufers (HGM). T, U, S, G – Ton, Silt, Sand, Kies; F, M, G – fein, mittel, grob.

Das Ausmaß des Wellenangriffs auf die Gewässersohle und der Sohltransport wurden anhand von Tracer-Experimenten untersucht ([9]; vgl. Kapitel 7, S. 81–82). Hierzu wurden an beiden Uferabschnitten Rasterfelder mit $7 \times 7 = 49$ Zellen von je $0,20 \times 0,20$ m Größe abgesteckt. Die in der Mitte liegenden Felder wurden mit magnetischen Tracern (Fe-Polypropylen-Compound) der Kornklassen ‚feiner Feinkies‘ (fFG, 2,0–2,5 mm), ‚grober Feinkies‘ (gFG, 4,5–5,0 mm) und ‚grober Mittelkies‘ (gMG, 14–18 mm) beschickt. Unter dem Einfluss zweier Starkwindereignisse aus südlichen Richtungen (SSE, S: 7 Stunden, 3–5 Bft) am 12.04.2018 und aus westlichen Richtungen (W, WNW: 18 Stunden, 3–5 Bft) am 13.04.2018 wurden die Tracer korngrößenabhängig über das Rasterfeld verteilt. Die Abbildung 3 zeigt die Verteilung nach rd. 315 Stunden Expositionsdauer. Während in KBN die Tracer zu 76,5 % der eingesetzten Anzahl noch am Ausgangsort lagen, hatten sich die Tracer in HGM über nahezu die gesamte Rasterfläche ausgebreitet. Betrag in KBN die Wiederfindungsquote noch knapp 98 %, so waren es in HGM nur noch 69 %; offenbar waren viele Tracer bereits aus der Rasterfläche hinaus geschwemmt worden. Der Schwerpunkt der Tracerwolke hatte sich hier um 0,27 m verlagert gegenüber 0,02 m in KBN. Ein weiteres Kenn-

zeichen war die breite Dispersion der Tracer (mittlere Distanz zum Schwerpunkt 0,32 m gegenüber 0,06 m).

Diese Ergebnisse zeigen, dass die erhöhten Wasserbewegungen vor der Mauer, namentlich bei Starkwindereignissen, in die Sedimentoberfläche eingreifen und an der Gewässersohle zu Transportprozessen führen. Damit erklärt sich auch die Ausschwemmung von Feinsedimenten, wie sie in Abbildung 2 zum Ausdruck kommt.

Die Ergebnisse der Freilandprobenahmen und -experimente zur Intensität der Wasserbewegungen sowie zum Sohltransport und zur Sedimenttextur unterstreichen die Bedeutung der postulierten Wirkungskomplexe W3 und W4. In einem nachfolgenden Schritt wurden die Auswirkungen von W3 und W4 auf Unterwasserrasen und Makrozoobenthos untersucht.



Abb. 3:

Verteilung der magnetischen Fe-PP-Tracer (Kornklasse fFG) in den Rasterflächen von KBN (naturnahes Ufer, 0,21 m unter mittl. Niedrigwasser) und HGM (mauerbewehrtes Ufer, 0,8 bis 1,2 m vor der Mauerfront, 0,16 m unter mNW); die x- und y-Koordinaten (m) der geometrischen Schwerpunkte der Zellen sind grau unterlegt, die seeseitige Richtung von der Basislinie ist negativ abgetragen. Die Ziffern in den Zellen geben die relative Häufigkeit der Tracer (% der eingesetzten Anzahl) wieder. Die Zellen, in denen die jeweilige Fraktion eingebracht wurde, sind dick umrahmt.

Auswirkungen auf die Besiedlung mit Unterwasserrasen

An den genannten Positionen in KBN und HGM wurde im Juli 2017 die Phytomasse-Dichte der Unterwasservegetation (Rauhe Armleuchteralge, *Chara aspera*, u. a.) bestimmt ([12]). Während sich in der uferfernen Zone keine signifikanten Unterschiede ergaben, war die ufernahe Zone vor der Ufermauer nahezu vegetationsfrei (Abbildung 4) und unterschied sich damit hochsignifikant von den entsprechenden Positionen in KBN (t-Test, $p > |t| = 0,03$). Wir nehmen an, dass der mechanische Stress durch die turbulente Wasserbewegung vor der Ufermauer in Verbindung mit der Abrasionswirkung der transportierten Sandkörner, vielleicht aber auch die fortwährende Ausschwemmung von Diasporen eine wichtige Rolle spielt.

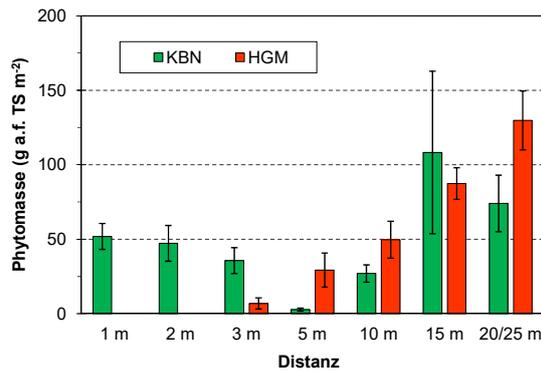


Abb. 4:

Phytomasse-Dichte der Unterwasservegetation (aschefreie Trockensubstanz, Mittelwert \pm einf. Standardabweichung) der ufernahen (1 m, 2 m, 3 m) und der uferfernen Zone (5 m, 10 m, 15 m, 20/25 m) des naturbelassenen Uferabschnitts (KBN) und des mauerbewehrten Ufers (HGM).

Auswirkungen auf die obere Makrophytengrenze (OMG)

Anhand von 20 Paaren von mauerbewehrten und unverbauten Uferabschnitten (Test-, Referenzflächen) entlang des nördlichen Ufers von Überlingersee und Obersee wurde die OMG10 untersucht, also das Sohlniveau der landwärtigen Vorkommen von Unterwasserpflanzen, bei dem ein Deckungsgrad von mindestens 10 % erreicht wird, während im seichteren Wasser der Deckungsgrad geringer ist und zur Tiefe hin zunimmt ([10]).

Die OMG10 der Test- und der Referenzflächen zeigte eine hochsignifikante Abhängigkeit von der jährlich durchschnittlichen Wellenbelastung, so dass zu vermuten ist, dass Brandung und Wasserbewegungen zu den maßgeblichen Faktoren zählen, die das Sohlniveau der OMG bestimmen.

Seeufermauern können sich

- direkt auf dem Wege der Lebensraumvernichtung durch Überbauung und Überschüttung und
- indirekt durch die Folgen, die sich aus der Reflexion von Wellen ergeben,

auf die Lage der OMG10 auswirken. Direkte Auswirkungen sind zu erwarten, wenn der Mauerfuß unterhalb von 394,79 m ü. NHN liegt, d. h. rd. 0,44 m unterhalb des mittleren Mittelwasserspiegels im Bodensee-Obersee. An verbauten Uferabschnitten mit höher liegenden Mauern ist stattdessen mit indirekten Auswirkungen zu rechnen, die nach den eingangs geschilderten Ergebnissen auf die Wellenreflexion an der Mauer zurückgehen. Sie sorgen für eine vertikale Verlagerung der OMG10 um im Mittel 0,09 m. Bei einer mittleren Uferneigung von 1:25 entspricht dies einer seewärtigen Verlagerung von etwa 3 m. Vegetationsfreie Streifen in dieser Größenordnung waren vor einigen Ufermauern deutlich zu erkennen (Abbildung 5). Weiter in das Sublitoral hinausreichende Auswirkungen von Ufermauern waren nicht auszumachen. Obschon die



Abb. 5:

Obere Makrophytengrenze. (a) seeseitiger Schilfgürtel mit Unterwasservegetation (*Chara* spp.) auf einer Referenzfläche. (b) vegetationsfreier Streifen vor einer Ufermauer.

Ergebnisse statistisch gesichert sind, waren die Streuungen erheblich, so dass sich im Einzelfall andere Verhältnisse ergeben können.

Auswirkungen auf das Makrozoobenthos

Im April 2016 wurden an den erwähnten Positionen vor KBN und HGM quantitative Makrozoobenthos (MZB)-Proben entnommen, nach höheren Taxa bestimmt und nach einem abgestuften Stichprobenverfahren ausgezählt ([12]). In der uferfernen Zone waren die MZB-Individuendichten nicht signifikant verschieden, während in der ufernahen Zone eine signifikante Abnahme auf rd. 3.400 bis 8.500 Ind./m² sichtbar wurde (Abbildung 6). Da der Unterwasserpflanzenbewuchs zum Zeitpunkt der Probennahme noch keine Rolle spielte, nehmen wir an, dass der erhöhte hydrodynamische Stress vor der Ufermauer, verbunden mit dem weitgehenden Verlust der Feinsedimentfraktion, zu diesem Ergebnis geführt hat.

Weiterhin können die Makrozoobenthos-Proben der naturbelassenen Referenz-Untersuchungsflächen Kirchberg (KI) mit denen der Fläche Unteruhldingen (UU) verglichen werden, die im Herbst 2015 sowie im Frühjahr 2016 in jeweils etwa 0,45 m Wassertiefe (d. h. ungefähre mittlere Niedrigwasserlinie) und in 1 bis 2 m Entfernung von der Ufermauer (UU) entnommen wurden.

Die Gesamt-Individuendichte war im Frühjahr auf der Fläche KI höher als vor UU, während im Herbst das Gegenteil der Fall war

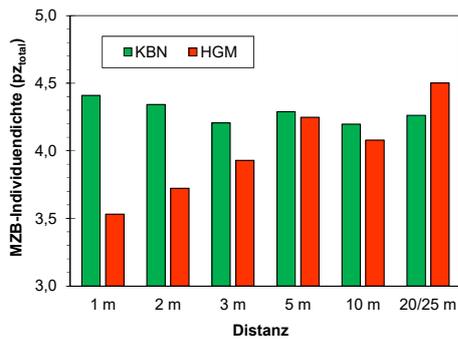


Abb. 6:

Individuendichte des Makrozoobenthos der ufernahen (1 m, 2 m, 3 m) und der uferfernen Zone (5 m, 10 m, 15 m, 20/25 m) des naturbelassenen Uferabschnitts (KBN) und des mauerbewehrten Ufers (HGM). Die Dichte ist logarithmisch dargestellt ($pz_{total} = \log(z/z_0)$, $z_0 = 1 \text{ m}^{-2}$).

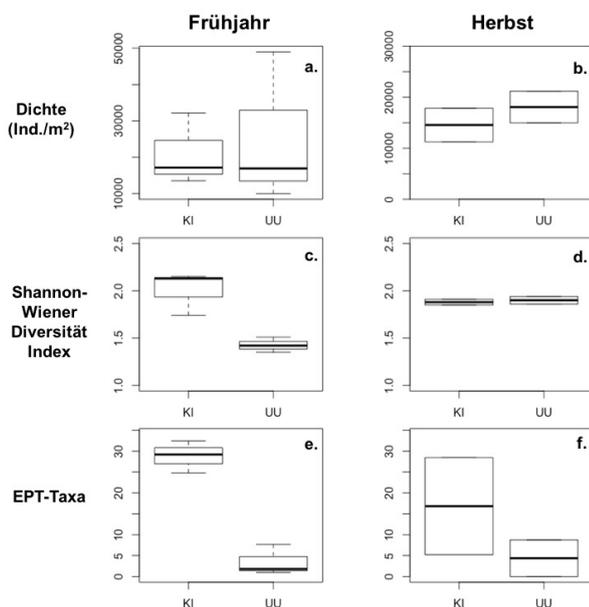


Abb. 7:

Biozönotische Merkmale von Makrozoobenthos-Proben auf der naturbelassenen Referenzfläche Kirchberg (KI) und vor einer Ufermauer der Untersuchungsfläche Unteruhldingen (UU). Links: Probennahme im Frühjahr 2016, n = 3 (KI), n = 3 (UU); rechts: Probennahme im Herbst 2015, n = 2 (KI), n = 2 (UU). Boxplot-Darstellung mit Median (fett), 25%- und 75%-Quantilen sowie Minimum und Maximum.

(Abbildung 7a, b). Allerdings war keiner der Unterschiede statistisch signifikant. Auch der SHANNON-WIENER-Diversitätsindex verhielt sich in beiden Jahreszeiten unterschiedlich (Abbildung 7c, d), mit höheren Werten in KI als in UU im Frühjahr (ANOVA, $df = 1$, $F = 16,9$, $p = 0,015$) und der gegensätzlichen Beobachtung im Herbst (allerdings nicht signifikant), was anzeigt, dass dieser Index wohl kein verlässlicher Indikator für den Einfluss von Ufermauern auf Makrozoobenthos-Gemeinschaften ist.

Der EPT-Taxa-Index (Prozent der Ephemeroptera-Plecoptera-Trichoptera-Taxa) war in beiden Jahreszeiten in KI höher als in

UU (Abbildung 7e, f), wenn auch statistisch signifikant nur im Frühjahr (ANOVA, $df = 1$, $F = 68,5$, $p = 0,001$). Dieser Index scheint sensibler für Veränderungen zu sein, er spiegelt die naturnähere Habitatstruktur in Kirchberg, verglichen mit der Situation mit Ufermauern in Unteruhldingen, besser wider und ist daher besser geeignet für das Monitoring der WRRL-Qualitätskomponente Makrozoobenthos.

FAZIT UND EMPFEHLUNGEN

Seeufermauern haben komplexe Auswirkungen, die aquatische, amphibische und terrestrische Lebensräume, Arten und Biozöten betreffen. Szenariobasierte Expertenmeinungen sind ein geeignetes Mittel, um diese Komplexität zu strukturieren (Wirkungskomplexe) und zu praktisch verwertbaren Erkenntnissen zu gelangen. Sie geben überdies eine Anleitung zur Formulierung von überprüfbareren Arbeitshypothesen.

Auf dieser Basis haben wir geprüft, ob sich Ufermauern auf die rein aquatischen Vorland-Habitats auswirken können. Am Beispiel einer Ufermauer in Hagnau konnten wir nachweisen, dass Ufermauern die Wasserbewegung und den Sedimenttransport an der Gewässersohle verstärken, was zu dem Verlust der Feinsedimentfraktion führt. In der Folge werden die Phytomasse der Unterwasservegetation und – zumindest in diesem Beispiel – die Individuen-Dichte des Makrozoobenthos signifikant verringert. Generell kommt es vor den Ufermauern des wellenexponierten Bodensee-Nordufers zu einer seewärtigen Verschiebung der oberen Grenze des Unterwasserpflanzenvorkommens (OMG). Allerdings ist lediglich ein schmaler Streifen von rd. 3 m Breite von diesen Auswirkungen betroffen, was angesichts einer Breite der Uferplattform von rd. 100 bis 200 m nur wenige Prozent der litoralen Lebensräume ausmacht.

Die Expertenmeinungen lassen nicht erkennen, dass aquatische Lebensräume stärker betroffen sind als amphibische oder terrestrische. Entsprechende Nachweise für die amphibische und terrestrische Zone stehen zwar derzeit noch aus, ließen sich aber durch die von uns aufgezeigte Vorgehensweise gewinnen. Auf die gleiche Weise können auch die Auswirkungen anderer Formen des Uferverbau untersucht und mit denen von Ufermauern verglichen werden.

Für die Planung ähnlich gelagerter Untersuchungen, einschließlich der Erfolgskontrolluntersuchungen von Uferrenaturierungen empfehlen wir eine abgestufte Vorgehensweise, die mit der hydromorphologischen Erfassung von relevanten Uferstrukturen beginnt. Im nächsten Schritt sollten szenariobasierte Expertenurteile ausgewertet und Wirkungsfaktoren (bzw. Erfolgskriterien im Falle von Uferrenaturierungen) formuliert werden, die dann durch gezielte Vergleichsuntersuchungen im Freiland geprüft werden können. Die Erstellung einer Wirkungsmatrix hilft dabei, die relevanten bzw. indikativen Organismengruppen zu identifizieren.

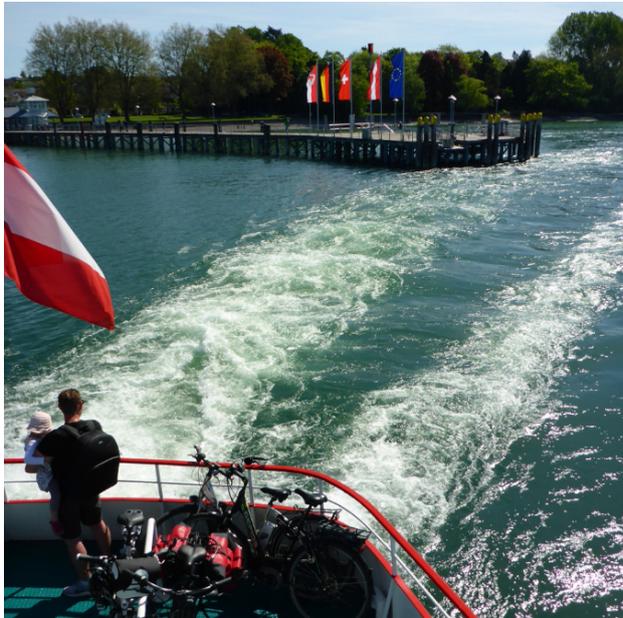
QUELLENVERZEICHNIS

- [1] AYYUB, B. M. (2001): Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks. – CRC, Press, Boca Raton, 328 S.
- [2] CLEMEN, R. T. und WINKLER, R. L. (1999): Combining probability distributions from experts in risk analysis. – *Risk Analysis* 19 (2): 187–203.
- [3] IGKB, INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE (2006): Bodensee-Uferbewertung. – Mehrseitiges Faltblatt, mit Erläuterungen. URL <www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/bowis/uferbewertung_netzversion.pdf> (zuletzt aufgerufen im Dez. 2018).
- [4] KNOL, A. B., SLOTTJE, P., VAN DER SLUIJS, J. P. und LEBRET, E. (2010): The use of expert elicitation in environmental health impact assessment: a seven step procedure. – *Environmental Health* 9 (19). DOI: 10.1186/1476-069X-9-19.
- [5] KRUEGER, T., PAGE, T., HUBACEK, K., SMITH, L. und HISCOCK, K. (2012): The role of expert opinion in environmental modelling. – *Environmental Modelling & Software* 36: 4–18.
- [6] OSTENDORP, W. (2014a): Auswirkungen der Ufermauern am Bodensee-Untersee auf die litorale Fauna und Flora: Ergebnisse szenariobasierter Expertenurteile. – *Mitteilungen des Badischen Landesvereins für Naturkunde und Naturschutz N.F.* 21/3: 371–404.
- [7] OSTENDORP, W. (2014b): Ökologische Auswirkungen von Ufermauern und Uferaufschüttungen am Bodensee-Untersee: Ergebnisse einer Expertenbefragung. – *Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft* 67: 85–103.
- [8] OSTENDORP, W. (2018a): Einsatz von Gips-Halbkugeln zur Indizierung der Intensität der Wasserbewegung im Bodensee-Litoral. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, ii + 11 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.013.
- [9] OSTENDORP, W. (2018b): Quantifizierung des Sohltransports anhand von Rasterfeld-Experimenten am nördlichen Bodensee-ufer. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, ii + 14 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.012.
- [10] OSTENDORP, W. (2018c): Die obere Makrophytengrenze (OMG) am nördlichen Bodensee-Oberseeufer. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, ii + 24 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.008.
- [11] OSTENDORP, W. und OSTENDORP, J. (2014): Uferverbauungen und Uferaufschüttungen am Bodensee-Untersee. – *Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft* 67: 47–81.
- [12] OSTENDORP, W., HOFMANN, H., TEUFEL, L. und MILER, O. (2019): Effect of a retaining wall and an artificial embankment on water motion, bedload transport, littoral sediments, macrophyte biomass and macroinvertebrate community structure. – *Hydrobiologia*, im Druck.
- [13] RYKIEL, E. J. (1989): Artificial intelligence and expert systems in ecology and natural resources management. – *Ecological Modelling* 46: 3–8.

Kapitel 9

Die Fahrgastschifffahrt als Stressor in der Flachwasserzone von Seen

Hilmar Hofmann, Ioanna Salvarina, Karl-Otto Rothhaupt, Martin Wessels und Wolfgang Ostendorf ¹



Die Schifffahrt ist ein bedeutender Stressor in der Flachwasserzone von Seen mit Auswirkungen auf das Wellenklima, den Feststoffhaushalt und die Biozöosen. Zur Reduktion dieser Wirkungen empfehlen wir:

- eine moderierte Diskussion mit Nutzern und Interessensvertretern zur Verringerung der Auswirkungen der Schifffahrt,
- eine Geschwindigkeitsreduktion vor allem bei uferparalleler Fahrt,
- Anpassung der Schiffsrouten und verbindliches Gewährleisten der Einhaltung eines Mindestabstands von 300 m zum Ufer,
- Anpassung der An- und Ablegemanöver mit dem Ziel der Reduktion der Sedimenterosion,
- technische Optimierung der Schiffsrümpfe und der Antriebe bei Um- oder Neubau von Schiffen.

Die Schifffahrt und die damit verbundene Infrastruktur (z. B. Häfen und Steganlagen) beeinflussen die Flachwasserzone von Seen. Dieses Kapitel skizziert die Problemlage, beschreibt die besonderen Eigenschaften von Schiffswellen und verdeutlicht anhand von Beispielen die spezifischen Auswirkungen auf die Erosion von Sedimenten, die Flachwasserbiozönose und den Erhaltungszustand archäologischer Unterwasserdenkmäler. Dabei stehen besonders die Auswirkungen an- und ablegender Fahrgastschiffe im Bereich von Häfen bzw. Anlegern im Fokus. Am Ende des Kapitels werden Handlungsempfehlungen ausgesprochen, die sowohl kurzfristig umzusetzende als auch langfristig angelegte Maßnahmen umfassen, um eine nachhaltige Reduktion der durch Schiffe verursachten Wellenbelastung zu erreichen. Die Belastungen durch die Sportschifffahrt (Lärm, Wellen, Bedarf an Infrastruktur, Antifouling-Beschichtungen etc.) waren nicht Gegenstand unserer Untersuchungen. Begriffe, die im Glossar näher erläutert werden, sind mit einem ↪ gekennzeichnet.

UMWELTBELASTUNGEN DURCH DIE SCHIFFFAHRT

Die meisten Alpenseen mit einer Größe von mehr als 5 km² sind schiffbar, d. h. sie dürfen von der Fracht- und Fahrgastschifffahrt und teils auch der motorisierten Sportschifffahrt genutzt werden. Die Schifffahrt wirkt sich in unterschiedlicher Weise auf die hydromorphologischen Bedingungen der Uferzone aus, d. h. durch

- Installation von Infrastruktur für die Schifffahrt wie Häfen, Steganlagen, Bojenfelder, Land- und Wasserliegeplätze, Schutzdämme, Seezeichen u. a.,

- Beseitigung von Schifffahrtshindernissen, z. B. Findlinge, Untiefen einschließlich der Austiefung und Unterhaltung von Schifffahrtsrinnen, Steganlagen und Hafenbecken,
- großräumige Erzeugung von Wellen bei der Vorbeifahrt,
- lokale Erzeugung von Wellen und Strömungen bei An- und Ablegemanövern.

Hinzu kommen weitere Wirkungen durch

- direkte mechanische Schäden durch Kontakt mit dem Rumpf oder dem Propeller (Unterwasservegetation),

¹ Hilmar Hofmann und Wolfgang Ostendorf, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umweltphysik, hilmar.hofmann@uni-konstanz.de, wolfgang.ostendorf@uni-konstanz.de; Ioanna Salvarina, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie, derzeit: Aristotle University of Thessaloniki, School of Biology, Laboratory of Ichthyology, Thessaloniki (Griechenland), iosalvarina@auth.gr; Karl-Otto Rothhaupt, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie, karl.rothhaupt@uni-konstanz.de; Martin Wessels, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Institut für Seenforschung (ISF), martin.wessels@lubw.bwl.de.

- visuelle Störung in der Vorbeifahrt (Wasservögel),
- Propeller- bzw. Kavitationsgeräusche und Vibrationen der Hülle (Fische),
- Abgasbelastungen durch Diesel- und Otto-Viertakt-Motoren, in vielen Fällen auch durch Zweitaktmotoren, die ein Benzin-Öl-Gemisch verbrennen ([12]).

Damit kann sich die Schifffahrt auf

- den Feststoffhaushalt der Gewässersohle (Litoralsedimente),
- die Stabilität des naturnahen Seeufers in der Wasserlinie (Ufererosion),
- den (lokalen) Nährstoffgehalt und die Trophie des Gewässers (Resuspension von Oberflächensedimenten),
- die Qualität des Seewassers im Hinblick auf seine Trinkwassernutzung (organische und anorganische Spuren-schadstoffe),
- die Häufigkeit von einheimischen und von gebietsfremden Arten (Verschleppung durch gebietsfremde Wanderboote) sowie die Zusammensetzung der litoralen Biozöosen, und
- die Erhaltungsbedingungen von prähistorischen Kulturschichten und Pfahlfeldern (Sohlerosion, Notwendigkeit von Erosionsschutzmaßnahmen)

auswirken. Drei der letztgenannten Faktorenkomplexe berühren die Umweltziele der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL; [2]), der letztgenannte Faktorenkomplex betrifft die Seeufer-Stationen des seriellen UNESCO-Weltkulturerbes ‚Pfahlbauten rund um die Alpen‘ (vgl. Kapitel 10).

Vor diesem Hintergrund sind die Auswirkungen der Schifffahrt von erheblicher ökologischer und kultureller Bedeutung. Im Folgenden wird vornehmlich auf die Wellen- und Strömungswirkungen eingegangen, während einzelne Aspekte der uferstrukturellen Änderungen im Kapitel 3 behandelt wurden. Wir beschränken uns hier auf die Kursschifffahrt (☞ Fahrgastschiffe

und -boote; Fahrzeug- und Personenfähren), die regelmäßig auf festen Kursen und mit den größten Schiffseinheiten verkehrt. Hinsichtlich der Charterfahrten und der sonstigen Berufsschifffahrt sowie des Verkehrs von Sportbooten (☞ Vergnügungsschifffahrt) und sonstiger Wasserfahrzeuge ist die Datenerhebung unzureichend, so dass hier auf eine Diskussion verzichtet werden muss.

Die Auswirkungen der fahrenden Schifffahrt auf Seen hängen zunächst von der Anzahl des Schiffsbestandes, den örtlichen Befahrungsregeln und der Frequenz bzw. der zurückgelegten Fahrtstrecken/-routen und Fahrtzeiten ab (s. unten).

Das von Schiffen individuell erzeugte Wellenfeld (z. B. Wellenhöhe und Wellenperiode) und damit die Wellenbelastung der Uferzone durch einzelne Schiffstypen hängt vor allem von deren Bauweise ab, z. B. der Verdrängung, Rumpfbauform und -typ und Antrieb (Art und Position des Antriebs). Weitere Kriterien sind vor allem die Schiffsgeschwindigkeit und die damit verbundene Fahrweise (Verdrängungsfahrt oder Gleitfahrt). Das vorliegende Kapitel stellt empirische und modellbasierte Ansätze vor, mit denen die Hydro- und Morphodynamik in Seen differenziert untersucht, charakterisiert und bewertet werden kann. Dies wird anhand verschiedener Anwendungsbeispiele vom Bodensee vorgestellt und dient als Muster für andere Seen. Das Kapitel schließt mit Empfehlungen für das praxisnahe Handeln ab.

DIE NUTZUNG DES SEES DURCH FAHRGASTSCHIFFE UND FÄHREN

Schiffsbestand

Der Bestand an Fahrgastschiffen und -booten, die im Charter- und Kursverkehr auf den 87 größten Alpenseen ($A_0 > 3,16 \text{ km}^2$) fahren, liegt bei 408 Einheiten (Tabelle 1). Den weitaus größten Teil nehmen kleinere Fahrgastboote (zugelassene Perso-

Tab. 1:

Bestand an Fahrgastschiffen und anderen Wasserfahrzeugen auf den Alpenseen ($A_0 > 3,16 \text{ km}^2$), nach eigenen Recherchen (Websites der lokalen Betreiber, Stand Frühjahr 2019); AT, CH und DE ohne Bodensee.

	AT	CH	DE	FR	IT	SLO	Bodensee
Anzahl Seen (>3,16 km ²)	15	24	14	10	21	1	2
Solar-/Elektroboote (<125 Pers.)	0	1	0	0	1	1	6
Fahrgastboote (<125 Pers.)	17	32	24	7	14	0	23
Fahrgastschiffe (>125 Pers.)	24	74	31	5	32	0	40
Schaukelradschiffe (>125 Pers.)	0	15	0	0	3	0	1
Katamarane (> 125 Pers)	0	0	0	4	9	0	3
Tragflügel-Schiffe (>125 Pers.)	0	0	0	0	10	0	0
Kfz/Pers.-Fähren (>125 Pers.)	0	6	0	0	16	0	9

nenzahl <125) und Fahrgastschiffe (>125 Pers.) mit konventionellem Rumpf und Antrieb ein. Die mittlere Zahl der Schiffe nimmt proportional zur Oberflächengröße des Sees zu. Auf dem Bodensee fahren allerdings etwa doppelt so viele Einheiten wie auf anderen Alpenseen der gleichen A₀-Größenklasse.

Über den gesamten Schiffsbestand auf dem Bodensee informiert die Bodensee-Schiffsstatistik². Ende 2016 waren 60.444 Wasserfahrzeuge registriert, darunter 72 Fahrgastschiffe im weiteren Sinne. Hierzu zählen die ganzjährig verkehrenden sechs Fahrzeug- und Personenfähren zwischen Meersburg und Konstanz-Staad sowie die drei KfZ-Fähren zwischen Friedrichshafen und Romanshorn. Weiterhin gehören drei Katamarane dazu, die zwischen Konstanz und Friedrichshafen pendeln, sowie die 34 Fahrgastschiffe der vier großen Schifffahrtsbetriebe am See, die überwiegend im Sommerhalbjahr im Kurs- sowie im Charterbetrieb fahren (Tabelle 2). Hinzu kommen weitere 26 meist kleinere Schiffe mehrerer Betreiber, die lokal im Linienbetrieb sowie für Ausflugs- und Charterfahrten eingesetzt werden.

Tab. 2:

Eigenschaften der auf dem Bodensee fahrenden Schiffe (nach Angaben der Betreiber).

	Kfz- und Personenfähren	Fahrgastschiffe	Katamarane
Länge ü. a. (m)	55-72	20-62	33,6
Breite ü. a. (m)	12-13	4-13	7,6
Verdrängung (t)	340-900	50-510	60
typ. Geschwindigkeit (km h ⁻¹)	22-24	20-28	15-32
Passagiere	500-700	50-1200	182
Anzahl	9	60	3

Befahrungsregeln

Für den Bodensee sind Befahrungsregeln in der Bodensee-Schifffahrts-Ordnung (BSO) niedergelegt. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit, die für alle Wasserfahrzeuge in der Vorbeifahrt gilt, liegt bei 40 km h⁻¹ (BSO, Art. 6.02). Im Übrigen wird zwischen Vorrangfahrzeugen, Fischereifahrzeugen und der sonstigen Schifffahrt (z. B. die sog. Vergnügungsschiffahrt) unterschieden. Fahrgastschiffe im Linienverkehr sind in jedem Fall Vorrangfahrzeuge (Art. 1.15 BSO), für die bestimmte Befahrungsbeschränkungen nicht gelten. Sie dürfen auch innerhalb einer 300 m breiten ufernahen Zone mit einer Maximalgeschwindigkeit von 40 km h⁻¹ fahren, um an- oder abzulegen (Art. 6.11 BSO). Besondere Regeln gelten u. a. im Seerhein,

aber auch hier dürfen Vorrangschiffe sowie nicht bevorrechtigte Fahrgastschiffe doppelt so schnell fahren wie Vergnügungsschiffe.

Die zulässige Geschwindigkeit von 40 km h⁻¹ wird derzeit von keinem Fahrgastschiff bzw. keiner Fähre auf dem Bodensee erreicht. Die Reisegeschwindigkeit des Katamarans beträgt aktuell 32 km h⁻¹, die der anderen Schiffe liegt bei etwa 24-28 km h⁻¹.

Schiffsrouten und Schiffsbewegungen

Am Bodensee werden durch die Kursschiffahrt 54 Häfen und Schiffsanleger angelaufen (Abbildung 1). Viele Landstellen werden mit mehreren Kursen angefahren, wobei sich insgesamt 147 Routen ergeben (Daten nach Fahrplänen von 2017). Sonder- und Charterfahrten sind hier wie auch bei den folgenden Zahlen nicht enthalten; ihre Zahl kann derzeit nicht zuverlässig geschätzt werden.

Auf den 147 Routen fanden insgesamt etwa 170.000 fahrplanmäßige Schiffsbewegungen statt, d. h. Fahrten zwischen jeweils einem Start- und einem Zielpunkt. Die gesamten Fahrzeiten beliefen sich auf ca. 60.000 Stunden; davon waren etwa 23 % Uferparallelfahrten, v. a. im Bodensee-Längsverkehr zwischen Meersburg und Bregenz sowie zwischen Kreuzlingen und Rorschach. Der größte Teil des Verkehrs fand auf dem freien See statt. Dort hatten die ganzjährig verkehrenden KfZ- und Personenfähren³, bezogen auf die gesamten Fahrzeiten, einen Anteil von etwa 53 %.

Von den insgesamt etwa 13.000 Stunden uferparalleler Fahrten entfallen 55 % auf das nördliche Obersee-Ufer und nur 21 % auf das südliche Ufer. 11 % der Fahrtzeit liegt im Überlingersee, 13 % im Untersee. Besonders frequentiert ist die Strecke zwischen Immenstaad und Friedrichshafen (12 %). Bezogen auf einen Kilometer Fahrtstrecke ist die Strecke Immenstaad/Hagnau mit bis zu 22 Vorbeifahrten pro Tag am stärksten belastet.

Wenn man von den ganzjährig verkehrenden KfZ- und Personenfähren absieht, findet der größte Teil des Verkehrs während der Zeit von April bis Oktober statt. Dies ist gleichzeitig die Periode, in der der Pegel des Bodensees aufgrund der Schneeschmelze im alpinen Einzugsgebiet ansteigt, sein jährliches Maximum erreicht und wieder absinkt. Für die Wellenbelastung durch die Uferparallelfahrten ist es von Bedeutung, bei welchem Wasserstand die Fahrten stattfinden (vgl. Kapitel 6). Die

² Die Bodensee-Schiffsstatistik wird alle zwei Jahre durch das Amt der Vorarlberger Landesregierung zusammengestellt <http://www.vorarlberg.at/vorarlberg/wirtschaft_verkehr/wirtschaft/maschinenwesen/start.htm>.

³ Kurse zwischen Konstanz-Staad und Meersburg-Fährhafen und zwischen Friedrichshafen und Romanshorn (KfZ-/Personenfähren), Konstanz und Friedrichshafen (Katamaran) und Wallhausen und Überlingen (Personenfähre).

Wellenerzeugung durch Schiffe

Jedes fahrende Schiff verursacht eine Störung des Wasserkörpers um sich herum, welche ein typisches Muster mit Wellen unterschiedlicher Längen, Phasengeschwindigkeiten und Fortpflanzungsrichtungen erzeugt (Abbildung 3). Die längsten und schnellsten Wellen pflanzen sich mit der gleichen Geschwindigkeit und in die gleiche Richtung fort wie das Schiff und heißen Transversalwellen. Die kürzeren, langsameren pflanzen sich entlang eines Winkels von $19,47^\circ$ zu der Schiffsrichtung fort und heißen divergente Wellen. Die Transversal-

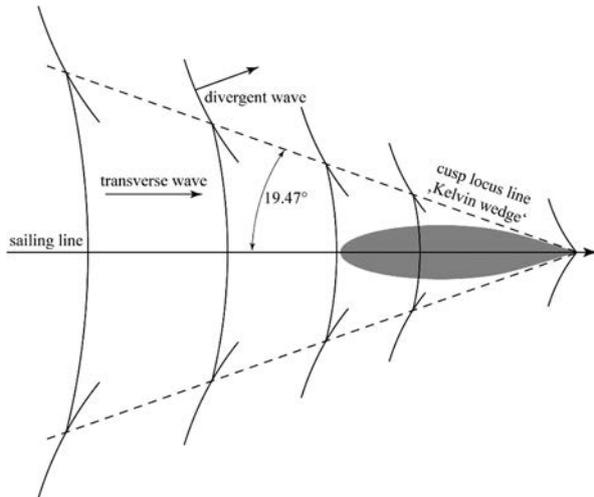


Abb. 3: Wellenfeld eines fahrenden Schiffs (adaptiert aus [23]).

wellen und divergenten Wellen interagieren an der sogenannten ‚Kelvin wedge‘.

In Abhängigkeit von der Wasserverdrängung, der Rumpfform und der Fahrtgeschwindigkeit erzeugt jedes Schiff spezifische Welleneigenschaften der Transversalwellen und der divergenten Wellen, die unterschiedliche Muster der ins Ufer einlaufenden Wellen hervorrufen (Abbildung 4). Prinzipiell kann man sagen, dass mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit die erzeugte Wellenhöhe und -periode ansteigen. Bei fortschreitender Lauflänge nimmt die Wellenhöhe aufgrund der Dispersion wieder ab. Im Gegensatz dazu bleibt die Wellenperiode konstant oder nimmt gerade bei großen Lauflängen weiter leicht zu. Aufgrund der großen Bandbreite an erzeugten Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen bzw. Frequenzen und Phasengeschwindigkeiten und der damit einhergehenden Dispersion der Wellen lassen sich je nach Abstand zum Ufer unterschiedliche Amplituden und Wellengruppen beobachten (Abbildung 4 unten). Die individuelle Ausprägung ist dabei vom Abstand der Schiffsfahrtslinie zum Ufer abhängig. Die energetische Hauptlast der in die Flachwasserzone einlaufenden Wellen wird durch die divergenten Wellen erzeugt. Uferparallele Kurse mit geringen Abständen zum Ufer erzeugen maximale Wellenhöhen und deswegen eine besonders hohe Wellenbelastung. Bei uferfernen Kursen unterliegen die Wellen der Dispersion. Das hat zur Folge, dass anstelle meist einer Wellengruppe mit maximalen Wellenhöhen mehrere Gruppen mit geringeren Wellenhöhen in das Ufer einlaufen, was wiederum deren Wirkung in der Flachwasserzone verringert.

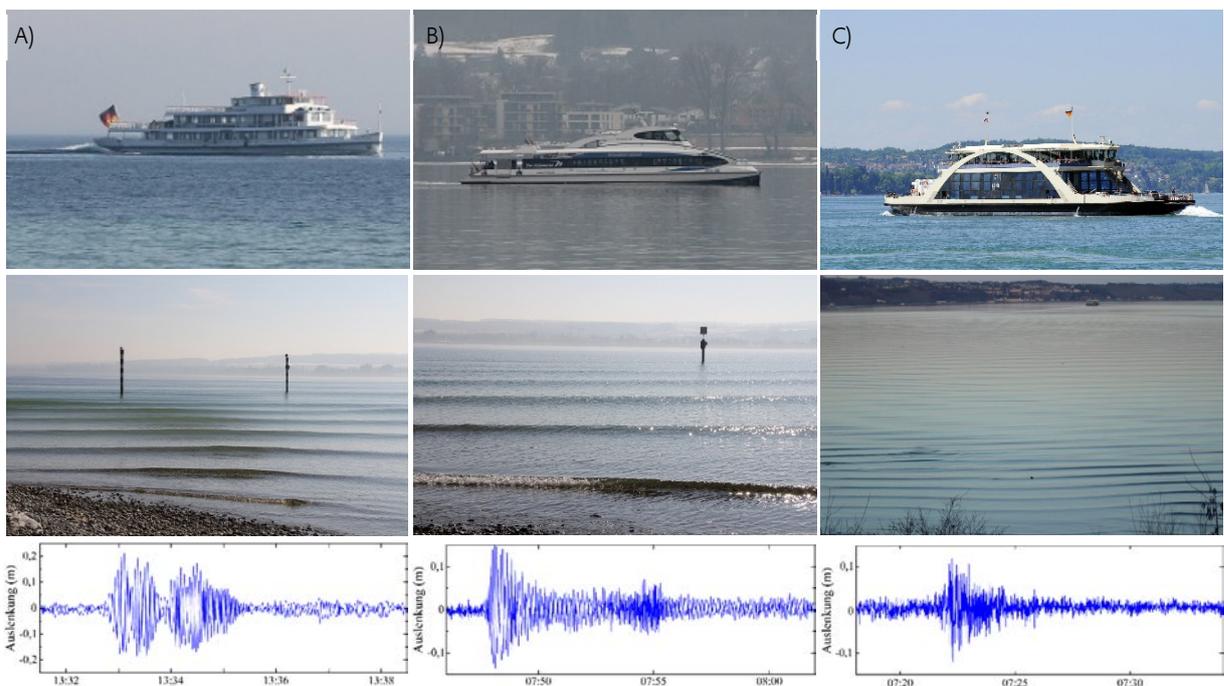


Abb. 4: Erscheinungsbild des Wellenfeldes in der Flachwasserzone und Oberflächenauslenkung der unterschiedlichen Schiffstypen am Bodensee: A) Fahrgastschiffe, B) Katamaran und C) Kfz- und Personenfähre.

Wellenmuster und -eigenschaften der Bodensee-Flotte

Am Bodensee werden energetisch bedeutende Schiffswellen vor allem durch große Fahrgastschiffe, Katamaran-Fähren und KfZ- und Personenfähren erzeugt (Abbildung 4, Tabelle 2). Die vielen kleinen Vergnügungsboote spielen aufgrund der geringen Wasserverdrängung in der energetischen Gesamtbilanz eine eher untergeordnete Rolle. In schmalen Durchfahrten wie z. B. dem Seerhein zwischen Konstanz und dem Untersee tragen aber auch diese Boote zur Wellenbelastung der Ufer bei.

Schiffswellen lassen sich aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften und Auftretens nicht nur von Windwellen unterscheiden, sondern auch zwischen den einzelnen Schiffstypen gibt es charakteristische Unterschiede (Tabelle 3, [8]).

Die Wellen der Auto- und Personenfähren treten das ganze Jahr hinweg vor allem am Tag und ein- bis zweimal pro Stunde während der Nacht auf. Dieses Auftreten erzeugt ein starkes Tag-Nacht-Muster im Wellenfeld (Abbildungen 5 und 6).

Die touristisch genutzten Fahrgastschiffe beeinflussen das Wellenfeld des Bodensees noch stärker als die Fähren, da diese meist ufernah entlang des Bodenseeuferes verkehren (Abbildung 1). Die Saison ist auf den Zeitraum zwischen Ende März und Mitte Oktober begrenzt, abgesehen von Sonder- und Charterfahrten. In dieser Zeit tragen die Schiffe zu einer wesentlichen zeitlichen Verdichtung des Wellenfeldes am Tag bei und verstärken ebenfalls die beobachtete Tag-Nacht-Periodizität in Wellenfeld (Abbildungen 5 und 6).

Die ganzjährig, tagsüber stündlich zwischen Konstanz und Friedrichshafen verkehrenden Katamarane sind eine weitere relevante Komponente des Schiffswellenfeldes. Durch die auf weiten Teilen der Fahrstrecke hohe Fahrgeschwindigkeit von 32 km h⁻¹ und die spezielle Rumpfform erzeugt der Katamaran gegenüber den anderen Schiffswellentypen die Wellen mit den größten Magnituden.

Generell treten Schiffswellen periodisch auf, d. h. vor allem am Tag und im Sommer und erzeugen deswegen sowohl einen Tag-Nacht-Zyklus als auch einen saisonalen Zyklus im Wellenfeld (Abbildung 6; [8], [10], [11]). Die durch Schiffswellen in die Flachwasserzone eingetragene Energie stellt eine zusätzliche anthropogene Belastung dar. Zum Beispiel treten im Uferabschnitt Kressbronn am Tag während der Sommermonate vor allem durch das Auftreten von deutlich mehr Schiffswellen mehr Wellen auf als in der Nacht (Abbildung 6). Wind- und Schiffswellen mit Wellenhöhen von 0,05 m und mehr traten im Sommer im Mittel zu 40 % bzw. 13 % und im Winter zu 34 % bzw. 4 % der Messperiode auf. Damit wird das Wellenfeld in Kressbronn durch Windwellen dominiert, Schiffswellen sind nur am Tag und im Sommer von Bedeutung. Ähnliche Verteilungsmuster können in den meisten Uferabschnitten rund um den Bodensee beobachtet werden, wobei an weniger windexponierten Uferabschnitten der Anteil an Schiffswellen im Sommer bis zu 50 % ausmachen kann ([8]).

Tab. 3:

Welleneigenschaften der auf dem Bodensee verkehrenden Schiffe.

	Fahrgast-schiffe	KfZ- und Personen-fähren	Katamaran-Fähren
Wellenhöhe (H_{max}) in m	0,1–0,5	0,05–0,2	0,2–0,4
Wellenperiode (T_{Peak}) in s	~2,9	~3,7	5–6
Wellenlänge (λ) in m	~13	~20	30–40
bodennahe Strömungs-geschwindigkeit ($U_{max,1m}$) in m s ⁻¹	<0,1–0,5	0,1–0,25	0,2–0,5

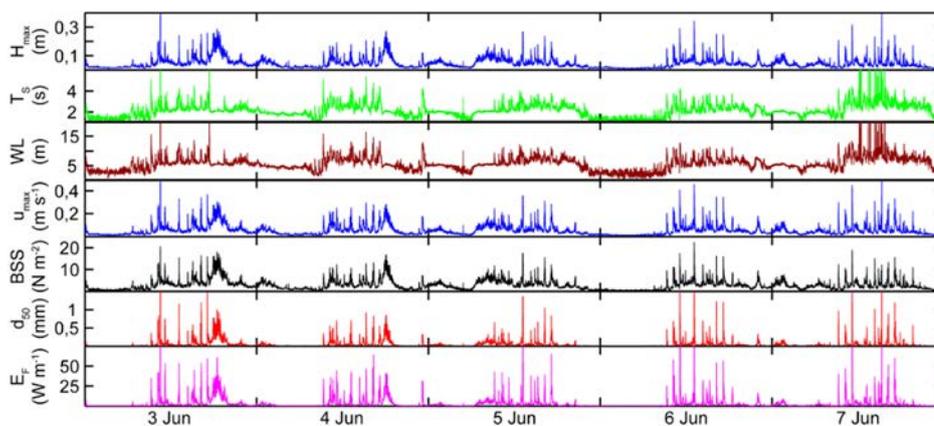


Abb. 5:

Eigenschaften und zeitliche Dynamik einer durch Wellen von Fahrgastschiffen dominierten Periode im Untersuchungsgebiet Kressbronn zwischen dem 3. und 7. Juni 2016. Die Eigenschaften des Wellenfeldes sind beispielhaft anhand der Wellenparameter H_{max} ...maximale Wellenhöhe, T_s ...signifikante Wellenperiode, WL ...Wellenlänge und der abgeleiteten Parameter u_{max} ...maximale welleninduzierte bodennahe Strömungsgeschwindigkeit in 1 m Wassertiefe, BSS ...Bodenschubspannung, d_{50} ...Median der maximal resuspendierbaren Korngröße und EF ...Wellenenergiefluss charakterisiert.

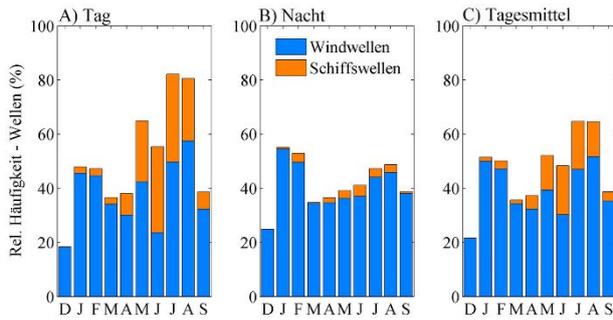


Abb. 6:

Wellenstatistik: Relative Häufigkeiten (%) von Wind- und Schiffswellen (A) am Tag (09-21 Uhr), (B) in der Nacht (21-09 Uhr) und (C) Tagesmittelwert im Untersuchungsgebiet Kressbronn zwischen Dezember 2015 und September 2016. Wellen mit einer Amplitude <0,05 m sind in der Analyse nicht berücksichtigt, aber als fehlender Prozentsatz zu 100 % sichtbar.

Unterschiede zwischen Wind- und Schiffswellen

Wind- und Schiffswellen lassen sich aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften und dem Zeitpunkt des Auftretens voneinander unterscheiden. In Seen sind aufgrund der meist kurzen Windwirklänge (wenige Kilometer) die Perioden der Windwellen kleiner als die der Schiffswellen. Im Bodensee betragen die typischen Perioden der Windwellen: 1–2,5 s (bis 3 s an einigen Uferabschnitten möglich) und der Schiffswellen 3–6 s (Tabelle 3). Im Gegensatz zu den sporadisch auftretenden Windwellen, die nur bei Starkwind- und Sturmereignissen größere Wellenhöhen als Schiffswellen erzeugen, treten Schiffswellen sehr

periodisch auf, d. h. vor allem am Tag und im Sommer, und erzeugen deswegen sowohl einen Tag-Nacht-Zyklus als auch einen saisonalen Zyklus im Wellenfeld (Abbildungen 5 und 6).

Die meist größeren Perioden der Schiffswellen im Vergleich zu den Windwellen sorgen dafür, dass Schiffswellen bei gleicher Wellenhöhe (z. B. 0,2 m; Abbildung 7) größere bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten erzeugen. Die potentiell resuspendierbaren Partikelgrößen nehmen zu, so dass im Umkehrschluss wesentlich geringere Wellenhöhen nötig sind, um Partikel zu resuspendieren (Abbildung 7). Bei einer Wellenhöhe von 0,2 m zum Beispiel erzeugen Windwellen in 1 m Wassertiefe eine bodennahe Strömungsgeschwindigkeit von $\sim 0,15 \text{ m s}^{-1}$, die drei Schiffstypen (Tabelle 3) hingegen erzeugen mit $\sim 0,25 \text{ m s}^{-1}$ eine fast doppelt so hohe bodennahe Strömungsgeschwindigkeit. Dieser Unterschied verstärkt sich mit zunehmender Wassertiefe. Bei einer Wellenhöhe von 0,2 m können Windwellen nur bis in eine Wassertiefe von knapp 2 m Partikel remobilisieren, die Schiffswellen dagegen bis in $\sim 3 \text{ m}$ (Fahrgastschiff), 4,5 m (Fähre) und 6 m (Katamaran). Selbst bei Wellenhöhen von 1 m, die während eines Starkwindereignisses (4–8 Bft) auftreten können, beträgt die Wassertiefe, bis zu der Partikel remobilisiert werden können, nur $\sim 3 \text{ m}$. Schiffswellen wirken sich also trotz der meist geringeren Wellenhöhen auf größere Tiefen aus als Windwellen. Das bedeutet, dass Schiffswellen eine wesentlich größere Fläche der Flachwasserzone beeinflussen als Windwellen und Tiefenbereiche beeinflussen, in denen sonst keine Partikel remobilisiert werden. Schiffswellen haben deswegen eine hohe Relevanz für die Remobilisierung und den Transport von Sedimenten in der Flachwasserzone von Seen.

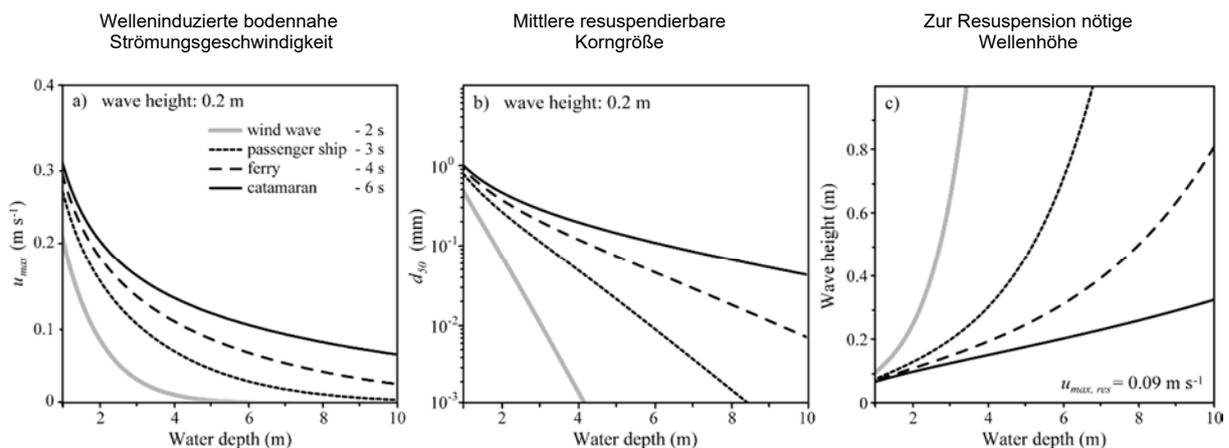


Abb. 7:

Bedeutung unterschiedlicher Wellentypen (Windwellen und Schiffswellen durch Fahrgastschiffe, Fähren und Katamarane) auf die a) induzierte bodennahe Strömungsgeschwindigkeit (u_{max}), b) die mittlere resuspendierbare Korngröße (d_{50}) und c) die zur Resuspension von Partikeln nötige Wellenhöhe in Abhängigkeit von der Wassertiefe (0–10 m). Die einzelnen Wellentypen unterscheiden sich vor allem durch die unterschiedlichen Wellenperioden: Windwellen 2 s, Fahrgastschiffe 3 s, Fähren 4 s und Katamarane 6 s. In a) und b) wurde für alle Wellentypen eine Wellenhöhe von 0,2 m angenommen. Die in c) angenommene, zur Resuspension von Partikeln nötige, bodennahe Strömungsgeschwindigkeit $u_{max, res} = 0,09 \text{ m s}^{-1}$ ist empirisch als Mittelwert für den Bodensee bestimmt worden.

Energieeintrag durch Wellen

Die hydrodynamische Belastung der Seeufer wird durch die Eigenschaften des Oberflächenwellenfelds bestimmt. Neben den Windwellen können Schiffswellen zur energetischen Belastung der Ufer beitragen. In welchem Umfang dies der Fall ist, hängt von der Intensität der Windwellen (durch die Windwirklänge bestimmt), im Verhältnis zu den Eigenschaften der durch Schiffe erzeugten Wellen und deren Häufigkeit im Auftreten ab (vgl. Kapitel 6, Tabelle 1).

Schiffswellen haben durch die Ausweitung der Schifffahrt (zeitliche Taktung der Fähren, mehr Sonder- und Charterfahrten der Passagierschiffe und der Einrichtung der Katamaran-Fährverbindung) in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Gerade in den Sommermonaten können diese das Wellenfeld sowohl in der Häufigkeit ihres Auftretens als auch energetisch (Wellenenergiefluss) dominieren ([8]). In den Sommermonaten (während der Kursschiffahrt) machen Schiffswellen zwischen 12 und 46 % der in die Flachwasserzone eingetragenen Energie aus (Tabelle 4). Der Spitzenwert mit fast der Hälfte der eingetragenen Wellenenergie wird im Bereich der durch Erosion stark bedrohten archäologischen Fundstelle in Unteruhldingen-Stollenwiesen erreicht. In den Wintermonaten ist der Anteil der durch Schiffswellen in die Flachwasserzone eingetragenen Energie in den meisten Untersuchungsgebieten mit 2 bis 24 % geringer als im Sommer (Tabelle 4). Dies trifft nicht auf die Uferabschnitte Hagnau und Kirchberg zu. In Hagnau und Kirchberg ist im Sommer und Winter die eingetragene Energie fast gleich groß. Dies verdeutlicht den Einfluss des zwischen Friedrichshafen und Konstanz verkehrenden Katamarans auf die hydrodynamische Exposition der im Bereich der Schiffroute liegenden Uferabschnitte, zumal die Wellenbelastung im Winter bei einem deutlich niedrigeren Wasserstand auftritt.

Tab. 4:

Hydrodynamische Exposition (Wellenexposition) der sechs Untersuchungsgebiete des HyMoBioStrategie-Projekts zwischen Dezember 2015 und Dezember 2017. Die hydrodynamische Exposition ist durch den Energiefluss von Wind- und Schiffswellen abgebildet. Die statistische Analyse ermöglicht aufgrund der unterschiedlichen Welleneigenschaften die Unterscheidung zwischen Wind- (WW) und Schiffswellen (SW). Sommer: April–September und Winter: Oktober–März. Die Werte in Klammern repräsentieren Wellen mit Höhen <0,05 m.

Standort	Energiefluss			
	Sommer		Winter	
	WW (%)	SW (%)	WW (%)	SW (%)
Sipplingen	69 (10)	13 (8)	81 (13)	2 (5)
Unteruhldingen	47 (3)	46 (3)	85 (11)	3 (1)
Hagnau	72 (1)	25 (2)	70 (3)	24 (3)
Kirchberg	80 (2)	17 (1)	82 (2)	14 (2)
Langenargen	87 (<1)	12 (<1)	89 (3)	5 (3)
Kressbronn	78 (2)	19 (<1)	87 (3)	9 (<1)

Bedeutung und Muster schiffswelleninduzierter Partikel-Resuspension

Die durch Wellen erzeugte oszillierende Strömung führt unter anderem zur Mobilisierung von Partikeln, die verfrachtet werden können.

Ab welcher bodennahen Geschwindigkeit Partikel resuspendiert und durch die Hintergrundströmung transportiert werden können, ist von der mittleren Korngröße der Partikel an der Sedimentoberfläche abhängig. Im Bodensee haben Korngrößenmessungen suspendierter Partikel gezeigt, dass diese im Bereich zwischen 5 und 300 µm ($d_{50} = 50-100 \mu\text{m}$) liegen. Aus der gekoppelten Messung von Strömungsgeschwindigkeit und Partikelkonzentration in der Wassersäule kann ein Schwellenwert für die bodennahe Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden, bei der die Partikel resuspendiert werden, $U_{max,res}$ ([10]). Dieser variiert im Bodensee je nach Uferabschnitt nur leicht und beträgt zwischen 0,08 und 0,12 m s⁻¹. Nur wenn dieser Wert überschritten wird, kommt es zur Resuspension von Partikeln (Abbildung 8), wie am Beispiel des in den Konstanzer Trichter einlaufenden Katamarans (Kat E) im Vergleich zum auslaufenden, langsam fahrenden Katamaran (Kat A) zu sehen ist. Neben dem Resuspensionspotential durch schnell fahrende Katamarane können auch ufernah verkehrende Fahrgastschiffe oder die Fährschiffe signifikante Resuspension von Partikeln erzeugen (Abbildung 8; [10]). Wird beim Einlaufen einer Schiffswellengruppe die zur Resuspension notwendige kritische Strömungsgeschwindigkeit erreicht, steigt die Partikelkonzentration bzw. die vom Gerät direkt gemessene optische oder akustische Rückstreustärke (Ψ_{ABS} in Abbildung 8) sprunghaft an. Nach Erreichen des Maximums in der ABS fällt der Wert innerhalb einiger Minuten wieder ab. Im Sommer, bei einer hohen Frequenz an Schiffsbewegungen und damit einer häufigen Folge von in die Flachwasserzone einlaufenden Schiffswellengruppen mit Strömungsgeschwindigkeiten höher als $U_{max,res}$, kommt es zur wiederholten Resuspension von Partikeln, bevor die Partikel des vorhergehenden Ereignisses vollständig wieder sedimentiert sind. Im Tagesverlauf führt das zu einer Akkumulation von Partikeln in der Wassersäule der Flachwasserzone. Erst am Abend, wenn der Schiffsverkehr nachlässt, sedimentieren die Partikel fast vollständig aus. An den durch Schiffswellen dominierten Tagen kommt es so, wie beim Wellenfeld selbst, zu einem Tag-Nacht-Zyklus in der Konzentration der in der Flachwasserzone suspendierten Partikel (Abbildung 9). Zugleich sind Partikel, die länger in Suspension gehalten werden, durch die Hintergrundströmung leichter über große Strecken transportierbar. Die schnelle Folge von Schiffswellen am Tag trägt zum Sedimenttransport bei (vgl. Kapitel 6, S. 58 ff.). Trägt die Hintergrundströmung die Partikel in tieferes Wasser, sind sie in der Regel dauerhaft der natürlichen Dynamik in der Flachwasserzone entzogen. Die langfristige Folge ist Erosion in den Gebieten, in denen die Partikel mobilisiert werden. Darüber hinaus verhindert die regelmäßige Resuspension der Partikel die Konsolidierung der Sedimentoberfläche (etwa

durch Biofilme) und damit die Ausbildung einer kohäsiven Sedimentschicht, die weniger leicht remobilisiert werden kann ([22], [10]). Auch die nach dem Durchgang von Schiffswellen abgelagerten und nicht bzw. schwach konsolidierten Partikelaggregate sind später leichter durch Windwellen remobilisierbar. Dadurch tragen Schiffswellen auch indirekt zum Feststofftransport und der beobachteten Erosion in der Flachwasserzone bei.

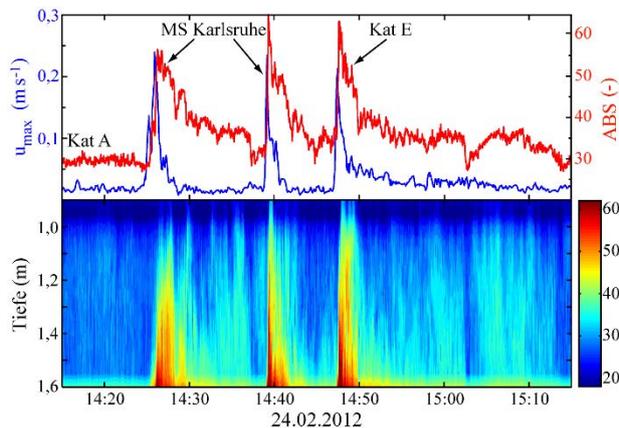


Abb. 8:

Welleninduzierte bodennahe Strömungsgeschwindigkeit u_{max} und akustische Rückstreustärke (ABS) nach der Passage eines auslaufenden (Kat A) und einlaufenden Katamarans (Kat E) und nach dem Einlaufen (Peak: 14:27) und Auslaufen (Peak: 14:39) des Fahrgastschiffs MS Karlsruhe im Bereich des Konstanzer Trichters.

Nicht nur die Muster, sondern auch die Häufigkeit schiffswelleninduzierter Resuspension lassen sich von denen der Windwellen unterscheiden bzw. quantifizieren. Untersuchungen über ein Jahr an einem Uferabschnitt nahe der Insel Mainau haben gezeigt, dass die Muster der Resuspension einem Tag-Nacht-Zyklus und einem saisonalen Zyklus folgen, die beide durch das Auftreten von Schiffswellen geprägt sind. Resuspension am Tag in den Sommermonaten ist signifikant häufiger als in der Nacht oder in den Wintermonaten ([10]). Diese Muster lassen sich in vielen Uferabschnitten des Bodensees wiederfinden, können aber unterschiedlich stark ausgeprägt sein. In den im HyMoBioStrategie-Projekt untersuchten Uferabschnitten ist der langjährig mittlere Anteil von Schiffswellen an der Resuspension 8 % in Sipplingen, 30 % in Unteruhldingen, 35 % in Hagnau, 24 % in Kirchberg, 17 % in Langenargen und 19 % in Kressbronn. Der größte Anteil ist in Hagnau und Unteruhldingen zu finden. In Hagnau verursachen sowohl die in den Sommermonaten verkehrenden Kursschiffe als auch der ganzjährig verkehrende Katamaran diese hohe anthropogene Resuspensionsbelastung. In Unteruhldingen sind fast ausschließlich die in den Sommermonaten verkehrenden Kursschiffe ausschlaggebend.

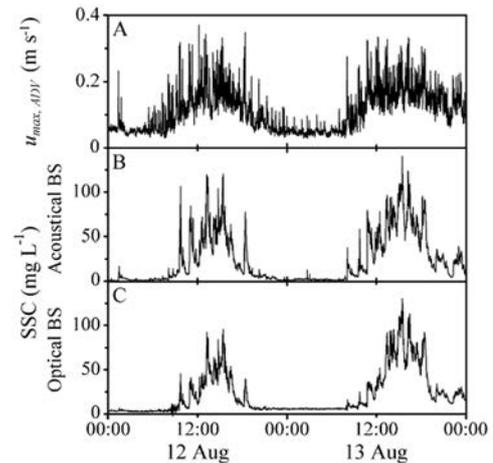


Abb. 9:

Welleninduzierte bodennahe Strömungsgeschwindigkeit ($u_{max,ADIV}$, A) und suspendierte Partikelkonzentration (SSC) gemessen über die B) akustische Rückstreustärke (Acoustical BS, ABS) und C) die optische Rückstreustärke (Optical BS) an zwei durch Schiffswellen dominierten Tagen (12. und 13. August 2005) im Bereich der Insel Mainau. Verändert nach ([10]).

Einfluss der Wasserstandsdynamik

In nicht regulierten alpinen Seen führt die saisonale Wasserstandsdynamik zu hohen Wasserständen im Sommer und niedrigen im Winter ([9], [15]). Dadurch kommt es im Jahresverlauf zu einer räumlichen Verlagerung der durch Wellen energetisch beeinflussten Flachwasserzone. Bei sommerlich hohem Wasserstand treffen die Wellen auf Sedimente, die eher von Geröllen, Kiesen und Grobsanden bestimmt werden, im Winter bei niedrigem Wasserstand eher auf mittel- und feinsandige Sedimente nahe der Haldenkante. Deswegen ist bei niedrigen Wasserständen im Winter das Potential, Partikel zu resuspendieren und zu transportieren, größer als im Sommer.

Im Bodensee-Obersee wurde in den letzten 70 Jahren ein signifikanter Rückgang der Sommerhochwasserstände von rund -0,5 m gemessen ([15], [19]). Die Kombination aus sinkenden Sommerwasserständen (Ursache ist u. a. die Wasserkraftnutzung im Einzugsgebiet) und der hohen energetischen Belastung der Ufer durch Schiffswellen vor allem in den Sommermonaten sind wahrscheinlich eine der Hauptursachen für die vielerorts beobachtete, schleichende Erosion der Sedimente in der Flachwasserzone des Bodensees. Dieser schleichende Prozess erodiert die Bauhölzer und Kulturschichten der archäologischen Denkmäler, die als UNESCO Welterbe ausgewiesen sind (vgl. Kapitel 10), was zu deren Zerstörung und vollständigem Verlust führen kann.

Auswirkungen der an- und ablegenden Schifffahrt am Beispiel des Anlegers in Kressbronn

Während die Vorbeifahrt der Fahrgastschiffe zu einem ausge dehnten Wellenfeld führt, das die gesamte befahrene Uferstrecke überstreicht (vgl. Abbildungen 3 und 4), sorgen die An-

und Ablegemanöver der Schiffe an den Landestegen für lokale Störungen, über die bisher wenig bekannt war.

Auswertungen der jüngsten Bodensee-Tiefenvermessung ([30]) lassen erkennen, dass an vielen Landstellen der Bodensee-Linienschifffahrt bedeutende Reliefveränderungen auftreten, die ursächlich auf die Schifffahrt zurückzuführen sind. Ein besonders eindrückliches Beispiel sind die Auskolkungen um die Schiffsanleger in Kressbronn (Abbildung 10), Langenargen und Immenstaad. Im Rahmen des HyMoBioStrategie-Verbundprojekts wurde deswegen in Kressbronn eine mehrtägige Intensivmesskampagne durchgeführt. Diese ermöglichte einen gesamtheitlichen Blick auf die Prozesszusammenhänge und die Wechselwirkungen in der Flachwasserzone unter dem Einfluss an- und ablegender Fahrgastschiffe ([7]).

Reliefanomalien und Häufigkeit von An- bzw. Ablegemanövern

Neben den durch die Schiffsbewegung erzeugten Wellen und deren Wirkung in der Flachwasserzone stellt die Strahlwirkung der Propeller und die damit verbundenen hohen Strömungsgeschwindigkeiten eine weitere bedeutende Störung im Umfeld von Landestegen dar.

Im Umfeld des Anlegers in Kressbronn lassen sich zwei Auskolkungen beiderseits des Stegs erkennen, die nicht dem natürlichen Verlauf der Höhenlinien entsprechen ([7]). Auch im Längsschnitt entlang der genannten Höhenlinien treten die etwa 2 m tiefen grabenartigen Auskolkungen deutlich hervor. Die Auskolkungen erstrecken sich in ufernormaler Richtung beiderseits der Stegachse zwischen den Höhenlinien 390,57 m ü. NHN (d. h. 4,0 m unter mNW) und 394,07 m ü. NHN (0,5 m unter mNW). Die Volumendifferenz zwischen dem mutmaßlich natürlichen Relief des Seegrundes und dem aktuellen Relief beträgt etwa 9.300 m³. Die Auskolkung ist zweifellos künstlich und geht höchstwahrscheinlich auf die sukzessive Erosion durch die an- und ablegenden Kursschiffe zurück.

Insgesamt haben am Kressbronner Anleger zwischen 1890 und 2016 etwa 300.000 Kursschiffe angelegt. Hinzu kommt eine unbekannte Zahl an Sonderfahrten. Die Zahl der jährlichen Fahrten lag von den 1890er bis in die 1930er Jahre zwischen etwa 2.500 bis 3.600, sank dann kriegsbedingt in den 1940er Jahren auf etwa 1.700 bis 2.200. Seit den 1950er Jahren bis etwa 2004 verkehrten jährlich etwa 1.700 bis 1.900 Schiffe, seitdem stieg die Anzahl wieder auf 2.300 bis 2.500.

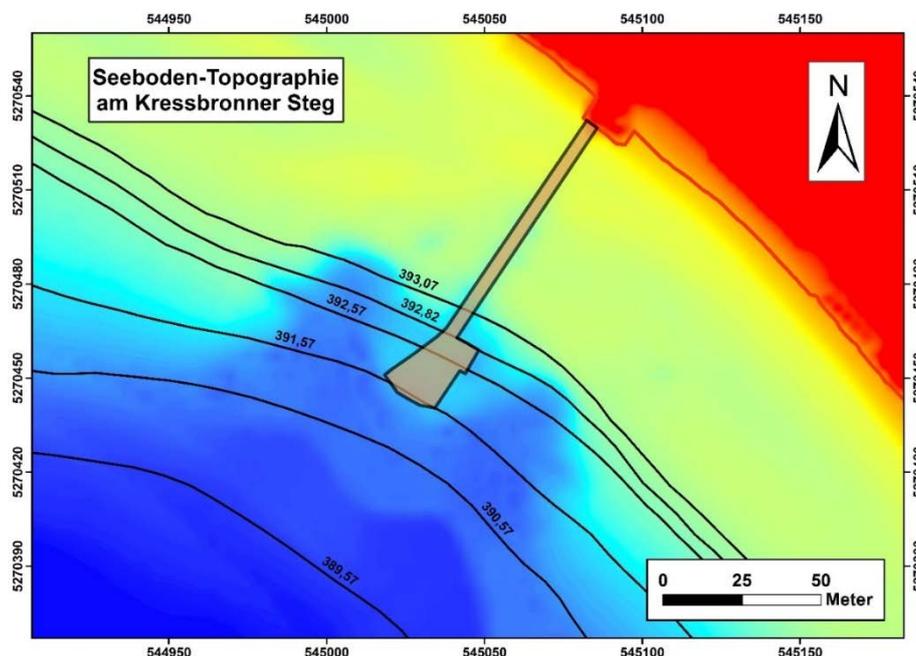


Abb. 10:

Ausschnitt der Flachwasserzone und der Halde im Bereich des Kressbronner Stegs. Einfärbung der Fläche: Sohlniveau nach dem 3 x 3 m Gitter des INTERREG IV-Projekts ‚Tiefenschärfe‘ ([30]; <http://www.tiefenschaeerfe-bodensee.info/>) zwischen 388 m (blau) und 398 m ü. NHN (orange). Eingetragen sind die aktuelle Uferlinie (rot) sowie der mutmaßlich natürliche Verlauf der Höhenlinien zwischen 389,57 m und 393,07 m ü. NHN (schwarz). Wasserstandshauptdaten des Bodensee-Obersees: mittleres jährliches Mittelwasser (mMW) – 395,23 m ü. NHN, mittleres jährliches Niedrigwasser (mNW) – 394,57 m ü. NHN (Periode 1990/91 bis 2015/16).

Für die Beurteilung etwaiger Erosion am Stegkopf infolge des Schiffsbetriebs spielt der Wasserstand eine wichtige Rolle (vgl. Abbildung 2). Je tiefer der Wasserstand, vornehmlich im Winterhalbjahr, desto geringer ist die Distanz zwischen Schiffsantrieb und Sedimentoberfläche. Bis zur Einstellung des Winterfahrplans 1953 legten die Schiffe auch bei niedrigen Wasserständen am Kressbronner Steg an bzw. ab ([7]). In den 60 Jahren zwischen 1891 und 1950 fanden knapp 12.000 Ablege-

manöver unterhalb des mittleren Niedrigwassers (394,57 m ü. NHN) statt, zwischen 1951 und 2016 (d. h. ohne Winterbetrieb im Oberseelängsverkehr) waren es nur 1.190, die meisten davon im extremen Niedrigwasserjahr 2003. Umgekehrt war in der Periode 1951 bis 2016 die Zahl der Schiffsbewegungen oberhalb des mittleren Hochwassers mit etwa 14.000 Ablegemanövern etwas größer als zwischen 1891 und 1950 mit etwa 13.000.

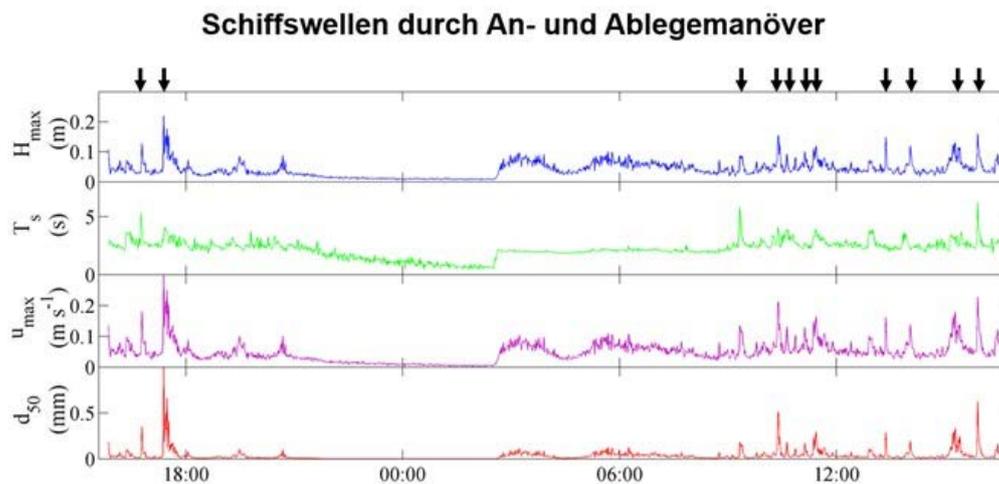


Abb. 11:

Eigenschaften des Wellenfelds (H_{max} ...maximale Wellenhöhe, T_s ...signifikante Wellenperiode, U_{max} ...welleninduzierte bodennahe Strömungsgeschwindigkeit, d_{50} ...mittlere mobilisierbare Korngröße) während der Intensivmesskampagne am Schiffsanleger in Kressbronn zwischen dem 15. und 16. Mai 2017. Die Messstelle lag rd. 100 m westlich der Spitze des Schiffsanlegers. Die schwarzen Pfeile symbolisieren die erfassten An- und Ablegemanöver.

Wellen, Strömungen und Sedimentremobilisierung

Typischerweise erzeugen nur die anlegenden Schiffe signifikante Wellenmagnituden (Abbildung 11). Die ablegenden Schiffe dagegen verursachen auf Grund der anfänglich langsamen Fahrt kaum Oberflächenwellen, aber einen erheblichen Propellerschwall. Erst weiter von Anleger entfernt liegende Uferabschnitte sind durch Oberflächenwellen der ablegenden Schiffe beeinflusst. Die Welleneigenschaften der anlegenden Schiffe entsprechen denen, die während des Monitorings gemessen wurden (Abbildung 5).

Das Strömungsfeld beidseits des Anlegers ist sehr stark von den an-, aber vor allem von den ablegenden Schiffen beeinflusst. Das um den Schiffsanleger herum gemessene Strömungsfeld weicht sehr stark vom typischen natürlichen Strömungsfeld ab, das während des mehrjährigen HyMoBioStrategie-Monitoringprogramms rd. 150 m westlich vom Schiffsanleger erfasst wurde. Die Strömungsrichtung war auf beiden Seiten des Anlegers fast orthogonal zum Ufer in Richtung Nordost/Ost bzw. Südwest ausgerichtet. Die mittleren Magnituden der Strömung lagen mit rd. $0,05 \text{ m s}^{-1}$ etwas über den normalerweise gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten. Die bei Ablegemanövern

gemessenen Strömungsspitzen waren aber mit $0,2\text{--}0,4 \text{ m s}^{-1}$ (Abbildung 12) wesentlich höher. Darüber hin aus muss davon ausgegangen werden, dass im Bereich des Propellerschwalls, also direkt dort wo die Auskolkungen anzutreffen sind, deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten anzutreffen sind. Diese waren messtechnisch aber nicht erfassbar.

Der Schwellenwert der bodennahen Strömungsgeschwindigkeit, um Partikel von der Sedimentoberfläche zu mobilisieren, liegt in der Flachwasserzone vor Kressbronn bei rd. $0,11 \text{ m s}^{-1}$ (vgl. Abbildungen 8 und 9). Die vor allem während der Ablegemanöver erzeugten hohen Strömungsgeschwindigkeiten liegen mindestens um das 2-4-fache darüber. Damit sind die Schiffsbewegungen sicher für die Erosion am Schiffsanleger in Kressbronn verantwortlich. Während der An- und Ablegemanöver wurden die Partikel nicht nur bodennah mobilisiert, sondern über die gesamte Wassersäule verteilt und sedimentierten nur sehr langsam (Abbildung 12). Auch mehr als eine Stunde nach dem Ablegen des Schiffs waren noch erhöhte Partikelkonzentrationen vorhanden. Dadurch können die suspendierten Partikel mit der Hintergrundströmung sehr weit und vor allem ufer-orthogonal verfrachtet werden. Bei einer Hintergrundströmungsgeschwindigkeit von $0,05 \text{ m s}^{-1}$ werden die

suspendierten Partikel in einer Stunde bis zu 180 m ufer-orthogonal verfrachtet. Partikel, die aus der Flachwasserzone in Richtung Seemitte transportiert werden, sedimentieren erst im Haldenbereich und führen somit zum Verlust an Sedimenten in der Flachwasserzone. Dieser Vorgang erklärt das beobachtete Sedimentdefizit von rd. 9.300 m³ im Bereich des Schiffsanlegers in Kressbronn.

Die am Anleger in Kressbronn nachgewiesenen Zusammenhänge zwischen Schiffsbewegungen, bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten sowie der Resuspension und dem Export von Partikeln aus der Flachwasserzone in tiefere Bereiche des Sees sind an vielen Steganlagen mit an- und ablegender Fahrgastschiffahrt wirksam, am Bodensee ebenso wie an anderen Seen.

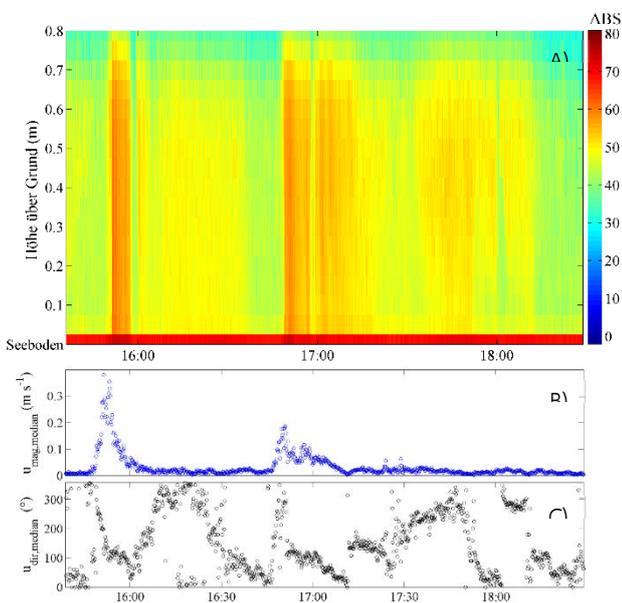


Abb. 12:

Vertikal aufgelöste, akustische Rückstreustärke (ABS) als Maß für die Partikelkonzentration (A) und zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit (B) und -richtung (C) für zwei ausgewählte An- bzw. Ablegemanöver am 15.05.2017 östlich des Schiffsanlegers in Kressbronn. Der rote untere Balken in der oberen Teilabbildung zeigt die Sedimentoberfläche, von der aus Partikel remobilisiert und in die darüber liegende Wassersäule verteilt werden.

Einfluss der Antriebs- und Manövriertechnik

Neben der Häufigkeit von An- und Ablegemanövern haben die veränderte Antriebstechnik (Voith-Schneider-Propeller) und die zum Ufer hin abgewinkelten Stegköpfe wesentlich zur beobachteten Erosion beigetragen. Die Turbulenzen und die erzeugten Verwirbelungen und Strömungsgeschwindigkeiten hinter und unter den VS-Propellern sind im Detail nicht bekannt. Es konnte aber gezeigt werden, dass es gerade bei geringen Distanzen der Propeller zur Sedimentoberfläche zu einer erheblichen Mobilisierung der Sedimente bei den An- und

vor allem den Ablegemanövern kommt (Abbildungen 12 und 13).

Ein weiterer Faktor, der sich auf die Interaktion zwischen Antrieb und Sedimentoberfläche auswirkt, ist die Manövriertechnik beim Ablegen. In früheren Jahrzehnten war der Stegkopf über seine vier Dalben uferparallel ausgerichtet, so dass die Kursschiffe fast parallel zum Verlauf der Tiefenlinien ein- und ausdampfen konnten. Spätestens seit dem Neubau im Jahr 2000 besitzt der Kressbronner Anleger – wie viele andere Stege am Bodensee auch – eine beidseits zum Ufer abgewinkelte Stirn. Im Zusammenwirken mit dem Voith-Schneider-Antrieb erlaubt diese Geometrie, das Heck des Schiffs landeinwärts zu drehen, bevor das Schiff mit vollem Schub und in einem steilen Winkel vom Stegkopf ablegt (Abbildung 13).

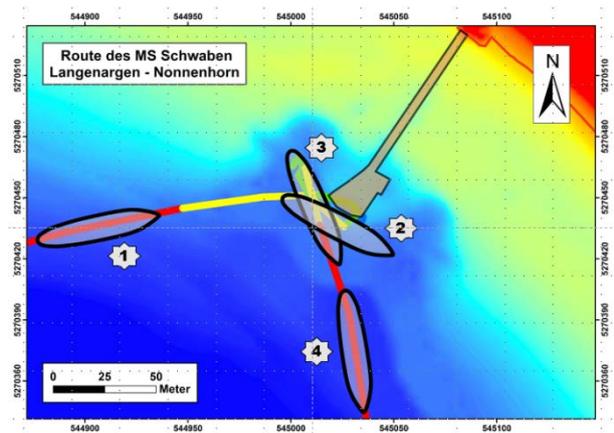


Abb. 13:

Ablegemanöver der MS Konstanz am 16.05.2017 am Kressbronner Anleger: Das Heck ist gegen das Land eingedreht, der Antrieb hat vollen Schub, so dass das Schiff sofort seewärts in Richtung Nonnenhorn ausdampfen kann. a) reales Manöver und b) Schema des An- und Ablegemanövers – Draufsicht, mit Angabe der mit einem GPS gemessenen Schiffsbewegungen.

Verdriftung von Makrozoobenthos

Bodenlebende wirbellose Tiere (Makrozoobenthos) können durch erhöhte bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten artspezifisch und in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Sediments verdriftet werden ([3], [4]). Regelmäßige bzw. periodische Verdriftungen wie sie z. B. bei An- und Ablegemanövern

zu beobachten sind, haben einen Einfluss auf die Artenzusammensetzung und die Individuendichte.

Die detaillierten Erhebungen der Makrozoobenthos-Gemeinschaft um den Anleger in Kressbronn haben gezeigt, dass während der An- und Ablegemanöver die Artenzahl an Makrozoobenthos in der Wassersäule höher ist als in Perioden ohne Schiffsbewegung (Abbildung 14). Das deutet darauf hin, dass es während der Schiffsbewegungen zu einer signifikanten Resuspension von Makrozoobenthos kommt. Verdriftetes Makrozoobenthos unterliegt einem höheren Prädationsdruck z. B. durch benthivore Fische ([5]). Auf lange Sicht kann dies nicht nur zur Verringerung der Individuendichte, sondern auch zu einer geringeren Artenvielfalt im Bereich eines Schiffsanlegers

führen. Dieser Effekt konnte am Schiffsanleger Kressbronn nachgewiesen werden. Direkt am Schiffsanleger entnommene Makroinvertebraten-Proben wurden mit Proben verglichen, die in größerer Entfernung vom Anleger in vergleichbarer Wassertiefe genommen wurden. Die weiter entfernte Makrozoobenthos-Gemeinschaft wies eine mehr als doppelt so hohe Individuendichte auf wie die in der Nähe des Anlegers. Auch der Artenreichtum (Taxa-Zahl) war an der entfernt vom Anleger gelegenen Stelle signifikant höher als am Anleger selbst.

Hydrodynamische Störungen durch An- und Ablegemanöver wirken sich demnach negativ auf die Makrozoobenthos-Gemeinschaft aus und sind bei Monitoringvorhaben entsprechend zu berücksichtigen.

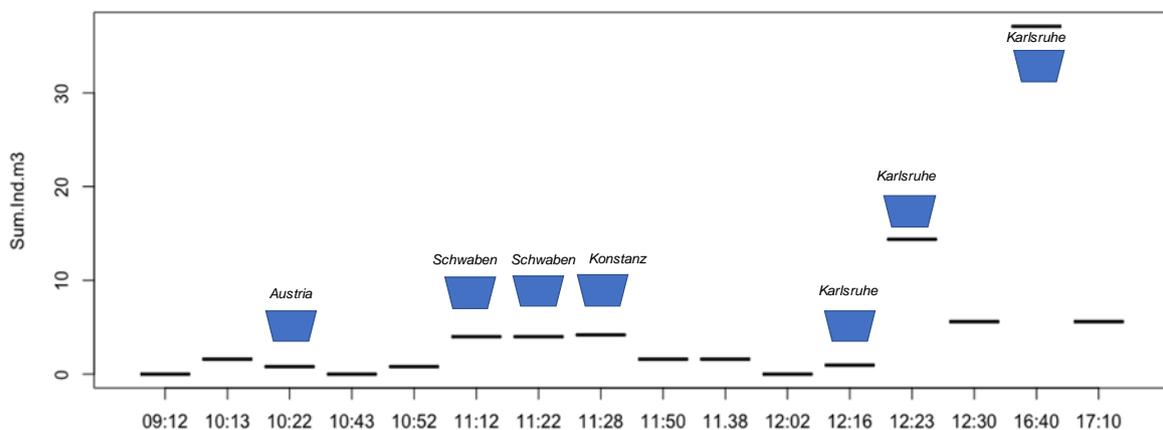


Abb. 14:

Zeitliche Entwicklung der Gesamtzahl der wirbellosen Bodentiere (Makrozoobenthos, Ind. m³) in der Wassersäule am Anleger Kressbronn am 16. Mai 2017. Das Auftreten von Schiffen ist mit einem Trapezoid und dem jeweiligen Namen des Schiffes gekennzeichnet.

ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN DER SCHIFFFAHRT IN DER UFERZONE

Über die ökologischen Auswirkungen der Schifffahrt existiert eine umfangreiche internationale Fachliteratur, die von F. Gabel in [6] zusammengefasst wurde. Der Schwerpunkt liegt auf der vorbeifahrenden Schifffahrt aller Größenklassen in Kanälen, Flüssen und Seen. Hingegen liegen über die weiteren ökologischen Auswirkungen von An- und Ablegemanövern sowie von uferstrukturellen Veränderungen für die Schifffahrt kaum Informationen vor (vgl. Kapitel 3).

Dem zufolge kann an Seeufern, z. B. des Bodensees, mit folgenden Wirkungen der Großschifffahrt gerechnet werden⁴:

1. Verstärkung der bereits vorliegenden, unfertypischen hydrodynamischen Belastung durch Windwellen: Durch Schiffswellen, die üblicherweise andere Eigenschaften aufweisen als Windwellen (Abbildung 4, Tabelle 3), wird
 - a. der Wellenenergie-Eintrag je Laufmeter Uferlänge insgesamt erhöht (Tabelle 4),
 - b. ein Tag/Nacht- sowie ein saisonaler Rhythmus geschaffen (Abbildung 6),
 - c. die Wellenbasis hin zu größeren Tiefen verlagert (Abbildung 7).
2. Diese veränderten Bedingungen wirken sich zunächst negativ auf die Stabilität der litoralen Sedimentoberfläche aus, wobei

⁴ Im Folgenden wird nur die Literatur zitiert, die sich auf den Bodensee bezieht; ansonsten sei auf [6] verwiesen. Mit ^(*) sind Folgewirkungen gekennzeichnet, die am Bodensee noch nicht näher untersucht wurden; es liegen aber entsprechende Beobachtungen oder Indizien vor.

- a. Resuspensionsereignisse häufiger und die Korngröße der resuspendierten Partikel größer werden (Abbildung 5),
 - b. die Litoralfäche, die von einer Resuspension betroffen ist, größer wird (Abbildung 7).
3. Die Resuspension der obersten Sedimentschichten führt
 - a. zur Trübung des litoralen Wasserkörpers (Abbildung 8 und 9), mit
 - i. periodischer Verringerung der Lichtverfügbarkeit v. a. für Unterwasserpflanzen^(*),
 - ii. Ablagerung von Feinsedimenten auf den Vegetationsorganen von Unterwasserpflanzen^(*),
 - b. zur Freisetzung von Nährstoffen (Phosphor, Ammonium-Stickstoff)^(*), ggf. auch von partikulär sorbier- ten Schadstoffen^(*) und Methan,
 4. Destabilisierung von (naturnahen) Uferlinien, gefolgt von
 - a. der Ausbildung von Böschungsabbrüchen (z. B. im Seerhein, NSG Wollmatinger Ried),
 - b. der Unterspülung von Gehölzen (Tunauer Strand u. a. Uferabschnitte am Bodensee-Obersee), die umfangreiche Uferbefestigungen und Vorschüttungen notwendig macht („Seehangsanierung“),
 - c. der Beeinträchtigung von Röhrichten, insbesondere im Zusammenwirken mit Treibgut oder Fadenalgen- matten ([16], [17]).
 5. Beeinträchtigungen von Wasservogel-Populationen durch Wellengang (Verkipfung bzw. Überschwemmung der Nester), gefolgt von Gelegeverlusten, Mortalität von Jungvögeln, Zweitbruten mit geringerem Bruterfolg oder Aufgabe des Niststandortes.
 6. Beeinträchtigung der autochthonen bodenlebenden Fauna (Makrozoobenthos) durch
 - a. Resuspension und Verdriftung von Individuen im Zuge der periodischen Zunahme der kritischen Schergeschwindigkeit am litoralen Gewässergrund (Abbildung 14), gefolgt von geringeren Wachstums- raten (Behinderung der Nahrungsaufnahme), einer erhöhten Mortalität (u. a. Erbeutung durch Fische) und schließlich einer verringerten Individuendichte auf dem Seegrund. Dies ist insbesondere der Fall, wenn (i) der Lebensraum wenig strukturiert ist (kein Röhricht, geringe Wasserpflanzenbedeckung, wenig Sturzbäume, Totholz oder freiliegende Baumwur- zeln) oder wenn (ii) vor Ufermauern durch Wellen- brechung hohe Turbulenzen entstehen ([20]);
 - b. Schalen-Schluss bzw. Schließen der Atemöffnung von Teichmuscheln (ÜFam. Unioidea) und Dreikant- muscheln (*Dreissena polymorpha* PALLAS 1771) beim Wellendurchgang, gefolgt von Stress und geringe- ren Wachstumsraten;
 7. Förderung gebietsfremder Arten (bei den Krebstieren z. B. *Dikerogammarus villosus* SOWINSKY 1894) aufgrund der zumeist besseren Anpassung dieser Arten an hydro- dynamische Belastungen.
 8. Wirkungen auf die litorale Fischfauna durch
 - a. höhere Verluste von Fischgelegen, teils gemindert durch Wahrnehmung turbulenter Bedingungen und adaptives Verhalten der laichbereiten Fische ([21]),
 - b. Letalwirkungen auf Fischlaich und Fischlarven durch Stranden beim Wellendurchgang^(*),
 - c. eine verbesserte Verfügbarkeit von Nahrungstieren (Makrozoobenthos; [27], [28]), gemindert durch die Wassertrübung, die die Wahrnehmung von Beute- tieren herabsetzen kann,
 - d. erhöhten Energieaufwand für die Schwimmaktivitä- ten in einer turbulenten Umgebung, wobei Arten mit spindelförmigem Körper gegenüber solchen mit hochrückiger Körperform bevorzugt sind ([25]),
 - e. selektive Verdriftung von Fischlarven in Verbindung mit unterschiedlicher Fitness bestimmter Arten hin- sichtlich der Wahrnehmung und Vermeidung turbu- lenter Lebensräume ([24]),
 9. Verdrängung bestimmter Fischarten aus Lebensräumen mit intensivem Schiffsverkehr, gefolgt von einer Reduzie- rung der Individuendichte und Artenvielfalt^(*).

Die Folgewirkungen der motorisierten Schiffahrt erstrecken sich demnach über mehrere trophische Ebenen des litoralen Ökosystems ([6]). Die Schiffahrt, und hier besonders die Fahr- gastschiffahrt und die Fähren, ist damit als signifikanter Faktor anzusehen, durch den mindesten zwei der vier biotischen Qua- litätskomponenten der EG-WRRL für Seen, nämlich die ‚Zusam- mensetzung und Abundanz der benthischen wirbellosen Fauna‘ (Makrozoobenthos) und die ‚Zusammensetzung, Abun- danz und Altersstruktur der Fischfauna‘ (Anh. V Ziff. 1.1.2 der EG-WRRL, [2]) beeinflusst werden können. Die Effekte sind überwiegend negativ, da sie in der Bewertung die genannten Qualitätskomponenten vom (naturnahen) Referenzzustand entfernen.

Einige dieser Folgewirkungen, hier mit einem ^(*) gekennzeich- net, sind Gegenstand der aktuellen Forschung. Dagegen sind folgende Auswirkungen durch die Fahrgastschiffahrt, die in der Fachliteratur beschrieben werden, am Bodensee eher weniger relevant:

- die mechanische Beschädigung von Unterwasser- oder Schwimmblattpflanzen⁵ durch Kontakt mit dem Schiffs- rumpf oder dem Propeller (Grund: Befahrungsverbote nach Art. 6.11 Abs. (3) der BSO; ähnlich auch in anderen Schifffahrtsordnungen),

⁵ Am Bodensee und an anderen Seen werden dagegen die Unterwas- serpflanzenbestände aktiv durch Mähboote („Seekuh“) beseitigt, soweit sie sich zu stark entwickeln und Nutzungen behindern.

- visuelle oder auditive Störung oder Störung der Nahrungssuche von Brutvögeln bei Vorbeifahrten auf dem See⁶ sowie an den Landstellen⁷).

AUSWIRKUNGEN DER SCHIFFFAHRT AUF DEN ERHALTUNGSZUSTAND VON UNTERWASSERDENKMÄLERN

Die an vielen Seeufern zu beobachtende Erosion von stein- und bronzezeitlichen Kulturschichten bzw. Pfahlfelder an den Ufern der Alpenseen wurde verschiedentlich mit dem Schiffsverkehr in Verbindung gebracht ([31]). Von den 76 an Seeufern gelegenen UNESCO-Welterbestätten (Typ WH/S1) liegen 59 in Seen mit Fahrgastschiffahrt. Insgesamt sind 1,76 km² und damit 66 % der gesamten Denkmalfäche (Kulturschicht, Pfahlfelder) dieser Welterbestätten betroffen (Abbildung 15; [18]). Schifffahrt stellt damit im überregionalen Rahmen einen potentiell relevanten Belastungsfaktor dar, von dem eine Erosionsgefährdung der Kulturschichten ausgeht.

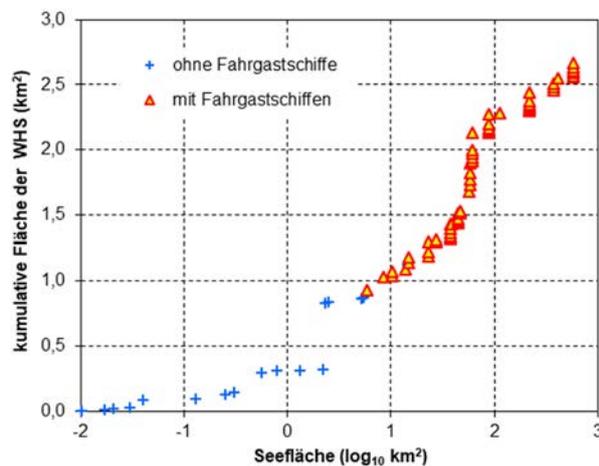


Abb. 15:

Kumulative Flächenverteilung von 76 UNESCO World Heritage Sites (WH/S1) an den Ufern von 27 Alpenseen. Die Seen wurden nach ihrer logarithmierten Flächengröße ($\log_{10} [A/A_0]$, $A_0 = 1 \text{ km}^2$) sortiert. Dreiecke markieren Welterbestätten in Seen mit Fahrgastschiffahrt. Daten aus ([29]).

Grundsätzlich können alle Faktoren von Bedeutung sein, die die Stabilität der schützenden Deckschichten bzw. des Uferreliefs herabsetzen und zu einer höheren Feststoffdynamik führen, mithin also auch der vorbeifahrende Schiffsverkehr. Allerdings fällt es schwer, diese Auswirkungen von denen anderer (anthropogener) Faktoren zu isolieren. Als Ausnahme könnte die Station Unteruhldingen-Stollenwiesen am Überlingersee herangezogen werden. Dort konnte erstmals mit numerischen Simulationen des Sedimenttransports gezeigt werden, dass

durch den Hafen, und vor allem dem Hafenausbau in der 1970er Jahren, der typischerweise vorherrschende, uferparallele Sedimenttransport unterbrochen wird (vgl. [13]). Dies führt zu einem dauerhaften Verlust der Sedimente im Bereich der Fundstelle (vgl. Kapitel 6, Abbildungen 10 und 14). Aus diesem Grund wurde die Fundstelle bereits zwischen 2008 und 2011 mit flächendeckenden Erosionsschutzschüttungen versehen.

HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZUM SCHUTZ DER SEEUFER

Vorbeifahrende Schiffe und Schiffsbewegungen an den Landungsstegen tragen signifikant zur energetischen Belastung der Seeufer bei. Aufgrund der umfassenden Ausbreitung der Wellen hinterlassen diese ihre Wirkung auch in fern von der eigentlichen Schiffsroute gelegenen Uferabschnitten. Schiffswellen erhöhen nicht nur die Feststoffdynamik in der Flachwasserzone, sondern wirken sich auf alle trophischen Ebenen der Uferbiozönose aus. Das führt zu schwer quantifizierbaren, aber doch plausiblen negativen Folgen für den ökologischen Zustand des Wasserkörpers ‚Bodenseeufer‘ nach den Vorgaben der EG-Wasserrahmenrichtlinie ([2]). Darüber hinaus ist der Erhaltungszustand von Unterwasserdenkmälern des UNESCO-Welterbes berührt (zusammenfassend in [1]). Bei der Beurteilung langfristiger Trends ist es oft nicht möglich, die Effekte von Wind- und Schiffswellen zu trennen.

Die aktuelle Entwicklung der Schifffahrt auf dem Bodensee und anderen alpinen Seen mit einer wachsenden Flotte großer Einheiten (Fahrgastschiffe, Kfz-/Personenfähren, Katamarane), einer Verdichtung der Fahrpläne mit einer zunehmenden Zahl von Sonder- und Charterfahrten lässt eine Verstetigung oder sogar Intensivierung der Wellenbelastungen erwarten. Vor diesem Hintergrund ist der Einstieg in eine breit angelegte Diskussion mit allen Institutionen und Interessenverbänden notwendig, z. B. in Form eines ‚Runden Tisches Schifffahrt‘. Am Bodensee könnte die Internationale Bodensee Konferenz (IBK) als übergeordnete internationale Institution die Initiative ergreifen und als Impulsgeber für andere Seen im zirkumalpinen Raum fungieren. Das Ziel muss sein, in den nächsten Jahren und Jahrzehnten die Wellenbelastung und deren negative Wirkung in der Flachwasserzone deutlich zu reduzieren.

Aus umweltwissenschaftlicher Sicht sind sowohl kurzfristige, leicht umzusetzende als auch langfristig angelegte Maßnahmen notwendig:

- (1) Anpassung der Fahrpläne, die den Schiffsführern genügend Zeit für moderate An- und Ablegemanöver und für langsamere Fahrten lassen,

⁶ Die BSO enthält allerdings keine Regelungen zum Schutz rastender Wasservogelpopulationen in der Uferzone.

⁷ An den Landstellen halten sich entsprechend verhaltensadaptierte Subpopulationen bestimmter Vogelarten auf.

- (2) Geschwindigkeitsreduktion bei uferparalleler Fahrt und v. a. innerhalb der 300 m-Uferzone bei der Fahrt von und zu den Landstellen,
- (3) Anpassung der Schiffsrouten: i) weniger uferparallele Routen durch Verlegung der etablierten Routen, ii) strikte Berücksichtigung der 300 m-Uferzone auch für an- und abfahrende Fahrgastschiffe,
- (4) keine weitere Intensivierung der Charterfahrten vor allem zu Zeiten niedriger Wasserspiegel v. a. im Winterhalbjahr,
- (5) Sensibilisierung der Schiffsführer gegenüber Wellenbelastungen und Erosionsschäden, z. B. durch Schulungen und veränderte Dienstanweisungen,
- (6) An- und Ablegemanöver die geeignet sind, die Strahlwirkung der Propeller im Bereich des Anlegers zu reduzieren,
- (7) Prüfung schiffsbautechnischer Veränderungen an den Schiffen mit dem Ziel, bei typischen Fahrtgeschwindigkeiten die erzeugte Wellenhöhe zu reduzieren,
- (8) Begrenzung des Trends zu immer größeren Schiffen mit großer Wasserverdrängung und entsprechend hoher Wellenerzeugung,
- (9) Aufzeichnung und anonymisierte Auswertung der Schiffs-kurse zum Erkennen besonders problematischer Kurse.

Die hier ausgesprochenen Empfehlungen und vorgeschlagenen Maßnahmen zur Reduktion der anthropogenen Wirkungen der Schifffahrt basieren auf dem aktuellen Stand der Forschung. Zukünftige Planungen zum nachhaltigen Management der Uferzone sollten nicht nur auf die Reduktion der direkten anthropogenen Wirkungen der Schifffahrt in der Flachwasserzone von Seen selbst abzielen, sondern auch die nachteiligen Auswirkungen der damit verbundenen Infrastruktur, z. B. Schiffsanleger und Hafenanlagen, mit in die Betrachtungen einbeziehen.

QUELLENVERZEICHNIS

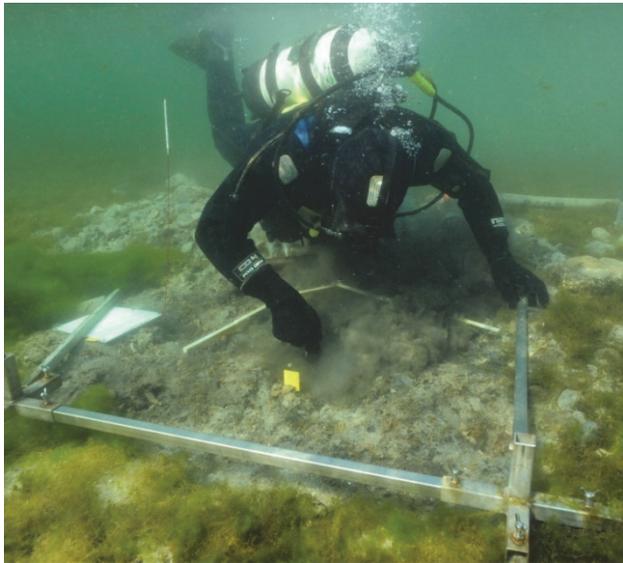
- [1] BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHERR, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER H. G., Hrsg. (2013): Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. – Vorarlberg Museum Schriften 1, Bregenz, ISBN: 3-901802-35-5.
- [2] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327 vom 22.12.2000, S. 1–83.
- [3] GABEL, F., GARCIA, X.-F., BRAUNS, M., SUKHODOLOV, A., LESZINSKI, M. und PUSCH, M. T. (2008): Resistance to ship-induced waves of benthic invertebrates in various littoral habitats. – *Freshwater Biology* 53 (8): 1567–1578, DOI: 10.1111/j.1365-2427.2008.01991.x.
- [4] GABEL, F., GARCIA, X.-F., SCHNAUDER, I. und PUSCH, M. T. (2012): Effects of ship-induced waves on littoral benthic invertebrates. – *Freshwater Biology* 57 (12): 2425–2435, DOI: 10.1111/fwb.12011.
- [5] GABEL, F., STOLL, S., FISCHER, P., PUSCH, M. T. und GARCIA, X.-F. (2011): Waves affect predator-prey interactions between fish and benthic invertebrates. – *Oecologia* 165 (1): 101–109, DOI: 10.1007/s00442-010-1841-8.
- [6] GABEL, F., LORENZ, S. und STOLL, S. (2017): Effects of ship-induced waves on aquatic ecosystems. – *Science of the Total Environment* 601–602: 926–939.
- [7] HOFMANN, H. und OSTENDORP, W. (2017): Hydrodynamische Exposition und Sedimentremobilisierung in der Kressbronner Bucht und Seebodenveränderungen am Kressbronner Steg durch die Kursschiffahrt: Ergebnisse aus dem Verbundprojekt HyMoBio-Strategie. – *Kressbronner Jahrbuch* 30: 114–122.
- [8] HOFMANN, H., LORKE, A. und PEETERS, F. (2008a): The relative importance of wind and ship waves in the littoral zone of a large lake. – *Limnology and Oceanography* 53 (1): 368–380.
- [9] HOFMANN, H., LORKE, A. und PEETERS, F. (2008b): Temporal and spatial scales of water level fluctuations in lakes and their ecological implications. – *Hydrobiologia* 613 (1): 85–96, DOI: 10.1007/s10750-008-9474-1.
- [10] HOFMANN, H., LORKE, A. und PEETERS, F. (2011): Wind and ship wave-induced resuspension in the littoral zone of a large lake. – *Water Resources Research* 47: W09505, DOI: 10.1029/2010WR010012.
- [11] HOFMANN, H., SEIBT, C. und PEETERS, F. (2013): Wellenexposition und Resuspensionspotential ausgewählter Untersuchungsgebiete am Bodensee: Messungen und Modellierung. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHERR, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H.-G. (Hrsg.), *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 37–51, Bregenz.
- [12] ICKB, INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE, Hrsg. (2004): *Der Bodensee. Zustand – Fakten – Perspektiven*. 177 S., Bregenz.
- [13] KÖNNINGER, J. und WESSELS, M. (2013): Zustandserfassungen und Beobachtungen in der Station Unteruhldingen-Stollenwiesen. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHERR, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee*. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 247–255, Bregenz.
- [14] LANDTAG VON BADEN-WÜRTTEMBERG (2010): Antrag der Abg. Siegfried Lehmann u. a. GRÜNE und Stellungnahme des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr: Durch Schifffverkehr verursachte Schäden am Bodenseeufer. – Drucksache 14/6842 vom 17.08.2010, 6 S., Stuttgart.
- [15] LUFT, G. und VAN DEN EERTWEGH, G. (1991): Long-term changes in the water level of Lake Constance and possible causes. – In: SCHILLER, G., LEMMEL, R. und SPREAFICO, M. (Hrsg.), *Hydrology of natural and manmade lakes*, S. 31–44. IAHS Press.
- [16] OSTENDORP, W. (1992): Shoreline algal wash as a factor in reed decline in Lake Constance- Untersee. – *Hydrobiologia* 242: 165–174.
- [17] OSTENDORP, W. (1995): Estimation of mechanical resistance of lakeside *Phragmites* stands. – *Aquatic Botany* 51: 87–101.
- [18] OSTENDORP, W. (2016): Erosion hazards in littoral pile dwelling sites of the UNESCO World Heritage. – Scientific Report, Limnological Institute, University of Konstanz, 16 pp., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.004.
- [19] OSTENDORP, W. (2019): Veränderungen der Wasserstandsdynamik des Bodensees seit 1931. – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.017.
- [20] OSTENDORP, W., HOFMANN, H., TEUFEL, L., MILER, O.: Effects of a retaining wall and an artificial embankment on nearshore littoral

- habitats and biota in a large alpine lake. – *Hydrobiologia* (im Druck).
- [21] PROBST, W. N., STOLL, S., HOFMANN, H., FISCHER, P. und ECKMANN, R. (2009): Spawning site selection of Eurasian perch *Perca fluviatilis* L. in relation to temperature and wave exposure. – *Ecology of Freshwater Fish* 18: 1-7, DOI: 10.1111/j.1600-0633.2008.00327.x.
- [22] SCHOELLHAMER, D. H. (1996): Anthropogenic sediment resuspension mechanisms in a shallow microtidal estuary. – *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43 (5): 533–548, DOI: 10.1006/ecss.1996.0086.
- [23] SORENSEN, R. M. (1973): Ship-generated waves. – *Advances in Hydroscience* 9: 49–83.
- [24] STOLL, S. und BEECK, P. (2012): Larval fish in troubled waters - is the behavioural response of larval fish to hydrodynamic impacts active or passive? – *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 69: 1576–1584.
- [25] STOLL, S. und FISCHER, P. (2011): Three different patterns of how low-intensity waves can affect the energy budget of littoral fish: a mesocosm study. – *Oecologia* 165: 567–576.
- [26] STOLL, S., FISCHER, P., KLAHOLD, P., SCHEIFHACKEN, N., HOFMANN, H. und ROTHHAUPT, K.-O. (2008): Effects of water depth and hydrodynamics on the growth and distribution of juvenile cyprinids in the littoral zone of a large pre-alpine lake. – *Journal of Fish Biology* 72: 1001–1022, DOI: 10.1111/j.1095-8649.2007.01780.x.
- [27] STOLL, S., HOFMANN, H. und P. FISCHER, P. (2010a): Effect of wave exposure dynamics on gut content mass and growth of young-of-the-year fishes in the littoral zone of lakes. – *Journal of Fish Biology* 76: 1714–1728, DOI: 10.1111/j.1095-8649.2010.02611.x.
- [28] STOLL, S., PROBST, W., ECKMANN, R. und FISCHER, P. (2010b): A mesocosm experiment investigating the effects of substratum quality and wave exposure on the survival of fish eggs. – *Aquatic Sciences* 72 (4): 509–517, DOI: 10.1007/s00027-010-0152-9.
- [29] UNESCO, UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION, Hrsg. (2010, 2011): Prehistoric Pile Dwellings around the Alps - World Heritage nomination. – Nomination Dossier: Executive Summary (2010, revidiert in 2011), Volumes I, II, III (2010) and Additional Information (2011). Paris (Download unter <<http://www.palafittes.org/en/products-0downloads/news/index.html>>; zuletzt aufgerufen im Juli 2018).
- [30] WESSELS, M., BRÜCKNER, N., GAIDE, S. und WINTERSTELLER, P. (2017): Tiefenschärfe – die hochauflösende Vermessung des Bodensees. – *Wasserwirtschaft* 4: 30–35.
- [31] WESSELS, M., HOFMANN, H., OSTENDORP, W., SCHRÖDER, H.G. & WEBER, M. (2013): Handlungsoptionen zum Schutz archäologischer Denkmäler in der Flachwasserzone. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHERR, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER H. G., (Hrsg.): Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 293–300, Bregenz.

Kapitel 10

Archäologische Denkmalpflege in der Uferzone des Bodensees

Renate Ebersbach, Martin Mainberger, Julia Goldhammer und Wolfgang Ostendorf ¹



Zum Schutz archäologischer Denkmäler empfehlen wir:

- erosionsfördernde Störungen in der Uferzone reduzieren, am besten vermeiden,
- alle geplanten Massnahmen in der Uferzone im Vorfeld mit dem Landesamt für Denkmalpflege abstimmen,
- Erosions- und Akkumulationsmessung mit Eichenpflöcken und/oder moderne Messtechniken,
- Einbau von Schutzabdeckungen vorher modellieren, Schüttungsmaterial in verschiedenen Korngrößen verwenden, Wabenschüttungen, kein ortsfremdes Material einbringen.

In der Uferzone der Voralpenseen haben sich über Jahrtausende die Relikte prähistorischer Siedlungen erhalten. Durch Erosion und Nutzungsdruck sind diese Reste gefährdet. In diesem Kapitel werden die Problemlage und der bisherige Kenntnisstand kurz skizziert sowie die Maßnahmen und Entwicklungen im Rahmen des HyMoBioStrategie-Projekts erläutert. Im Vordergrund stehen dabei wissenschaftliche und technologische Entwicklungen zur Messung von Erosion und Akkumulation, neue Techniken und Ansätze im Monitoring und die Kontrolle bzw. Verbesserung von Schutzmaßnahmen. Am Ende des Kapitels wird die Umsetzung und Zusammenführung dieser neuen Ansätze im Rahmen eines neuen, mehrjährigen Monitoring-Plans für alle Bodensee-Stationen vorgestellt. Begriffe, die mit einem ↪ gekennzeichnet sind, werden im Glossar näher erläutert.

DENKMALSCHUTZ IN DER UFERZONE

Schon in prähistorischen Zeiten lebten Menschen an den Ufern der Voralpenseen. Während der Jungsteinzeit und der Bronzezeit (ca. 4300 v. Chr. bis 800 v. Chr.) wurden in den Uferzonen hunderte von Siedlungen errichtet. Die herausragende Bedeutung der Fundstellen wurde 2011 durch die Aufnahme der 'Prähistorischen Pfahlbauten um die Alpen' in die UNESCO-Welterbeliste gewürdigt ([9], [22], [23]). In Baden-Württemberg liegen 15 der 111 gelisteten Fundstellen, neun davon am Bodensee-Ufer (Abbildung 1). Zwei weitere Stationen liegen am schweizerischen Bodenseeufer.

In den 1980er Jahren wurde deutlich, dass die Reste vieler Siedlungen entlang der Seeufer einer dauerhaften Zerstörung

ausgesetzt sind ([1], [19], [20]). Wellentätigkeit und Ufererosion, gelegentlich in Verbindung mit Uferschutzmaßnahmen und anderen Uferbauten, galten als die wichtigsten Gefährdungsfaktoren. Der Status als Welterbe bringt die Verantwortliche und technologische Forschung zu initiieren, die es den zuständigen Behörden ermöglicht, die Gefährdung der prähistorischen Denkmalsubstanz abzuwenden ([3], [15]).

Den Umgang mit archäologischen Denkmälern regelt in Baden-Württemberg das Denkmalschutzgesetz (DSchG BW²). Alle archäologischen Fundstellen und Objekte sind Kulturdenkmale im Sinne des Denkmalschutzgesetzes und sind in der Denkmalliste erfasst (DSchG BW §2). Einige Feuchtboden-

¹ Renate Ebersbach, Julia Goldhammer, Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie, renete.ebersbach@rps.bwl.de, julia.goldhammer@rps.bwl.de; Martin Mainberger, UWARC Archäologie unter Wasser, martin.mainberger@uwarc.de; Wolfgang Ostendorf, Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umweltphysik, wolfgang.ostendorf@uni-konstanz.de.

² Gesetz zum Schutz der Kulturdenkmale (Denkmalschutzgesetz - DSchG) in der Fassung vom 6. Dezember 1983, zuletzt geändert 23. Februar 2017 (GBl. S. 99, 104).

fundstellen, darunter auch alle gelisteten Welterbestätten, genießen besonderen Schutz durch die Eintragung in das Denkmalsbuch nach §12 DSchG BW oder sind als Grabungsschutzgebiete nach §22 DSchG BW ausgewiesen. Oberste Denkmalschutzbehörde ist das baden-württembergische Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau, zuständig für Fundstellen in der Flachwasserzone sind das Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie und das Pfahlbauten-Informationszentrum des Landesamtes für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart.



Abb. 1:

Von den über hundert bekannten Seeufersiedlungen am baden-württembergischen Bodensee (schwarze Punkte) stehen neun auf der Liste des UNESCO-Welterbes 'Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen' (rote Symbole).

Die wassergesättigten Böden und Sedimente der Seeuferzone bieten optimale Erhaltungsbedingungen für die Bauhölzer (z.B. Pfähle) sowie die mineralischen und vor allem die organischen Bestandteile der Kulturschichten (Abbildung 2).

In den Seeufersiedlungen sind dadurch Quellen zum Alltagsleben der Menschen von vor tausenden von Jahren erhalten, die sich in anderen archäologischen Fundstellen nur selten finden lassen. Viele Fundstellen waren schon im 19. Jahrhundert bekannt. Eine erste systematische Erfassung der baden-württembergischen Feuchtbodensiedlungen wurde in den frühen 1980er Jahren durch Helmut Schlichtherle und Mitarbeiter*innen im Rahmen des DFG-geförderten 'Projekts Bodensee-Oberschwaben' durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass viele Fundstellen in der Uferzone des Bodensees gefährdet sind, vor allem durch die flächige Erosion. Bei manchen Flächen drohte Totalverlust innerhalb weniger Jahre. Rettungsgrabungen waren stets nur die letzte Option, um Befunde und Fundmaterial für kommende Generationen zu sichern. Das Landesamt für Denkmalpflege hat deshalb bereits in den späten 1980er Jahren angefangen, Erosionsmarker zu installieren und Schutzmaßnahmen vor Ort als Option für die dauerhafte Erhaltung in Betracht zu ziehen ([6], [11], [10]; Abbildung 3).

Eine wichtige Rolle hat dabei von Anfang an die enge Zusammenarbeit mit Fachbehörden des Gewässerschutzes und des Naturschutzes gespielt. Auf der internationalen Ebene konnte der aktuelle Wissensstand zuletzt im EU-geförderten Interreg IV - Projekt 'Erosion und Denkmalschutz' ([1]) aufbereitet



Abb. 2:

Grabungsfläche in der Seeuferstation Hornstaad-Hörnle I, 1990. Helle Seeablagerungen wechseln sich mit dunklen Kulturschichten ab. Die Pfähle sind im wassergesättigten Bereich gut erhalten. Farbige Schildchen markieren dokumentierte bzw. beprobte Hölzer.

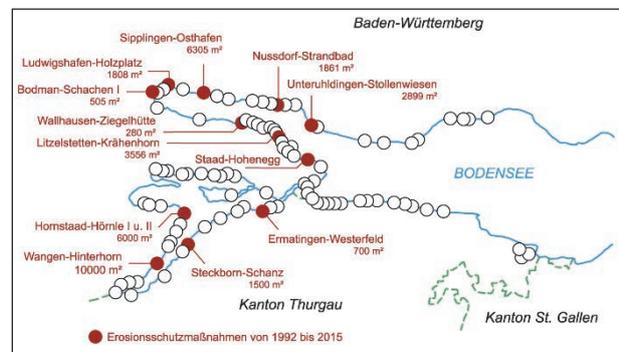


Abb. 3:

Karte der denkmalpflegerischen Schutzmaßnahmen im westlichen Bodensee, Stand 2015.

und vertieft werden. Daraus ergaben sich verschiedene Themenfelder, die für den zukünftigen Umgang mit diesen fragilen archäologischen Denkmälern weiter bearbeitet und erforscht werden müssen:

Schutzmaßnahmen:

- Monitoring der verschiedenen bisher eingebrachten Varianten bezüglich ihrer langfristigen Auswirkungen auf das archäologische Denkmal,
- Monitoring bezüglich der ökologischen Auswirkungen und der Umweltverträglichkeit der Abdeckungen,
- Entwicklung von Techniken zur Verringerung des Aufwands und Einsparung von Material,
- optimale Positionierung der Abdeckungen innerhalb der Fundstellen;

Erosion und Akkumulation:

- Optimierung der bestehenden Messinstallationen,
- Auswertung der bisherigen Ergebnisse und Anpassung der Überwachung,

- Entwicklung flächig einsetzbarer Techniken zur Erosionsmessung,
- Erforschung der Gründe für die Lage und Intensität flächiger Erosionsprozesse;

Monitoring:

- Übersicht der heute vorhandenen Qualität und Quantität von Bestandsaufnahmen der einzelnen Stationen,
- Entwicklung eines langfristig angelegten, systematischen Plans zur Überwachung und Kontrolle aller Stationen,
- Aufbau dreidimensionaler Modelle der Stationen und ihres Umfeldes, u. a. auch mit autonomen Messfahrzeugen und hydrodynamischer Modellierung,
- Beurteilung der aktuellen Gefährdung und Entwicklung von mittel- und langfristigen Vorhersagemodellen.

Im Rahmen des HyMoBioStrategie-Projektes konnten viele dieser Themenfelder bearbeitet und vorgebracht werden. Im Vordergrund standen dabei die Untersuchung der Stabilität und der ökologischen Auswirkungen von Schutzmaßnahmen, die Verbesserung der Erosions- und Akkumulationsbeurteilung sowie die Integration der neuen technischen Möglichkeiten in den Monitoringplan.

SCHUTZMASSNAHMEN

Erosionsschutzmaßnahmen bestehen am baden-württembergischen Bodenseeufer in der Regel aus Abdeckungen der Kulturschichten und der verbliebenen Sediment-Deckschichten. Diese können aber immer nur kleinere Areale der oft mehrere Hektar großen Pfahlbaufundstellen schützen, so dass eine optimale Positionierung und eine Sicherstellung des langfristigen Schutzes besonders wichtig sind. Die ersten Abdeckungen, die in der Station Wangen-Hinterhorn am Bodensee-Untersee 1986 mit einer Kombination aus Geotextil und Kies durchgeführt wurden, führten nicht nur zu positiven Erfahrungen – unter dem Geotextil sammelten sich stellenweise Faulgase, dadurch löste sich das Geotextil vom Untergrund (Abbildung 4).

Die erosionsgefährdeten Kulturschichten liegen oft direkt an der Oberfläche, sind weich und enthalten empfindliche Hölzer. Schutzmaßnahmen müssen deshalb gewährleisten, dass die Kulturschichten nicht durch die Art der Materialaufbringung bzw. durch die Auflast des Schüttungskörpers beeinträchtigt werden.

Die Verwendung von Baggergut z. B. aus Hafenanlagen für Abdeckungen in nahe gelegenen Fundstellen kann deshalb nur nach vorheriger Prüfung der Korngrößenzusammensetzung erfolgen, wie zum Beispiel die Verwendung von Material aus dem Fährhafen von Konstanz-Staad gezeigt hat. Die darin enthaltenen großen Gerölle waren zu schwer für eine Abdeckung der Fundstelle Konstanz-Hohenegg und wurden deshalb etwas

landwärts des Pfahlfeldes positioniert, von wo aus die leichteren und beweglichen Sedimente sich, dem natürlichen Gefälle folgend, in Richtung der Fundstelle verlagern können.



Abb. 4:

Die Geotextil-Abdeckung in der Station Wangen-Hinterhorn kommt durch Faulgase an die Oberfläche. Begehung 2008 durch W. Ostendorp.

Bei späteren Schutzmaßnahmen, teils mit herkömmlichen Wasserbaumaßnahmen kombiniert, wurden grobmaschigere Geotextile und andersartige Deckmaterialien verwendet. So wurden in der Hafenausfahrt im Bereich der Station Sipplingen-Osthafen ausgekolkte Erosionskanten mit Larssen-Profilen mit Holzabdeckung gesichert und die angrenzenden oberflächlich freiliegenden Kulturschichten mit scharfkantigem Schotter abgedeckt (Abbildung 5). Das neu geschaffene Relief blieb ungeachtet der geringmächtigen Materialauflage über lange Beobachtungsräume sehr stabil. Problematisch war aber die Verwendung von im Bodensee nicht natürlich vorkommenden Materialien.



Abb. 5:

Schutzschüttungen in der Fundstelle Sipplingen-Osthafen 2009. Der Kies wird auf das Floß umgeladen.

Als Werkzeug für die Ausbringung des Schüttungsmaterials hat sich ein für diesen Zweck entwickeltes Arbeitsfloß mit einem jalousieartigen Boden bewährt ([11], S. 114). In den relativ großflächigen Schüttungen im Rahmen des Interreg IV-Projektes 'Erosion und Denkmalschutz' sowie bei den vertikalen Dislozierungen großer Konstruktionen, wie bei Schiffswracks in der Flachwasserzone im Umfeld der Klosterinsel Reichenau ([12]; [10]: S. 56) wurde als Deckmaterial gewaschener Kies aus nahe gelegenen Kiesgruben in den Körnungen 8–16 mm (ca. ein Drittel) und 32–100 mm (ca. zwei Drittel) eingesetzt.

Nach den bislang vorliegenden Beobachtungen sind diese Schutzeinbauten mechanisch stabil und schützen zuverlässig gegen Ankerschäden und weiteren Sedimentabtrag. Um den Aufwand und die Schüttmengen zu reduzieren, wurde außerdem mit Wabenschüttungen mit Seitenlängen von 50–65 m und Wabenöffnungen von 7,5 m bzw. 33 × 26 m in den Stationen Sipplingen-Osthafen und Litzelstetten-Krähenhorn experimentiert ([11]). Die kleineren Waben zeigten dabei in Sipplingen-Osthafen schon nach kurzer Zeit eine natürliche Verfüllung des Wabeninneren, während in Litzelstetten-Krähenhorn im Inneren der größeren Waben verstärkte Erosion beobachtet wurde. Ob diese Beobachtungen nur mit der Größe der Waben zusammenhängen oder auch auf lokale Strömungsverhältnisse zurückzuführen sind, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschließend beurteilt werden.

Eine erste Bestandsaufnahme dieser Schutzabdeckungen bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit erfolgte im Jahr nach Fertigstellung der Maßnahmen ([16]). Auffällig war das vollständige Fehlen von Unterwasservegetation auf den Schüttungsflächen, so dass auch die Makrozoobenthos-Dichte deutlich herabgesetzt war. Die Ursache wurde in der verzögerten Kolmation des Schüttungskörpers gesehen. Es wurde empfohlen, die Kolmation durch Beimischung von Grobsand und Feinkies zu beschleunigen.

Im Rahmen des HyMoBioStrategie-Projekts folgte in 2017 eine Nachuntersuchung ([17]). Hierbei wurden die Vegetationsdichte und die aschefreie Phytomasse auf sechs denkmalpflegerischen Erosionssicherungsflächen mit jeweils mehreren Bauvarianten mit den Werten naturbelassener Litoralfächen verglichen. Die Maßnahmen hatten zu dieser Zeit ein Alter zwischen 3 und 13 Jahren. Die Kies- und Geröllschüttungen sowie die Waben-Innenflächen zwischen den Riegel-Schüttungen besaßen eine ähnliche Vegetationsentwicklung wie die zugehörigen Referenzflächen, so dass keine naturschutzfachlichen Bedenken im Sinne der FFH-Richtlinie (NATURA 2000) gegen diese Maßnahmen bestehen. Dagegen wies die einzige zur Verfügung stehende Geotextilfläche in der Station Sipplingen-Osthafen eine auffällig reduzierte Vegetation auf, so dass von dieser Ausführungsvariante aus ökologischen Gründen abgeraten wird. Mit Hilfe von Geröll-Tracern konnte außerdem die Stabilität der Schüttungen kontrolliert werden (vgl. Kapitel 7, S. 79–80). Systematische Untersuchungen zur Wirkung der plan-

mäßig etwa 25 cm hohen und entsprechend auflastigen Flächenschüttungen auf die abgedeckten Kulturschichten gibt es noch nicht.

Die Modellierung von Wellenfeldern und Sedimenttransport zeigt die Auswirkungen von Einbauten am Ufer im Vergleich zur natürlichen Situation. Dadurch kann, wie am Beispiel des Hafens von Unteruhldingen gezeigt (vgl. Kapitel 6, S. 61–62), ein verändertes Erosionsgeschehen in einer archäologischen Fundstelle in der Rückschau erklärt werden. Diese Modelle eröffnen auch die Möglichkeit, bei der Planung zukünftiger Schutzmaßnahmen deren Position, Ausdehnung und Auswirkungen auf den lokalen Sedimenttransport im Voraus zu modellieren.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich folgende **Empfehlungen für Erosionsschutzmaßnahmen** durch Abdeckung ableiten:

- Kombinationen von Geotextil und Schüttung verwenden,
- Wabenschüttungen sparen Material und Aufwand,
- möglichst kein ortsfremdes Material benutzen,
- bei der Aufbringung des Schüttgutes ist auf die Korngröße zu achten,
- die Verwendung einer hohen Bandbreite an Korngrößen innerhalb einer Schüttung begünstigen die Ansiedlung von Makrophyten und Makrozoobenthos,
- bewährt haben sich Schüttungen aus zwei Dritteln Kies mit der Körnung 32–100 mm und einem Drittel feineren Materials mit Körnung 8–16 mm,
- die Stabilität der Abdeckung kann mit Kies-/Geröll-Tracern kontrolliert werden,
- Position und Orientierung der Abdeckung sowie daraus folgende veränderte Wellenfelder bzw. Sedimentbilanzen sollten vorgängig modelliert werden.

EROSION UND AKKUMULATION

Messmarken zum einfachen händischen Messen von Sedimentabträgen gehören zu den zentralen Instrumenten des unterwasserarchäologisch-denkmalpflegerischen Monitorings ([13]). Durchgesetzt haben sich am baden-württembergischen Bodenseeufer einheitliche Vierkant-Eichenpflocke, die inzwischen in 39 Fundstellen eingebracht sind und durch archäologische Forschungstaucher mit einfachen Mitteln betreut werden können (Abbildung 6). Die im Interreg IV-Projekt erprobten Vorkehrungen für Schnurgerüste, aber auch die Ketten-, Stahl- und Kunststoffstangen hatten hingegen verschiedene Nachteile. So wurden Ketten und Kunststoffstäbe in Ufernähe immer wieder von Badegästen herausgezogen.

Im HyMoBioStrategie-Projekt wurde die Arbeitstechnik zum Ablesen der Vierkant-Eichenpflocke weiterentwickelt ([18]). So

wurde eine Messhilfe entwickelt, die die Messfehler auf weniger als $\pm 0,5$ cm reduziert (vgl. Kapitel 7, S. 73–74). Als unbefriedigend erwies sich die alleinige Messung des Sohlniveaus in Stationen, in denen mächtige Deckschichten aus Sand über den Kulturschichten auftreten. Offensichtlich können diese Sande mobil sein und die Erosion greift tiefer ein, als das Sedimentoberflächenniveau es vermuten lässt. Die Erosions-/Akkumulationsmarker werden in solchen Stationen zukünftig mit kragenförmigen Metallplatten ausgestattet, die aufgrund ihres Gewichtes bis auf die immobilen Seekreiden und Kulturschichten im Liegenden absinken und so die Messung der maximalen Erosionstiefe möglich machen (vgl. Abbildung 6 in Kapitel 7).



Abb.6:

Einsatz der Messhilfe zur Erfassung von Erosion in der Station Nußdorf-Constantinhalde (2018). Im Vordergrund ist ein konventioneller Marker (PVC-Rohr) zu sehen, der hintere Marker wird gerade eingemessen (Foto: J. Königer, © LAD Baden-Württemberg).

Eine erste Analyse der über mehrere Jahre abgelesenen Erosionsmarker hat nur geringe Schwankungen ergeben, allerdings ist die Datengrundlage in den einzelnen Stationen uneinheitlich (Anzahl der Erosionsmarker, Ableserhythmen usw.), die Unterscheidung von anekdotischen Einzelereignissen und langfristigen Trends erfordert noch weitere Detailanalysen.

Neben der langjährigen, schleichenden Flächenerosion können auch kurzfristige Ereignisse (Starkwind) oder saisonale Schwankungen die Fundstellen gefährden, die bei langjährigen Mittelwert-Messungen nicht auffallen. Hier erbrachten die Ergebnisse der hydroakustischen Erosionsmarker weitere Einblicke (vgl. Kapitel 7, S. 74–75). So waren die Magnituden der Änderung der Sedimentauflage während sowie vor und nach eines Sturmerignisses wesentlich größer als die langfristigen, über ein Jahr hinweg gemessenen Erosions- und Akkumulationsraten.

Auch saisonale Wasserspiegelschwankungen und der unterschiedliche Unterwasserpflanzenbewuchs spielen eine wichtige Rolle im Erosionsgeschehen. Bei der Planung von Schutzmaßnahmen müssen deshalb das winterliche Niedrigwasser in Kom-

bination mit außergewöhnlichen Sturmtagen besonders berücksichtigt werden. Der Einfluss des Schiffsverkehrs auf das lokale Erosionsgeschehen darf nicht unterschätzt werden, so führen größere Schiffe mit hoher Wasserverdrängung und Motorisierung durch Wellenschlag und An- und Ablegemanöver lokal zu starker Erosion (vgl. Kapitel 9, S. 108–110).

Daraus können folgende **Handlungsempfehlungen** abgeleitet werden:

- die Verwendung von Eichenpflocken mit Schwimmschnüren zur leichteren Auffindung hat sich bewährt,
- bei Verdacht auf mobile Decksedimente ermöglichen schwere Metallkragen zusätzlich die Erfassung des langfristig stabilen Seebodens und die Messung der maximalen Erosionstiefe,
- Messungen wenn möglich immer zur gleichen Jahreszeit ausführen, um saisonale Schwankungen der Erosion/Akkumulation als Faktor auszuschließen,
- werden Änderungen von Schiffsrouten oder An- und Ablegemanövern im Uferbereich geplant, so sollten die Fachbehörden der Denkmalpflege frühzeitig in die Überlegungen einbezogen werden.

MONITORINGMETHODEN

Denkmalpflegerisches Monitoring kann in Anlehnung an Monitoring im Naturschutz als das systematische Erfassen und Überwachen archäologischer Denkmale durch messende Beobachtung, die Bewertung von Erhaltungsrisiken und die Erarbeitung von Konzepten zur Minderung von Risiken begriffen werden. Der 'Leitfaden Monitoring' ([13]) hat ein recht großes Portfolio möglicher Monitoring-Techniken zusammengetragen. Aus geländearchäologisch-denkmalpflegerischer Sicht haben sich in den letzten Jahren vor allem die Fernerkundungstechniken weiterentwickelt. So hat sich die Bewertungsgrundlage durch die jüngste Bodensee-Tiefenvermessung (Interreg-Projekt 'Tiefenschärfe' [24], [25]) deutlich verbessert. Auch die Möglichkeiten der Vermessung aus der Luft und mithilfe von Messdrohnen haben sich weiterentwickelt. Wie photogrammetrische Messverfahren und Structure From Motion (SfM)-Techniken etwa am Beispiel der Station Konstanz–Frauenpfahl zeigen konnten, können aus der Luft auch in beträchtlichen Wassertiefen noch sehr gut aufgelöste und im Dezimeterbereich genaue Messbilder entstehen (Abbildung 7).

Autonome Messfahrzeuge sind bereits verschiedentlich in der Erprobung. Sie sollen es ermöglichen, größere Flächen mit einem geringeren Bedarf an ausgebildeten Forschungstauchern zu dokumentieren. Mit der Entwicklung des 'Hydrocrawlers' durch das Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik im Rahmen des HyMoBioStrategie-Projektes (vgl. Kapitel 5) werden das gleichzeitige Messen und Fotografieren mit verschiedenen Techniken und Auflösungen im Zentimeterbereich mög-

lich. Ein an der TU Darmstadt entwickeltes Unterwassergeoradar befindet sich mit Unterstützung durch das Institut für Seenforschung in Langenargen in Erprobung (vgl. Kapitel 4).

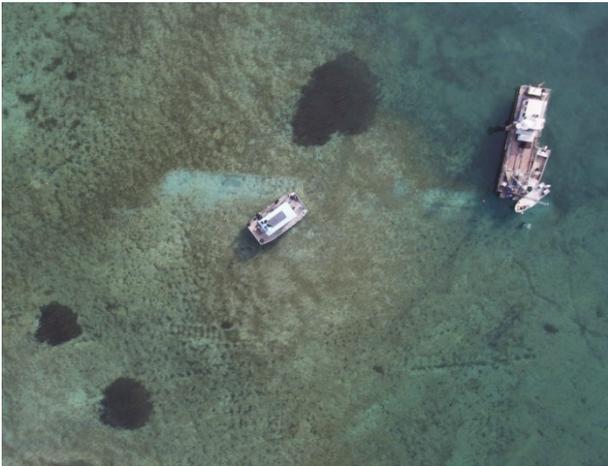


Abb. 7:

Taucharchäologische Untersuchungen in der Fundstelle Konstanzer-Frauenpfahl 2011. Die rechteckigen hellen Streifen zeigen die Untersuchungsschnitte an.

Ein wichtiger Punkt im Monitoring der Fundstellen ist die Beobachtung von Neophyten und Neozoen bzw. von mittelfristigen Veränderungen in der Ausdehnung und Zusammensetzung der Unterwasservegetation. So wurde etwa im Zuge der seit 2012 andauernden archäologischen Bestandsaufnahme der Station Konstanzer-Frauenpfahl am Ausfluss des Bodensee-Obersees in den Seerhein beobachtet, dass sich die Makrophytenbestände innerhalb eines halben Jahrzehnts von einigen wenigen Flecken flächendeckend vergrößerten. 2012 handelte es sich wohl fast ausschließlich um das Schweizer Laichkraut (*Stuckenia helvetica* (G. FISCH.) HOLUB, Syn. *Potamogeton helveticus*). Außerhalb der etwa 100 m² bedeckenden Bestände waren die Seekreiden und mobilen Decksande vegetationsfrei. 2018 hatte sich dann – bei stark vergrößerten Laichkraut-Beständen – die Armleuchteralge *Chara globularis* THUILL. über das gesamte Pfahlfeld ausgebreitet (Abbildung 8).

Das Arbeiten in den dichten, meterhoch aufwachsenden Laichkraut-Beständen erwies sich taucherisch als durchaus neue Erfahrung: Während an der Wasseroberfläche starke Strömungen wirkten, war am Seeboden keinerlei Wasserbewegung mehr festzustellen. Das ist eine weitere Bestätigung dafür, dass dichter Pflanzenbewuchs den Sedimentabtrag am Seeboden reduzieren kann. Umgekehrt kann das Fehlen von Wasserpflanzenbeständen in vormals bewachsenen Uferabschnitten auf kürzliche oder länger zurückliegende Erosionsereignisse oder Änderungen in der Trophie des Sees verweisen.

Unter den Neozoen richtet vor allem der Kamberkrebs *Orconectes limosus* (RAFINESQUE) substantielle Schäden an Kulturschichten an, indem er seine Wohnhöhlen von den offen lie-

genden Erosionskanten aus in die Kulturschichten hineingräbt und diese damit weiter destabilisiert ([10]: S. 56). In Ausbreitung begriffen ist die Quagga-Dreikantmuschel *Dreissena bugensis* ANDRUSOV (Syn. *D. rostriformis bugensis*). Dass Dreikantmuscheln einen Risikofaktor für Kulturschichten und Pfahlfelder darstellen können, zeigt das Beispiel der Dreikantmuschel *Dreissena polymorpha*, die seit 1966 das Bodensee-Litoral besiedelt. Die Muscheln dienen Wasservögeln als Nahrung: Werden sie von ihrer Unterlage – etwa einem Pfahl – ‘abgepflückt’, bleibt an den Byssusfäden stets ein wenig Hartsubstrat haften. Die Ausbreitung der neuen Dreikant-Muschelart muss vor diesem Hintergrund also auch aus denkmalpflegerischer Sicht weiter sorgfältig beobachtet werden.

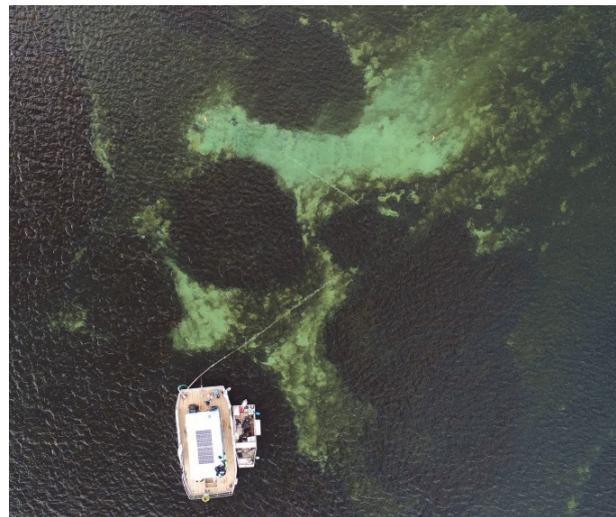


Abb. 8:

Taucharchäologische Untersuchungen in der Fundstelle Konstanzer-Frauenpfahl 2018. Das Areal ist im Vergleich zu 2011 (Abbildung 7) fast flächendeckend mit Schweizer Laichkraut bewachsen.

EIN NEUER FÜNFJAHRESPLAN FÜR UFRSIEDLUNGEN DES BODENSEES

Im Rahmen des HyMoBioStrategie-Projektes wurden nicht nur in einzelnen Teilprojekten technische Verbesserungen und neue Forschungsansätze erprobt, sondern auch bisherige Untersuchungen und Maßnahmen zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt. Dabei zeigte sich, dass unser Wissen über den Erhaltungszustand der einzelnen Unterwasserdenkmäler am Bodensee sehr unterschiedlich ist. In manchen Stationen wird seit Jahren regelmäßig der Zustand kontrolliert und es sind zahlreiche Erosionsmarker vorhanden, andere wurden seit 30 Jahren nicht mehr überprüft. Die letzte systematische Übersicht entstand 2009 bei der Antragstellung als UNESCO Welt-erbe. Das Landesamt für Denkmalpflege hat vor diesem Hintergrund einen über fünf Jahre angelegten systematischen Monitoringplan entwickelt, der die folgenden Ziele umfasst:

- **Bestandspläne** für alle bekannten prähistorischen Siedlungen in der Flachwasserzone des Bodensees erstellen. Im Kern bestehen diese Erhebungen aus Rauminformationen, die in künftigen Untersuchungen als Referenzdatensätze dienen können. Sie enthalten Basisdaten über:
 - Größe und Ausdehnung der Fundstelle horizontal und vertikal (Kulturschichten und Pfahlfelder),
 - die Höhenverhältnisse (digitales Geländemodell der Uferzone),
 - geologische Beschaffenheit (Ausdehnung und Mächtigkeit von Molassefels, Moränenrücken, Beckentonen, Seekreiden und fluviatilen Sanden bis zur Seehalde),
 - Ausbreitung, Beschaffenheit und Datierung von Kulturschichten in ihrem stratigraphischen Zusammenhang (dreidimensionales stratigraphisches Modell der Kulturschichten),
 - die Beschaffenheit und Mächtigkeit mobiler Decksedimente,
 - eingebrachte Erosionsmarker und Ablesedaten der einzelnen Jahre,
 - Zustand und Wirksamkeit ggf. eingebauter denkmalpflegerischer Schutzmaßnahmen,
 - die Verbreitung und Artzusammensetzung der Unterwasservegetation und der Neozoen-Fauna,
 - rezente Einbauten (Häfen, Stege, Wasserbaumaßnahmen) im betreffenden Uferabschnitt.
- Alle bekannten Stationen werden mit mehreren **Erosionsmarkern** ausgestattet, die exakt dreidimensional eingemessen sind. Bestehende andere Markersysteme werden durch die bewährten Eichenpflocke ersetzt. Angestrebt sind mindestens drei Pflöcke pro Station.
- Die betreffenden **Datensätze** werden GIS- und datenbanktauglich ermittelt und aufbereitet.
- Umfang und Rhythmus der **Bestandsaufnahmen** sind der wissenschaftlichen Bedeutung der jeweiligen Fundstellen, aber auch besonderen, bereits bekannten Gefährdungen anzupassen. Fundstellen mit eingetragenem UNESCO-Welterbe-Status sollen alle zwei Jahre untersucht werden. Zu priorisieren sind außerdem Fundstellen in unmittelbarer Nähe von Häfen und in Strandbädern sowie Fundstellen, in denen bereits Schutzmaßnahmen durchgeführt wurden. Bei der Gefährdungsbeurteilung sind auch klimatische Veränderungen (potentielle Zunahme von Niedrigwasserereignissen, Stürme) und biologische Veränderungen in der Flachwasserzone (invasive Arten und deren Auswirkung auf Kulturschichten und Pfähle) zu berücksichtigen.

Angestrebt wird auch die Anwendung von hydrodynamischen Modellen und die Erstellung von Sedimentbilanzen für einzelne Fundstellen, die stark von Erosion betroffen sind, um die möglichen Ursachen und den mutmaßlichen weiteren Verlauf der Erosionsvorgänge zu verstehen (vgl. Kapitel 6; [7], [8], [21]).

Erst auf einer solchen Grundlage können systematisch **Gefährdungsanalysen** für die Stationen am baden-württembergischen Bodenseeufer vorgenommen werden.

Mittelfristig wird sich der Fokus eines planmäßigen denkmalpflegerischen Monitorings am Bodensee von der periodisch oder ganzjährig überschwemmten Flachwasserzone lösen und die Uferzone als Ganzes in den Blick nehmen müssen. Archäologisch und denkmalpflegerisch weitgehend unerschlossen sind vor allem die Areale oberhalb der heutigen Mittelwasserlinie. Neuentdeckungen prähistorischer Siedlungsbefunde in unmittelbarer Wassernähe ([4], [5]) zeigen an, dass sich hier noch Denkmale mit und ohne Feuchterhaltung im Boden befinden und vielfachen Gefährdungen, vor allem durch Straßen- und Siedlungsbau ausgesetzt sind.

Ein weiterer durch die archäologische Denkmalpflege betreuter Teil des Unterwassererbes sind prähistorische und historische Einzelobjekte (wie Schiffswracks und Einbäume) oder Strukturen wie Fischereianlagen und Anlandestellen. Für die Zukunft werden Planungs- und Kartengrundlagen angestrebt, die nicht nur die einzelne prähistorische Fundstelle im Blick haben, sondern das Bodenseeufer von der Halde über alte Strandwälle hinaus bis zu den Hangfüßen des spätglazialen Reliefs abbilden. Eine solche Bestandsaufnahme, in die alle relevanten Daten – prähistorische Siedlungsplätze, Schutzeinbauten, Erosionsmarker, Höhenmodelle, Relief, geologische Beschaffenheit, Belastungen durch Freizeitindustrie und Tourismus, Wind- und Wellenexposition einfließen, wird denkmalpflegerisches Monitoring in den größeren Zusammenhang des Schutzes der Flachwasserzone einbetten und eine Gefährdungsanalyse mit allen Faktoren und beteiligten Institutionen ermöglichen.

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G., Hrsg. (2013): Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV - Programmes 'Alpenrhein - Bodensee-Hochrhein' zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser. – Vorarlberg Museum Schriften 1, 303 S., Bregenz.
- [2] BREM, H., RAMSEYER, D., ROULIÈRE-LAMBERT, M.-J., SCHIFFERDECKER, F. und SCHLICHTERLE, H., Hrsg. (2015): Archéologie & Érosion - 3. Monitoring et mesures de protection pour la sauvegarde des palafittes préhistoriques autour des Alpes. – Actes de la troisième Rencontre Internationale Arenenberg et Hemmenhofen 8-10 octobre 2014. 207 S., Lons-le-Saunier (Fr).
- [3] CORBOUD, P und GOWEN, M. (2016): Protection of the World Heritage against archeological research: The case of the prehistoric pile dwellings around the Alps registered at UNESCO. – Annual Review of Swiss Archaeology 99: 157-164.
- [4] DIECKMANN, B., HALD, J., HOFFSTADT, J. und VOGT, R. (2016): Eine neue mittelnolithische Siedlungsstelle am westlichen Bodensee bei Allensbach-Hegnau, Gemarkung Reichenau. – Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2016, S. 70-73.

- [5] DIECKMANN, B., HOFFSTADT, J. und VOGT, R. (2016): Pfahlbau auf der Baggerschaukel – Eine neu entdeckte Horgener Kulturschicht in Iznang am Bodensee. – Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2016, S. 92–95.
- [6] HEUMÜLLER, M., SCHLICHTERLE, H. und KÖNINGER, J. (2009): Maßnahmen zum Schutz der Kulturdenkmale unter Wasser. Ein internationales Projekt im Rahmen von Interreg IV. – Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2009, S.20–22.
- [7] HOFMANN, H. und DISSANAYAKE, P. (2018): High-resolution, numerical modeling of surface waves, currents and sediment transport in the shallow water zone of Lake Constance. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung – HyWa 62 (6): 387-399, DOI: 10.5675/HyWa_2018_3_2.
- [8] HOFMANN, H. und OSTENDORP, W. (2013): Wellenexposition und Sedimentmobilisierung im Bereich ausgewählter Unterwasserdenkmäler (UNESCO-Welterbestätten) des Bodensees. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 35–42, Bregenz.
- [9] INTERNATIONAL COORDINATION GROUP UNESCO – Palafittes (Hrsg.) (2019): UNESCO Welterbe Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen. Otrokovice.
- [10] KÖNINGER, J. und MAINBERGER, M. (2015): Erosionsschutz und Monitoring des Kulturgutes unter Wasser am baden-württembergischen Bodenseeufer. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 53–62, Bregenz.
- [11] KÖNINGER, J. und SCHLICHTERLE, H. (2013): Schutzmaßnahmen für Pfahlbausiedlungen am baden-württembergischen Bodenseeufer. Verfahrenstechniken, Bestand, Erfahrungen, Ausblick. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 113–126, Bregenz.
- [12] MAINBERGER, M. (2013): Schutz durch Umbettung: Erhaltung eines mittelalterlichen Wracks in Reichenau-Genslehorn. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 173–179, Bregenz.
- [13] MAINBERGER, M. und HOHL, W. (2013): Monitoring in archäologischen Denkmalen in der Flachwasserzone – eine Einführung in Techniken und Methoden. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 183–196, Bregenz.
- [14] OSTENDORP, W., TIEDGE, E. und HILLE, S. (2001): Effect of eutrophication of culm morphology of lakeside *Phragmites* reeds in Central Europe. – Aquatic Botany 69: 177–193.
- [15] OSTENDORP, W. (2016): Erosion hazards in littoral pile dwelling sites of the UNESCO World Heritage. – Scientific Report, 17 pp., Limnological Institute, University of Konstanz. 16 pp., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.004.
- [16] OSTENDORP, W., DIENST, M., KRAMER, I., STRANG, I. (2013): Ökologische Begleituntersuchungen an drei denkmalpflegerischen Erosionssicherungsmaßnahmen am deutschen und schweizerischen Bodenseeufer. – In: BREM, H., EBERSCHWEILER, B., GRABHER, G., SCHLICHTERLE, H. und SCHRÖDER, H. G. (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. – Vorarlberg Museum Schriften 1, S. 149–170, Bregenz.
- [17] OSTENDORP, W. (2017): Phytomasse submerser Makrophyten auf denkmalpflegerischen Erosionssicherungsflächen im Überlingersee (Bodensee). – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, 10 S., DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.007.
- [18] OSTENDORP, W. (2018): Einrichtung und Monitoring von konventionellen Erosions-/Akkumulationsmarkern (Stand November 2018). – Technischer Bericht des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, DOI: 10.18148/KOPS/HMBS.2018.010.
- [19] RAMSEYER, D. und ROULIERE-LAMBERT, M.J., Hrsg. (1996): Archéologie et Érosion - mesures de protection pour la sauvegarde des sites lacustres et palustres. – Actes de la Rencontre Internationale de Marigny - Lac de Chalain - 29–30 septembre 1994, 142 S., Lons-Le-Saunier.
- [20] RAMSEYER, D. und ROULIÈRE-LAMBERT, M.-J., Hrsg. (2006): Archéologie et Érosion 2 - Zones Humides en Péril. – Actes de la deuxième Rencontre Internationale Neuchâtel, 23–25 Septembre 2004. Launs-Le-Sonier (F)
- [21] SEIBT, C., PEETERS, F., GRAF, M., SPRENGER, M. und HOFMANN, H. (2013): Modeling wind waves and wave exposure of nearshore zones in medium-sized lakes. – Limnology and Oceanography 58 (1): 23–36, DOI:10.4319/lo.2013.58.1.0023.
- [22] SUTER, P. J. und SCHLICHTERLE, H. (2009): UNESCO World Heritage Candidature ‚Prehistoric Pile Dwelling around the Alps‘. – 104 S., Biel/Bienne (CH).
- [23] UNESCO, UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (2010, 2011). Prehistoric Pile Dwellings around the Alps - World Heritage nomination. – Nomination Dossier: Executive Summary (2010, revised in 2011), Volumes I, II, III (2010) and Additional Information (2011). Paris (Download unter <http://www.palafittes.org/en/products-downloads/news/index.html>; zuletzt aufgerufen im Juli 2016>).
- [24] WESSELS, M., ANSELMETTI, F., ARTUSO, R., BARAN, R., DAUT, G., GEIGER, A., GESSLER, S., HILBE, M., MÖST, K., KLAUSER, B., NIEMANN, S., ROSCHLAUB, R., STEINBACHER, F., WINTERSTELLER, P. und ZAHN, E. (2015): Bathymetry of Lake Constance – State of the Art in Surveying a Large Lake. – Hydrographische Nachrichten 100: 6-11.
- [25] WESSELS, M., ANSELMETTI, F., BARAN, R., HILBE, M., GESSLER, S. und WINTERSTELLER, P. (2016): Tiefenschärfe - Hochauflösende Vermessung Bodensee. – Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, IGKB (Hrsg.), Blaue Reihe, Bericht Nr. 61: 1-107.

Kapitel 11

Uferrenaturierungen am Bodensee - Empfehlungen des Regierungspräsidiums Tübingen, Landesbetrieb Gewässer

Murat Aydin ¹



Vor der Uferrenaturierung



Nach der Uferrenaturierung

Die EG-Wasserrahmenrichtlinie verfolgt den Ansatz, Gewässer in einem guten ökologischen Zustand zu erhalten oder diesen wieder herzustellen. Das Ziel von Renaturierungen ist, den Bodensee für die Vielzahl der hier heimischen Arten als Lebensraum zurückzugewinnen. Auch Menschen profitieren von einer intakten Umwelt, indem sie sie erleben und sich dort erholen können. In diesem Kapitel werden Handlungsempfehlungen für Renaturierungen und Unterhaltungsmaßnahmen gemacht. Die Empfehlungen aus diesem Kapitel können grundsätzlich auf andere Seen in Baden-Württemberg übertragen werden, für andere Bundesländer und Staaten ist die Kompatibilität dieser Handlungsempfehlung zu überprüfen. Mit ↗ sind Begriffe gekennzeichnet, die im Glossar näher erläutert werden.

VORWORT

Dieses Kapitel gibt die praktischen Erfahrungen des Landesbetriebs Gewässer bei Renaturierungsmaßnahmen wieder und fasst wichtige Prozessschritte zur Umsetzung einer Maßnahme zur ökologischen Aufwertung des Bodenseeufer zusammen. Die Phase vor Planungsbeginn, die Planung an sich, die Ausschreibung bis hin zur Vergabe, die bauliche Ausführung und zuletzt das Monitoring werden in einzelnen Schritten beschrieben.

EINLEITUNG

Zuständigkeiten am Bodensee

Für das baden-württembergische Bodenseeufer sind die Regierungspräsidien Tübingen (Landkreis Bodenseekreis, Kressbronn bis Sipplingen) und Freiburg (Landkreis Konstanz, Ludwigshafen

bis Öhningen) zuständig. In Bayern wird das Bodenseeufer durch die Regierung von Schwaben verwaltet. Von Bregenz bis Gaißau liegt die Zuständigkeit bei der Landesverwaltung Bezirkshauptmannschaft Bregenz der Republik Österreich. In der Schweiz wird der Bodensee im Kanton Thurgau vom Amt für Umwelt und im Kanton St. Gallen vom Amt für Wasser und Energie verwaltet.

Die rechtlichen Zuständigkeiten für Gewässer verteilen sich in Baden-Württemberg nach § 80 WG-BW ([1]) auf die oberste Wasserbehörde (Umweltministerium), die höheren Wasserbehörden (Regierungspräsidien) und die unteren Wasserbehörden (Landratsämter) ([2]), die sachlich zuständig sind, sofern nicht explizit anderes bestimmt ist. Gemeinden erfüllen lediglich Pflichtaufgaben nach Weisung der drei Wasserbehörden (vgl. § 93 WHG, [3]). Der Bodensee ist in Baden-Württemberg ein Gewässer I. Ordnung, weshalb die den Regierungspräsidien angehörigen Landesbetriebe Gewässer Träger der Ausbaulast

¹ Murat Aydin, Regierungspräsidium Tübingen, Abt. 5 Umwelt, Ref. 53.2 Gewässer I. Ordnung, Hochwasserschutz und Gewässerökologie Neckar-Bodensee, murat.aydin@rpt.bwl.de.

nach § 54 Abs. 1 WG-BW und der Unterhaltungslast nach § 32 Abs.1 WG-BW sind ([1]).

Herleitung des Bedarfs für eine Renaturierung

An vielen Stellen des Bodenseeufer gibt es einen hohen Bedarf nach einer grundlegenden Verbesserung der Ufersituation, die dann ggf. zu einer Renaturierung des Seeufers führen kann ([5]). Entsprechende Defizite lassen sich auf mehreren Wegen ableiten:

Feststellung von Defiziten im Rahmen der Unterhaltungspflicht der Landesbetriebe Gewässer

Das Bodenseeufer des Bundeslandes Baden-Württemberg wird regelmäßig von den Landesbetrieben Gewässer begangen ([4]). Als Träger der Unterhaltungslast sind die Landesbetriebe nach § 32 Abs. 6 WG-BW ([1]) dazu verpflichtet. Es werden die Einhaltung der wasserrechtlichen Anforderungen insbesondere der ökologischen Funktion der Gewässer (im Sinne des § 14 Abs. 2 WG-BW) und der Hochwasserschutz überprüft. Defizitäre Stellen werden dokumentiert und, sofern eine Verbesserung möglich ist, werden Maßnahmen zur Behebung bzw. Maßnahmen zur ökologischen Aufwertung initiiert und ausgeführt.

Ableiten des Verbesserungsbedarfs mit der Bodenseeuferbewertung der IGKB

Die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) hat im Rahmen ihres Aktionsprogramms Ufer- und Flachwasserzone eine Bewertung des gesamten Bodenseeufer vorgenommen ([5]). Die Untersuchung gibt detailliert Auskunft über den Uferzustand und das Verbesserungspotential, welches durch eine Renaturierungsmaßnahme erreicht werden kann (Abbildung 1). Das Ergebnis der Untersuchung ist als Karte und Bericht frei verfügbar [5].

Anliegergemeinden können diese im 50 m-Raster durchgeführte Uferbewertung nutzen, um den Zustand des Ufers aus ökologischer Sicht und das Potenzial der möglichen Verbesserung in Erfahrung zu bringen. Die Gemeinden können darüber hinaus auch unabhängig vom Verbesserungspotenzial agieren und die Möglichkeiten der Behebung von Uferbeeinträchtigungen in Abstimmung mit dem Landesbetrieb Gewässer entwickeln.

Ableiten eines Verbesserungsbedarfs durch Vergleich mit einer Referenz

Historische Dokumentationen eines Uferabschnitts können heutige Defizite aufzeigen, zudem können historische Dokumentationen als Referenzen genutzt werden. Weitere Möglichkeiten für Referenzen eines naturnahen Seeufers sind in der Reihenfolge abnehmender Eignung: a) natürliche Uferstrecken (Abbildung 2) in unmittelbarer Nähe bzw. im selben Naturraum, b) weiter entfernte Uferabschnitte, ggf. in Seen mit ähn-



Abb. 1:

Die Uferbewertung der IGKB am Bodensee: In 50 m langen Abschnitten wurde das gesamte Ufer des Sees mit einer fünfstufigen Bewertungsskala klassifiziert. In die Bewertung gingen insgesamt 15 Einzelbewertungen ein. Ausschnitt: Ufer in Kressbronn.



Abb. 2:

Natürliches Ufer westlich vom Strandbad Eriskirch. Foto: Reg.-Präs. Tübingen.

lichen hydrologischen und morphologischen Eigenschaften, c) Maßnahmen auf Grundlage von Experteneinschätzungen. Mit historischen Dokumenten des Uferabschnitts in Form wissenschaftlicher Erhebungen und Fotos können direkte Rückschlüsse zum natürlichen Ufer hergestellt werden. Referenzufer in unmittelbarer Nähe haben den Vorteil, dass ggf. konkrete Eigenschaften untersucht werden können.

Durch naturnahe Referenzen lassen sich für die Planung geeignete Annahmen zur Ufermorphologie, zum Substrat des Gewässerbetts und zur möglichen Flora und Fauna treffen.

Verbesserungsbedarf aufgrund von Beobachtungen der Öffentlichkeit

Die Beobachtung eines möglichen Mangels am Seeufer kann direkt vom Flurstückseigentümer oder auch von aufmerksamen Bürgern*innen an die Behörden herangetragen werden. In der Regel wird sich die Behörde bei einem Vor-Ort-Termin einen Überblick verschaffen. Sofern eine Maßnahme möglich ist, wird

nach der Klärung der Zuständigkeit (d. h. nach Ermittlung des Kostenträgers) eine Umsetzung angestrebt. Liegt die Zuständigkeit beim Flurstückseigentümer, wird die Behebung fachlich durch die Behörde begleitet. Liegt die Zuständigkeit im Rahmen der Unterhaltungslast beim Land, führt dieses die Behebung mit Landesmitteln durch.

Das Ziel von Renaturierungen

Sind Defizite klar benannt, kann mit ersten Abklärungen für eine mögliche Uferrenaturierung begonnen werden. Im Renaturierungsleitfaden der IGKB ([14]) wurden die wesentlichen Aspekte bei Planung und Durchführung einer Renaturierung im Detail erläutert: Der Begriff Renaturierung bedeutet die Entwicklung oder Veränderung eines beeinträchtigten Ufers in einen naturnahen Zustand. Beeinträchtigungen sind Störungen der natürlichen Prozesse in der Flachwasserzone, die teilweise in den vorangegangenen Kapiteln aufgezeigt wurden. Auch das Fehlen einer Durchgängigkeit in Uferlängsrichtung und in Bezug auf die Verbindung mit dem Hinterland ist eine Beeinträchtigung. Besondere Strömungseigenschaften, die beispielsweise durch Uferverbauungen wie Ufermauern oder Slip- und Steganlagen entstehen, können ebenfalls Beeinträchtigungen sein. Letztlich soll eine Aufwertung durch eine Renaturierung zu einer Annäherung an ein standortgerechtes Ufer führen.

DIE PLANUNGSPHASE

Eine Renaturierung soll positive Auswirkungen auf das Gewässerbett, das Ufer, das Hinterland, die Tiere, die Pflanzen und den Menschen haben. Daher sind eine sorgfältige Planung und eine schnelle sowie saubere Ausführung wichtig. Gerade in der Flachwasserzone sind Eingriffe jeder Art sorgfältig abzuwägen und müssen die Anliegen der jeweiligen Fachbehörden für Natur- und Gewässerschutz sowie für den Erhalt archäologischer Denkmäler (z. B. Pfahlbau-Kulturschichten, vgl. Kapitel 10) ebenfalls berücksichtigen. Entsprechende Abklärungen im Vorfeld können bis zu archäologischen Sondierungen führen. Hierfür arbeiten die Fachbehörden, die Gemeinde, der Planer, die Beauftragten für ein Monitoring und später das Bauunternehmen eng zusammen. Auf den folgenden Seiten wird erläutert, was vor der Planung, in der Planung und in der baulichen Umsetzung zu beachten ist. Im Einzelfall kann es durchaus weitere, hier nicht genannte Gründe für andere Abklärungen geben ([14]).

Berücksichtigung von Nutzerlenkung und Extensivierung

An manchen Uferabschnitten am Bodensee liegen anthropogen stark beanspruchte Areale direkt neben natürlich entwickelten Uferabschnitten. Dies kann unter strengen naturschutzfachlichen Auflagen möglich sein, aber hauptsächlich ist die Entstehung solcher Gebiete historisch bedingt. Ein Beispiel

hierfür ist das Strandbad der Gemeinde Eriskirch, das vollständig von einem Naturschutzgebiet umgeben ist. Um die Schutzziele zu fördern, werden die Badegäste im Sommer und die ganzjährig vorhandenen Wanderer auf das Strandbadareal gelenkt, um die Nutzer zu hindern, das Naturschutzgebiet selbst zu erkunden. In einer Planung der Modernisierung des Strandbades wurden entsprechende Barrieren und nutzerlenkende Elemente vorgesehen, die zum Teil auch multifunktional sind. Einfache Maßnahmen der Nutzerlenkung können Zäune, Handläufe oder auch eine Beobachtungsplattform sein, die als Barriere wirken und einen Einblick in das Naturschutzgebiet gewähren. Mit Beobachtungsschlitzen in einer Holzpalisade ist eine Beobachtung von Fauna und Flora möglich, ohne diese zu stören oder zu beeinträchtigen. Baumstämme können Flurstücksgrenzen markieren und auch als Sitzgelegenheit verwendet werden.

Ähnliche historische Entwicklungen haben an einigen Uferabschnitten dazu geführt, dass sich eine intensive anthropogene Nutzung in oder in unmittelbarer Nähe von archäologischen Denkmälern entwickelt (z. B. im Strandbad Öhningen oder in Unteruhldingen), beispielsweise sollte generell im Vorfeld gemeinsam herausgearbeitet werden, wie Veränderungen in der Uferzone gestaltet werden müssen, um Denkmäler nicht zu gefährden und gleichzeitig die gewünschte Aufwertung des Ufers zu erreichen.

Eine Nutzerlenkung kann auch durch eine geeignete Bepflanzung erreicht werden. Die Extensivierung von Flächen kann also Teil des Pflanzenkonzeptes sein. Die Bepflanzung der Seeufer darf ausschließlich mit autochthonen und standortgerechten Arten erfolgen, da gebietsfremde Arten heimische Pflanzen verdrängen und Habitate unattraktiv machen können.

Auch der Flurstückseigentümer kann ein Pflanzenkonzept einreichen. Dieses wird überprüft und, sofern keine Beanstandung der Behörde vorliegt, in der Regel auch genehmigt.

Herleitung von Bau- und Planungskosten

Vor der Umsetzung einer Maßnahme sind monetäre Mittel zu reservieren und die Kosten für den Haushalt darzustellen. Eine erste grobe Kostenschätzung der Baukosten lässt sich aus Erfahrungswerten vergangener Maßnahmen des Landesbetriebs Gewässer herleiten. Als Richtwert können 2.700 € pro laufendem Meter (zzgl. MwSt., Stand 2019) angenommen werden. Etliche Faktoren sind zu berücksichtigen, die sich mehr oder weniger auf die Kosten auswirken. U. a. sind dies die Art der Nutzung des Ufers und des Hinterlandes, die Art und Menge des erforderlichen Materials, rückzubauende Verbauungen (Ufermauer, Slip-Anlagen, Stege, Wellenbrecher, Querzäune, usw.), die Größe des Areals und vieles mehr. Teurer wird es beispielsweise, wenn die Zugänglichkeit zum Ufer erschwert ist. Ein regelrechter Multiplikator für Kosten ergibt sich im Falle der Notwendigkeit einer wasserseitigen Anlieferung von Material und Maschinen oder auch bei einer wasserseitigen baulichen

Ausführung. Kostensenkend kann sich ggf. ein unerwarteter Fund von nicht erwartetem geeignetem Baumaterial hinter einer der Ufermauer auswirken. Historisch bedingt findet sich hinter Ufermauern aber nicht selten Bauschutt.

Planungskosten lassen sich zunächst auf der Grundlage der geschätzten Baukosten ableiten. Die Baukosten können zur groben Orientierung aus dem Produkt des o. g. Richtwerts und der Uferlänge ermittelt werden. Im Internet verfügbare HOAI Rechner helfen bei der Ermittlung der Planungskosten. Hierfür werden die Baukosten den anrechenbaren Kosten gleichgesetzt.

Soll eine Renaturierung in Kooperation beispielsweise zwischen dem Land und einer Gemeinde durchgeführt werden, empfiehlt es sich, getrennte Kostenaufstellungen für den eigenen Haushalt durchzuführen. Dieser Schritt wird umso wichtiger, wenn von der Uferrenaturierung unabhängige, aber die Uferrenaturierung tangierende Maßnahmen durchgeführt werden sollen.

Synergieeffekte durch gemeinsame Planungen

Das Ufer einer Gemeinde wird in der Regel intensiv genutzt. Beispiele hierfür sind Campingplätze, Freibäder und Strandbäder, Bootsvermietungen, Hotelanlagen, Häfen, usw. Ist die Umgestaltung, Sanierung oder der Rückbau solch einer Nutzung/Anlage geplant, wird das Areal temporär in einen gestörten Zustand versetzt, verursacht durch die Baustelle und deren Emissionen, die auf die Umwelt einwirken. Wegen solcher temporären Störungen sollten nach Möglichkeit weitere Eingriffe zeitgleich durchgeführt werden (z. B. Modernisierungen, Instandhaltungen z. B. einer Gemeindemaßnahme gemeinsam mit einer Landesmaßnahme am Ufer [Uferrenaturierung]).

Ein Beispiel: Eine beabsichtigte Uferrenaturierung sollte zeitgleich, z. B. mit einer Sanierung eines Strandbades oder Freibades erfolgen. Eine enge Abstimmung kann dazu führen, dass die Renaturierung um ein Jahr zu verschieben ist, bis die Gemeinde die Mittel für die Instandsetzung des Freibades reserviert hat (Abbildung 3). Sinnvollerweise wird für beide Projekte ein Planungsbüro beauftragt, das die Landesmaßnahme und die Maßnahme der Gemeinde zusammen plant. Die Leistungen können gemeinsam oder auch getrennt ausgeschrieben werden. Das Planungsbüro wird darauf achten, dass die Kosten den jeweiligen Projekten richtig zugeordnet sind.

Vorteilsausgleich und öffentlich-rechtliche Vereinbarung

Da die Landesmaßnahme am Ufer Vorteile für die Gemeinde bringt, ist von der Gemeinde ein Vorteilsausgleich zu fordern. In dem obigen Beispiel sind die Renaturierung durch das Land und die Hinterlandarbeiten der Gemeinde finanziell unabhängige Maßnahmen. Die durch die Renaturierung ermöglichten Vorteile, wie beispielsweise die gewonnene laterale (Quer-)

Durchgängigkeit vom Ufer ins Hinterland, werden auf Grundlage des Vorteilsausgleiches nach § 58 WG-BW ([1]) anteilig mit der Gemeinde verrechnet.

Diese grundlegenden Rahmenbedingungen sind vor Maßnahmenbeginn zwischen dem Land und der Gemeinde abzusprechen und in einer Vereinbarung festzuhalten. U. a. beinhaltet die Vereinbarung eine kurze Beschreibung der Maßnahme, Kostenregelungen und die Zuweisung der Unterhaltung nach der Baustellenabnahme.



Abb. 3:

Eröffnung des Strandbades in Eriskirch: Die Sanierung des Strandbades durch die Gemeinde fand gemeinsam mit der Uferrenaturierung durch das Land statt. Foto: ISF.

Fördermittel

Unabhängig von der Renaturierung kann eine Gemeinde als Bauherr für eigene Maßnahmen Fördermittel beantragen (z. B. Tourismusinfrastrukturförderung, Städtebausanierung, oder das ‚Entwicklungsprogramm ländlicher Raum‘). Diese Förderprogramme und einige mehr werden in Baden-Württemberg über die zuständigen Regierungspräsidien abgewickelt.

Sofern eine ökologische Verbesserung erzielt wird, kann für Maßnahmen am Bodenseeufer mit dem Landesbetrieb Gewässer eine Kostenbeteiligung vereinbart werden.

Bauherrschaft am Gewässer I. Ordnung

Grundsätzlich trägt das Land die Ausbaulast an den Gewässern I. Ordnung mit dem Landesbetrieb Gewässer als Vertretung des Landes Baden-Württemberg. Die Möglichkeit, eine Uferrenaturierung gemeinsam mit einer Gemeinde auf Grundlage einer öffentlich-rechtlichen Vereinbarung durchzuführen, versetzt die Gemeinde nicht in den Status des zweiten Bauherrn, da die rechtliche und wirtschaftliche Verantwortung beim Land liegt.

Eine Gemeinde kann alleiniger Bauherr an einem Gewässer I. Ordnung sein, wenn eine öffentlich-rechtliche Vereinbarung nach § 54 LVwVfG ([6]) zwischen dem Land und der Gemeinde vorliegt. Der Landesbetrieb Gewässer wirkt richtungsweisend

und federführend bei der Planung mit und begleitet die bautechnische Ausführung. Die Ausschreibung und Vergabe koordiniert die Gemeinde in eigener Verantwortung. Dasselbe gilt für Unterhaltungsmaßnahmen, die die Gemeinde am Gewässer I. Ordnung durchführen möchte.

AUSSCHREIBUNG DER PLANUNG DURCH DEN LANDESBETRIEB GEWÄSSER

In der Ausschreibung der Planungstätigkeit wird darauf hingewiesen, dass Leitfäden, Richtlinien, Regionalpläne und Gesetze anzuwenden sind. Allgemein sind dies die EG-Wasserrahmenrichtlinie ([10]), das Wasserhaushaltsgesetz ([3]), das Wassergesetz Baden-Württemberg ([1]), das Bundesnaturschutzgesetz ([11]), das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz ([7]), das Denkmalschutzgesetz Baden-Württemberg (vgl. Kapitel 10, Anm. 1) sowie weitere situationsabhängig zu verwendenden Gesetze. Am Bodensee werden diese rechtlichen Vorgaben durch die Bodenseerichtlinien ([12]), den Bodenseeuferplan ([13]) und den Renaturierungsleitfaden Bodenseeufer ([14]) ergänzt.

Die Bodenseerichtlinien beschreiben die aktuellen und zukünftigen Vorgaben und Anforderungen zum Schutz des einzigartigen Lebensraumes und seiner Nutzbarkeit, die nach entsprechend definierten Zielen nachhaltig zu sichern und zu verbessern sind. Diese sind u. a., die ökologisch intakten Ufer- und Flachwasserbereiche als bedeutende Lebensräume für den See zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Weiter sollen auch die Bevölkerungs-, Siedlungs- und Wirtschaftsentwicklung, Landwirtschaft, Freizeit und der Verkehr die Güteentwicklung des Bodensees nicht negativ beeinflussen. Für die weitere Entwicklung des Sees sind daher umweltverträgliche Zielsetzungen und deren Umsetzung in der Raumordnung sicherzustellen.

Ein Ziel des Bodenseeuferplanes ist, dass bei Eingriffen in die Flachwasserzone naturnahe Bauweisen anzuwenden sind und Böschungen entsprechend den jeweiligen Strömungsverhältnissen und dem Wellenangriff wie an vergleichbaren natürlichen Uferabschnitten anzulegen sind, sowie standortgerechte autochthone Ufervegetation angesiedelt wird.

Der Renaturierungsleitfaden Bodensee der IGKB ist als Planungshilfe gedacht und zeigt Beispiele von Renaturierungen. Zudem beinhaltet er Definitionen der Ufertypen, Möglichkeiten der Lenkung des Nutzungsdrucks, um naturnahe Entwicklung bestimmter Areale zu fördern, und vieles mehr.

Frühzeitige Gespräche mit den Behörden und Scoping-Termine

Frühzeitige Gespräche mit den Behörden wirken sich richtungsweisend und letztlich beschleunigend auf die Planung aus. Eine Beteiligung der Vertreter der unteren und höheren Wasserbehörde, Naturschutzverbände, archäologische Fachstellen sowie ggf. weiterer Verbänden und Vereine ist sinnvoll, um Problem- punkte frühzeitig zu identifizieren. Darüber hinaus können die

Behörden auf einzureichende Unterlagen und Erhebungen wie z. B. die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) aufmerksam machen, die für eine Genehmigung unentbehrlich sein können.

Die zu berücksichtigenden Erfordernisse, die sich aus den Behördengesprächen ergeben haben, sind zusammen mit den Planunterlagen bei der unteren Genehmigungsbehörde einzureichen. Die Anzahl der erforderlichen Exemplare der Verfahrensunterlagen gibt die Genehmigungsbehörde vor. Die Anzahl hängt davon ab, wer nach § 13 LVwVfG ([6]) von der unteren Wasserbehörde als Beteiligter oder Anzuhörender bestimmt wird.

Art der Genehmigungsverfahren

In Baden-Württemberg entscheidet das zuständige Landratsamt als untere Verwaltungsbehörde in der Funktion der Genehmigungsbehörde darüber, ob es einer Planfeststellung, einer Plangenehmigung oder, bei unwesentlicher Bedeutung, keines Verfahrens bedarf (letzteres nur, wenn der Landesbetrieb Gewässer eine unwesentliche Bedeutung der Maßnahme feststellt). Unabhängig vom weiteren Verfahrensablauf ist es in jedem Fall sinnvoll, bei den potentiell betroffenen Fachbehörden oder Interessensvertretungen im Vorfeld anzufragen, wann und wie in den weiteren Planungsprozess einbezogen werden muss.

Grundsätzlich hat die Plangenehmigung dieselbe Rechtswirkungen wie eine Planfeststellung, allerdings sind auf ihre Erteilung die Vorschriften des Planfeststellungsverfahrens nicht anzuwenden. Ausnahmen sind im § 74 LVwVfG ([6]) festgehalten. Eine Plangenehmigung kann in der Regel schneller erfolgen als eine Planfeststellung, die Anforderungen an die Planunterlagen unterscheiden sich allerdings nicht.

Ein Planfeststellungsverfahren wird gefordert, wenn Rechte anderer beeinträchtigt werden oder das Eigentum von Dritten in Anspruch genommen werden soll, diese aber ihr Einverständnis nicht erteilen können oder wollen. Ein Merkmal der Planfeststellung ist die Konzentrationswirkung, was bedeutet, dass der Planfeststellungsbeschluss alle anderen notwendigen Einzelgenehmigungen (z. B. wasserrechtliche Genehmigungen, naturschutzrechtliche Befreiungen) ersetzt. Dies erfordert die frühzeitige Beteiligung aller Träger öffentlicher Belange ([16]). Des Weiteren ist sie anzuordnen, wenn die Planunterlagen zwecks Beteiligung betroffener Bürger*innen in der jeweiligen Gemeinde ausgelegt werden müssen ([16]). Im Falle einer UVP-Pflicht ist ein Planfeststellungsverfahren erforderlich. Der Planer ist für die Umsetzung der UVP verantwortlich. Diese kann in manchen Fällen über 1,5 Jahre dauern, daher ist eine rechtzeitige Ausführung zu empfehlen.

Genehmigungspflichtige Anlagen mit temporärer Nutzungsabsicht werden grundsätzlich wie dauerhafte Anlagen gehandhabt. Eine genehmigte temporäre Anlage sollte von Beginn an in der Öffentlichkeit als temporäre Anlage mit Angabe der Standdauer kommuniziert werden. Befürwortende Bürger wer-

den vom Rückbau nicht enttäuscht sein und Bürger, die die Anlage nicht befürwortet haben, wissen, wann der Einsatzort wieder in den gewohnten Zustand zurückversetzt wird. Ist das Zurückversetzen in den Urzustand nicht sinnvoll (z. B. wegen kontaminiertem Boden im Bestand), ist es in einen ökologisch verbesserten Zustand zu versetzen.

Die Beteiligung der Öffentlichkeit

Nach der VwV ‚Öffentlichkeitsbeteiligung‘ ([15]) ist die Öffentlichkeitsbeteiligung möglichst vor Antragstellung durchzuführen. Es sollte über die Ziele des Vorhabens, die finanziellen Mittel, die Verwirklichung und die voraussichtliche Auswirkung informieren. Besucher und Interessierte sollen die Möglichkeit haben, sich zu äußern und ihre Anliegen vorzutragen sowie diese in einer Diskussion mit den entsprechenden Behördenvertretern zu besprechen. Für die Bürgerbeteiligung sollte ein neutraler Moderator herangezogen werden, der die Gespräche leitet. Empfohlen wird, eine ausreichend große Räumlichkeit nahe der Maßnahme zu wählen, so dass interessierte Personen mit wenig Aufwand teilnehmen und den Ort besuchen können.

Moderne Visualisierungen (3D) und Vorher/Nachher- Vergleiche helfen vielen Interessierten. Das Baumaterial kann zur Anschauung und zum Anfassen aufgestellt werden. An dieser Stelle wird auf den ‚Leitfaden Bürgerbeteiligung in der Landesverwaltung‘ ([8]) verwiesen. Nach der Evaluierung der Bürgerbeteiligung ist ein Termin zwischen dem Bauherrn und dem Planer sinnvoll, um zu prüfen, welche Bestandteile der Evaluierung Eingang in die Planung finden können.

In die Planung übernommene und nicht übernommene Ergebnisse der Bürgerbeteiligung sind auch für ‚Nichttechniker‘ verständlich zu kommunizieren (z. B. Gemeindeblatt oder Webseite).

AUSSCHREIBUNG UND VERGABE DER BAULEISTUNG, BAU

Nach Erhalt der Genehmigung durch die Genehmigungsbehörde kann die bauliche Ausführung ausgeschrieben werden. Im Leistungsverzeichnis (LV) sind Rahmenbedingungen zu nennen, die eingehalten werden müssen: u. a. die Verwendung von autochthonem Material, die Verwendung von Material, das frei von jeglichen Verunreinigungen (Schwarzdeckenreste, Bauschutt usw.) sein muss, die Berücksichtigung der Wasserspiegelverläufe für die Bauausführung, der rückstandslose Rückbau von Hilfsmaterialien wie Big-Bags oder Vliese, die Verwendung von biologisch abbaubarem Hydrauliköl der geringsten Wassergefährdungsklasse in Baustellenfahrzeugen, die Betankung der Baufahrzeuge in einem Mindestabstand von 20 m ab der Ufer/Hinterland-Linie, der Ausschluss von Konglomerat (Abbildung 4) usw. Bei Vorhandensein archäologischer Denkmäler im Planungssperimeter wird außerdem auf die in Kapitel 10 genannten Empfehlungen verwiesen.



Abb. 4:

Wackenzieferung aus einem Kieswerk mit Konglomerat. Foto: Reg.-Präs. Tübingen.

Sensibilisierung des Bauunternehmens

Spätestens beim Bietergespräch sollten die Unternehmen befragt werden, ob und wie in der Planung der Bauausführung heikle ökologische (z. B. Fischhabitats) und/oder denkmalpflegerische Aspekte, wie sie in der Vorbemerkung des Leistungsverzeichnisses festgehalten sind, berücksichtigt wurden. Bei Nichtberücksichtigung z. B. von Wasserspiegelveränderungen können erhebliche Verzögerungen entstehen.

Unter Umständen kann es bei einem wenig erfahrenen Bauunternehmen sinnvoll sein, einen Uferabschnitt gemeinsam mit dem Bauunternehmen zu inspizieren und Details zur baulichen Ausführung zu vermitteln. Dieser Vorgang wird gegebenenfalls mehrfach wiederholt, bis die technische Ausführung der Intention der Planung entspricht.

Ökologische Bauweise

Es gilt eine bautechnische Ausführung zu wählen, die mindestens eine ökologische Verbesserung bewirkt und im Idealfall bestmöglich mit der Umwelt harmonisiert. Dabei ist nicht nur die Wirkung des Baustoffs oder des Bauobjekts am Einbauort wichtig, sondern auch dessen Produktökobilanz. Verschiedene Gütesiegel geben Hinweise. Die Kunststoffbelastung, die durch eine Baumaßnahme entsteht, kann reduziert bis gänzlich verhindert werden. Näheres hierzu in den folgenden Absätzen am Beispiel von Kokosmatten, Big-Bags und Vliesen.

Kokosmatten finden u. a. Verwendung an Böschungen. Damit kann eine schräge Bepflanzungsfläche mit einer gewissen Widerstandskraft gegen Erosion ausgestattet werden. Kokosmatten können allerdings nicht verrottende Kunststoffäden enthalten, die das Kokosgeflecht stabilisieren. Im Leistungsverzeichnis sollte daher die Verwendung von Kokosmatten ohne

Kunststoffanteil vorgegeben werden. Ansonsten ist im Leistungsverzeichnis eine Position zum Aufsammeln der Kunststoffäden nach dem Verrotten zu integrieren.

Big-Bags (Kunststoffgewebesäcke) sind ein ökologisch nicht abbaubares Hilfsmittel, um Bereiche trocken zu legen (Abbildung 5). Bei der Benutzung im Gewässer ist darauf zu achten, dass der Kunststoffsack während des Einbauens, des Versetzens und während des Ausbauens nicht beschädigt wird. Beim Reißen können Fasern oder großflächige Gewebestücke im Gewässer verbleiben und erst Monate nach der Fertigstellung der Maßnahme wieder ans Tageslicht kommen. Im Gewässer sollten Big-Bags nicht bis zur zugelassenen Tonnage befüllt werden, da sie bei feinkörnigem Untergrund stark am Boden festhaften. Zudem wird der Porenraum mit Wasser gefüllt, so dass die zulässige Traglast schnell überschritten wird.



Abb. 5:

Big-Bags zur Wasserhaltung in Baustellen werden häufig zu weit gefüllt: Im Wasser kann ihre Tragkraft schnell überschritten werden und das Gewebe reißt. Foto: Institut für Seenforschung.

Als Alternative zu einer Wasserhaltung (Baustellentrocknung) mit Big-Bags haben sich Wälle aus einem oder mehreren wassergefüllten Kunststoffschläuchen bewährt. Sie werden an den Einsatzort eingeschwommen und dann langsam mit Wasser verfüllt. Durch das langsame Absinken ist eine genaue Ausrichtung möglich. Dieses Verfahren ist anfällig gegenüber mechanischen Einflüssen wie Treibholz oder das versehentliche Berühren mit einer Baggerschaufel.

Vliese werden u. a. temporär als Erosionsschutz für im Bau befindliche Areale an Gewässern verwendet und sind ein vielseitig einsetzbarer und leicht handzuhabender Baustoff. Vliese haben allerdings den Nachteil der Barriere-Wirkung: Nicht jede Pflanze ist in der Lage, mit dem Wurzelwerk das Vlies zu durchdringen. Für Kleinstlebewesen ist es unpassierbar. Aufgrund dieser Nachteile wird heutzutage von einem dauerhaften Einsatz abgesehen, insbesondere dann, wenn mit der Maßnahme eine ökologische Aufwertung erzielt werden soll. Die Funktion des Vlieses als Erosionsschutz zwischen einem Uferverbau und dem anstehenden Erdreich kann in Form einer

Schotter- oder Kies- Filterschicht (Abbildung 6) hergestellt werden (Schotter bei steiler Ausführung und Kies bei flacher Ausführung). Je nach Korngröße des anstehenden Erdreichs und dem Lückensystem der obersten wasserseitigen Ebene können eine bis mehrere abgestufte Filterschichten das Vlies ersetzen.

Einziger Einsatzzweck, für die ein Vlies in die engere Auswahl kommen kann, ist der Schutz denkmalgeschützter Anlagen unter Wasser. Pfahlfelder können mit Vlies überdeckt und mit Kies zur Beschwerung bedeckt werden, um die Pfähle vor äußeren Einflüssen zu schützen. Das Vlies lässt einen gewissen Wasseraustausch zu (vgl. Kapitel 10).



Abb. 6:

Eine Ufermauer wird ersetzt durch einen Verbau mit Lückensystemen, gebettet auf einer dreifach abgestuften Filterschicht (Überlingen Westpark). Dahinter das anstehende Erdreich. Die Konstruktion kommt ohne Vlies aus. Foto: Reg.-Präs. Tübingen.

Ökologische Baubegleitung (ÖBB)

Im Auftrag des Bauherrn (Land oder Gemeinde) muss spätestens zum Zeitpunkt der Ausführungsplanung eine fachkundige Person den Ablauf und den Inhalt der ökologischen Baubegleitung in Absprache mit der unteren Verwaltungsbehörde festlegen und den Bau begleiten. Dies ermöglicht bestmöglich die Einhaltung der ökologischen Belange, spart Zeit und die Planung gewinnt an Sicherheit.

In der baulichen Ausführung wirkt die ÖBB präventiv gegen Situationen, die Umwelt- und Naturschutzbelange nachteilig tangieren könnten, und verhindert somit Bauunterbrechungen. Typische Situationen sind Fehler im Arbeitsablauf, die auf ökologische Aspekte übergreifen wie z. B. Komplikationen bei Roudungsarbeiten durch ein Wespennest, Ausführung einer Abfischung im Vorfeld von Arbeiten, die die Fischfauna beeinträchtigen usw. Die ÖBB kann auch Mängel in der Technik beanstanden, wie z. B. bei Betankungsvorgängen, die zu nahe am Ufer stattfinden, Leckagen während Betankungsvorgängen, Nutzung von unzulässigem Hydrauliköl, u. v. a. m. Erfahrungsgemäß helfen regelmäßige Briefings der Bauarbeiter und deren Sensibilisierung für das Thema ‚Arbeiten am Gewässer‘.

Regelmäßige Baustellenbesichtigungen (Jour fixe)

Die Bauphase wird von der beauftragten Bauleitung begleitet. Diese ist für die reibungslose Ausführung, Steuerung und Organisation der einzelnen Positionen bzw. Ausführungsschritte verantwortlich. Von der Bauleitung täglich verfasste Bautagebücher dokumentieren den Projektbeteiligten den aktuellen Stand des Fortschritts und die auf der Baustelle situativ getroffenen Entscheidungen.

Der Bauherr sollte die Baustelle mindestens einmal pro Woche begehen, um sich selbst einen Eindruck vom Baufortschritt zu verschaffen, da die Bautagebücher keine visuellen Eindrücke vor Ort ersetzen. Unkoordinierte Besuche der Projektbeteiligten sind für die Bauausführung und die Bauleitung nicht förderlich, da die wiederholten Erläuterungen sehr zeitintensiv sind.

Ein so genannter ‚Jour Fixe‘ kann Vorgänge beschleunigen, insbesondere dann, wenn mehrere Adressaten, die für einen Sachverhalt gehört werden müssen, teilnehmen. Der Jour Fixe muss nicht zwingend von allen Projektbeteiligten wöchentlich wahrgenommen werden. Daher sollte die Bauleitung in einer wöchentlichen Einladung die zu besprechenden Tagesordnungspunkte auflisten, so dass die Projektbeteiligten Ihre Teilnahme rechtzeitig planen können.

Die Abnahme

Maßnahmen am Bodensee sind genehmigungspflichtig (siehe S. 133), somit hat eine Abnahme nach dem § 67 der Landesbauordnung-BW ([9]) zu erfolgen. Die Abnahme findet idealerweise zu einem Zeitpunkt statt, an dem das Bauwerk nicht vom Wasserspiegel bedeckt ist. Nach einer erfolgreichen Abnahme beginnt die fünfjährige Verjährungsfrist, innerhalb der das Bauunternehmen für Schäden oder Mängel am Bauwerk, sofern sie nachweislich der Bauausführung zugewiesen werden können, haftbar gemacht werden. Dem Bauunternehmen



Abb. 7:

Uferrenaturierung in Wangen am Untersee: Eine eigendynamische Entwicklung muss langfristig möglich sein und darf nicht, zum Beispiel durch eigenmächtige Eingriffe der Gemeinde, eingeschränkt werden. Foto: Institut für Seenforschung.

muss die Möglichkeit eingeräumt werden, die Mängel selbst zu beheben. Ist das Bauunternehmen dazu nicht in der Lage, kann die Behebung dem Bauunternehmen in Rechnung gestellt werden.

Ist eine Teilabnahme auf Grund eines hohen Wasserspiegels erfolgt, kann das Bauunternehmen den Beginn der Verjährungsfrist für das gesamte Bauwerk verlangen. Aufgrund der nicht beeinflussbaren Naturgewalt ist der Aufforderung stattzugeben. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn eine fertiggestellte Böschung nur zum Teil im Wasser steht oder auch dann, wenn eine klare Trennung der Bauteile vorhanden ist, die Bauteile aber statisch interagieren, wie z. B. der Böschungsfuß (Bauwerk aus Wacken) und die Böschung.

NACH DEM BAU

Objektbetreuung

Sofern die HOAI Leistungsphase 9 ‚Objektbetreuung‘ beauftragt wurde, wird das Planungsbüro regelmäßig Objektbegehungen mit dem Bauherrn und weiteren Beteiligten durchführen. Bis zum Ablauf der Verjährungsfrist, jedoch maximal bis nach 5 Jahren können Gewährleistungsansprüche für festgestellte Mängel angezeigt und gemeinsam mit dem Bauherrn und dem Bauunternehmen behoben werden. Nach der Verjährungsfrist wird das Bauunternehmen die Freigabe verbliebener Sicherheitsleistungen beantragen. Das Planungsbüro wird dies initiieren.

Auch nach Ablauf der bautechnischen Gewährleistungen muss intensiv darauf geachtet werden, dass sich eine erfolgreiche Renaturierung eigendynamisch weiterentwickeln kann und keinen zu hohen Nutzungsdruck erfährt (Abbildung 7).

Monitoring

Durch Monitoring-Aktivitäten werden im Vorfeld, während und nach einer Maßnahme Ökosystem-Parameter erhoben. Das Monitoring-Konzept, die Parameter, die Erhebungstechnik, die Art der Betreuung und das Evaluierungsverfahren sind von einem/einer Expert*in zu bestimmen, um die Ergebnisse bei zukünftigen Projekten verwenden zu können. Diese Monitoring-Aktivitäten werden vom Landesbetrieb Gewässer in Anlehnung an den Renaturierungsleitfaden Bodenseeufer ([14]) beauftragt. Sie können separat oder als Bestandteil der ökologischen Baubegleitung vergeben werden.

SCHLUSSFOLGERUNG

Uferrenaturierungen sind trotz aller Schwierigkeiten in der Umsetzung ein lohnendes Ziel. Auch in intensiv genutzten Gebieten können mit gut geplanten Maßnahmen die Bevölkerung und die Natur profitieren (Abbildungen 8 und 9).

**Abb. 8:**

Strandbad Eriskirch vor der Uferrenaturierung und Sanierung des Strandbades. Foto: Institut für Seenforschung.

**Abb. 9:**

Strandbad Eriskirch nach der Uferrenaturierung und Sanierung des Strandbades. Im Hintergrund die Beobachtungsplattform unmittelbar am Rand des Naturschutzgebietes. Foto: Institut für Seenforschung.

Veränderungen am Ufer sind vor Maßnahmenumsetzung stets mit den zuständigen Behörden abzusprechen. Ausgenommen davon sind nur geringfügige Änderungen wie die Entnahme von Treibholz und die Entsorgung von angeschwemmten Abfällen. Treibholzablagerungen am Bodensee werden auf

Grundlage der Unterhaltungslast nach § 32 WG-BW vom Landesbetrieb Gewässer geräumt. Hierzu zählen sperrige und schwere Holzstücke, zu deren Räumung Maschinen erforderlich sind oder die mindestens armdick sind. Die Entnahme von Treibholzablagerungen dünnerer Holzstücke liegt in der Zuständigkeit der Gemeinde. In Sondersituationen insbesondere nach Hochwasserereignissen mit starkem Schwemmholanfall erfolgt die Beseitigung durch den Landesbetrieb Gewässer in Abstimmung mit den Kommunen.

Die frühzeitige und umfassende Einbindung aller Behörden ist für alle geplanten Maßnahmen wichtig, um Verzögerungen zu vermeiden (siehe S. 131). Die Behörden werden richtungsweisend mitwirken. Dies beschleunigt das Vorhaben, da nicht realisierbare Planungen frühzeitig korrigiert werden können und dadurch Planungskosten reduziert werden können.

Auftragnehmer von Baumaßnahmen können Unternehmen sein, deren Kernkompetenz nicht im ökologischen Wasserbau liegen. Diese, ggf. auch Subunternehmer, müssen intensiv auf die besondere Situation an Seeufern hingewiesen werden. Eine ökologische Baubegleitung ist deshalb unumgänglich (S. 135).

Eine regelmäßige Baustellenbesichtigung durch den Auftraggeber und beteiligte Behördenvertreter ist sehr zu empfehlen. Dafür müssen die jeweiligen Inhalte frühzeitig kommuniziert werden, um schon im Vorfeld notwendige Informationen für sachgerechte Entscheidungen einzuholen. Dieses Vorgehen trägt wesentlich zu einem weitgehend reibungslosen Bauablauf bei (S. 132).

Die Abnahme erfolgt gemeinsam mit dem Bauherrn, dem Bauunternehmen, Bauleitung und der Genehmigungsbehörde (S. 136).

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] WG-BW, Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG) vom 3.12.2013, in der Fassung vom 28.11.2018.
- [2] LVG-BW, Landesverwaltungsgesetz für Baden-Württemberg (LVG) vom 14.10.2008, in der Fassung vom 21.05.2019.
- [3] WHG, Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz WHG) vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585), in der Fassung vom 04.12.2018 (BGBl. I S. 2254).
- [4] WBW FORTBILDUNGSGESELLSCHAFT FÜR GEWÄSSERENTWICKLUNG MBH (2015): Gewässerschau – mehr als eine Pflichtaufgabe. Grundlagen, Organisation und Durchführung. – Broschüre, Karlsruhe, 56 S. (Download unter <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/247088/gewaesserschau_mehr_als_eine_pfl_ichtaufgabe.pdf?command=downloadContent&filename=gewaesserschau_mehr_als_eine_pfl_ichtaufgabe.pdf>; zuletzt aufgerufen im Mai 2019).
- [5] IGKB, INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE: Uferbewertung und Renaturierung (URL <<https://www.IGKB.org/aktuelles/bowis-bodensee-wasser-informations-system/uferbewertung-und-renaturierung/>>; zuletzt aufgerufen im Mai 2019).

- [6] LVwVfG, Landesverwaltungsverfahrensgesetz für Baden-Württemberg (LVwVfG) vom 12.04.2005, in der Fassung vom 12.05.2015.
- [7] UVPG, Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) vom 12.02.1990, in der Fassung vom 24.02.2010.
- [8] Leitfaden Bürgerbeteiligung in der Landesverwaltung für Baden-Württemberg vom 20. Führungslehrgang 2012/2013. (Download unter <<https://diag-freiburg.de/html/media/dl.html?i=365094>>, zuletzt aufgerufen im Mai 2019).
- [9] LBO, Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) vom 5.03.2010, in der Fassung vom 21.11.2017.
- [10] EG-Wasserrahmenrichtlinie: Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23.10.2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, in der Fassung vom 05.06.2009.
- [11] BNatSchG, Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz, BNatSchG) vom 29.07.2009, in der Fassung vom 15.09.2017.
- [12] Bodensee-Richtlinien 2005 vom 10.12.2006, in der Fassung vom 09.05.2018. (Download unter <https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/aktuelles/Bodensee-Richtlinien_2005_2015_2018.pdf>, zuletzt aufgerufen im Mai 2019).
- [13] Bodenseeuferplan Regionalverband Bodensee-Oberschwaben vom 15. November 1984. (Download unter <<https://www.rvbo.de/Planung/Bodenseeuferplan>>, zuletzt aufgerufen im Mai 2019).
- [14] IGKB, INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE (2009): Renaturierungsleitfaden Bodenseeufer. (Download unter <https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/publikationen/wissenschaftliche_berichte/igkb_rlf_v20090225_komp.pdf>).
- [15] VwV Öffentlichkeitsbeteiligung, Verwaltungsvorschrift der Landesregierung zur Intensivierung der Öffentlichkeitsbeteiligung in Planungs- und Zulassungsverfahren (VwV Öffentlichkeitsbeteiligung) vom 17.12.2003.
- [16] RPT, Regierungspräsidium Tübingen: Planfeststellung (URL <<https://rp.baden-wuerttemberg.de/Themen/Bauen/Seiten/Planfeststellung.aspx#WIE%20WERDEN>>; zuletzt aufgerufen im Mai 2019).

Glossar

Glossar

ABS	Acoustic Backscatter Strength (akustische Rückstreustärke), ein Maß für die Partikeldichte in der Wassersäule.
amphibisch (syn. semiaquatich)	Attribut eines Lebensraums, der zeitweise überschwemmt und zeitweise landfest ist (vgl. DIN 4047-5 Nr. 3.1.2) sowie für Tiere, die sich in diesen Lebensräumen aufhalten, und für Pflanzen, die zeitweise oder dauerhaft ihre Vegetationsorgane teils unter Wasser, teils über dem Wasserspiegel entwickelt haben (↪ Amphiphyten).
Amphiphyten	Pflanzen, die zeitweise oder dauerhaft ihre Vegetationsorgane teils unter Wasser, teils über dem Wasserspiegel entwickelt haben (vgl. DIN EN 15460:2008-01, Ziff. 3.1).
Amplitude, Wellen~ (A/m)	die maximal mögliche Auslenkung einer Welle in Ausbreitungsrichtung; die Amplitude entspricht der halben Wellenhöhe ($A = H/2$).
Ausmündungsbereich	Freiwasser- und Uferbereich eines Sees, in dem aus dem See abfließendes Wasser eine Bedeutung für Relief, Sediment und Biozöosen hat.
Benthal	Lebensraum des Seebodens einschließlich der unmittelbar angrenzenden Wasserschichten; das Benthal gliedert sich bei tiefen Seen in das Litoral und das Profundal (vgl. DIN 4049-2: 1990, 4.36).
bodennahe Strömungsgeschwindigkeit, maximale ~ ($U_{max}/m\ s^{-1}$)	maximale Tangentialgeschwindigkeit der durch Oberflächenwellen erzeugten oszillierenden Strömung an der Gewässersohle (hier: Seegrund).
Bodenschubspannung ($BSS/N\ m^{-2}$)	die tangential an einer festen Oberfläche angreifende Reibungskraft pro Flächeneinheit, die für eine Abbremsung der ↪ bodennahen Strömung sorgt.
Brandung	Verhalten von ↪ Flachwasserwellen beim Auftreffen auf den flach geneigten Gewässergrund eines Küstenmeeres bzw. eines Binnensees oder auf ein festes Hindernis, gekennzeichnet durch das Brechen (Sturz-, Schwall-, Reflexionsbrecher) und das Hochlaufen (Wellenauflauf, run-up, uprush) der gebrochenen Welle auf den Strand (vgl. DIN 4049-3 Nr. 2.6.37).
Brandungszone	Streifen entlang einer Meeresküste oder des Ufers eines Binnensees, in dem ↪ Brandung (Brechen und Wellenauflauf) auftreten; Lage und Breite des Streifens verändern sich mit dem Wasserstand, dem Wellenenergieeintrag und der Wellenrichtung.
Diffraktion (syn. Beugung)	Ablenkung der Ausbreitungsfront von (Oberflächen-Wasser-)Wellen an einem Hindernis (Untiefe, Insel, Bauwerk).
Dispersion	Abhängigkeit einer physikalischen Größe (hier: Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Oberflächenwelle) von der Frequenz bzw. der Wellenlänge.
Dissipation, Wellenenergie~	Vorgang in einem (fluid-)dynamischen System, bei dem z. B. durch Reibung die Energie einer makroskopisch gerichteten Bewegung (z. B. Orbitalbewegung einer Oberflächenwelle) in andere Energieformen umgewandelt wird (z. B. in kleinräumig-ungerichtete Bewegungen).
Druckattenuation	Verminderung der ↪ Magnitude der Druckfluktuationen (Auslenkung der Wasseroberfläche) durch Oberflächenwellen an der Wasseroberfläche mit zunehmender Wassertiefe.

Durchgängigkeit, ökologische ~	funktionale Verbindung zwischen gleichartigen Biotopen (hier: Lebensräume eines Fließgewässers oder eines Seeufers), die einen wechselseitigen Individuenaustausch aller Entwicklungsstadien der jeweils ausgewählten Organismengruppen (z. B. Fische, Amphibien, Libellen) zulässt, so dass das Überleben der Population ermöglicht wird.
Energiedissipation, Wellen~	↳ Dissipation
Einzelkorngefüge	Gefügemerkmal von Böden oder Lockergesteinen; die einzelnen Körner liegen lose nebeneinander und weisen dabei keine besondere Art von Verbindung, insbesondere keine nennenswerten Kohäsivkräfte (↳ Kohäsionsgefüge) auf.
Entwicklung, eigendynamische ~	die nicht durch direkte menschliche Einflussnahme veränderte Eigenschaft eines Biotops oder einer Biozönose, sich nach inneren (z. B. ontogenetisches Wachstum, Populationsveränderungen, Konkurrenz u. a.) und äußeren Gesetzmäßigkeiten (z. B. Standortfaktoren, zufällige Störungen u. a.) dynamisch zu verändern (s. auch ↳ Seeuferdynamik).
Epilitoral	Lebensraum des selten überschwemmten Seeufers zwischen der Linie des episodischen Hochwassers (hier: mittleres jährliches Hochwasser) und der landseitigen Grenze der Uferzone, in dem Pflanzen und Tiere leben, deren Populationen seltene Überflutungen sowie Bodennässe durch hohen Grundwasserspiegel tolerieren; das Epilitoral wird seawärts durch das Eulitoral begrenzt; vgl. DIN EN 16039 Nr. 3.48 (2011).
Eulitoral	Lebensraum der Wasserwechselzone des Sees zwischen dem episodischen Niedrigwasser und dem episodischen Hochwasser (hier: mittleres jährliches Niedrig- bzw. Hochwasser), in dem Pflanzen und Tiere leben, deren Populationen an wechselnde Überschwemmungs- und Trockenphasen und zumeist auch an die Belastungen durch Wellengang angepasst sind; das Eulitoral wird seawärts durch das Sublitoral und landwärts durch das Epilitoral begrenzt; vgl. DIN EN 16039 Nr. 3.17 (2011).
Exposition, hydrodynamische ~	mittlere energetische Belastung eines räumlichen Ausschnitts der Flachwasserzone und des Ufers eines Sees durch Oberflächenwellen und Strömungen.
Fahrgastschiff (syn. Passagierschiff)	größeres Wasserfahrzeug mit Antrieb, spezieller Konstruktion, Ausrüstung und Einrichtung zur gewerbmäßigen Beförderung und Versorgung von Personen auf Binnenwasserstraßen (hier: Binnenpassagierschiff; vgl. Binnenschiffahrtsstraßen-Ordnung vom 16. Dezember 2011, § 1.01 Ziff. 16), auf Küstengewässern oder über See.
Fahrgastschiffahrt	Unternehmensbereich der Berufsschiffahrt, der sich der Beförderung und Versorgung von Personen gegen Entgelt auf einem ↳ Fahrgastschiff widmet.
Feststoffdynamik	Veränderungen der mittleren Zu- und Abfuhr von Feststoffen in bzw. aus einem räumlichen Ausschnitt des Seeufers bei annäherndem Reliefferhalt. Wichtige Eintragsquellen sind terrestrische Hangprozesse (Schichtfluten, Hangrutsche), fluviatile Prozesse (Schwemmkegel- und Delta-Bildungen), litorale Transportprozesse (Uferlängstransport, uferquarer Transport), biogene Aktivität (Nettoprimärproduktion mit photosynthetischer Carbonatfällung und Bildung organischer Ablagerungen).
Fetch	siehe ↳ Windlaufänge.
Flachwasserwelle	Welle, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wesentlichen von der Wassertiefe abhängig ist; die Wellenhöhe ist kleiner als die halbe Wellenlänge; vgl. DIN 4044, Nr. 1.21 (1980) und DIN 4049 Teil 3 Nr. 3 2.6.12 (1994); im Unterschied zur ↳ Tiefwasserwelle hat die Flachwasserwelle Grundberührung, d. h. die Wassertiefe unter der Welle ist kleiner als die ↳ Wellenbasis.
Flachwasserzone	Tiefenbereich eines Sees, in dem zumindest zeitweilig ↳ Flachwasserwellen (und nicht ausschließlich Tiefwasserwellen) auftreten (vgl. DIN 4049 Teil 3 Nr. 2.6.12 (1994)).

Frequenz (f/Hz, s^{-1})	ein Maß, wie schnell bei einem periodischen Vorgang die Wiederholungen aufeinander folgen, z. B. beim Durchgang sinusförmiger Wellen; die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer T/s .
Gewässer	in der Natur fließendes oder stehendes Wasser, das in den natürlichen Wasserkreislauf eingebunden ist (§ 3 Nr. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes, WHG); es besteht aus dem Wasservolumen, dem Gewässerbett und ggf. dem zugehörigen Grundwasserleiter (DIN 4049 Teil 1 Nr. 1.10).
Gewässersohle (eines Sees) syn. Seegrund, Seeboden	Grenzfläche zwischen dem freien Wasserkörper (einschließlich etwaig vorhandener \rightarrow Tauchblatt-, \rightarrow Schwimmblatt- und \rightarrow Sumpfpflanzen) und dem mineralischen oder organischen Substrat, das das Gewässerbett bildet (Sohlsubstrat).
gradierte Schichtung	\rightarrow Schichtung
Helophyten	\rightarrow Sumpfpflanzen
Hiatus	geologische Schichtlücke, gekennzeichnet durch das Fehlen von Abschnitten der zu erwartenden Schichtenabfolge; diese durch ein bestimmten stratigraphisches Alter gekennzeichnete Lücke wird (i) durch Erosion bereits abgelagerter Schichten oder (ii) Nicht-Ablagerung von Feststoffen (Omission) verursacht.
Hydrodynamik	Teilgebiet der Strömungslehre, das sich mit bewegten Flüssigkeiten (Fluide) beschäftigt; untersucht werden z. B. laminare und turbulente Strömungen in offenen und geschlossenen Gerinnen.
Hydromorphologie (syn. in CH: Ökomorphologie)	die wissenschaftliche Beschreibung und kausale Analyse und Modellierung der Eigenschaften eines Oberflächengewässers, die sich aus der wechselweisen Beeinflussung von (i) strömendem oder ruhendem Wasser, (ii) dem Substrat und (iii) der Oberflächengestalt des Gewässers und seiner Sohle ergeben; die Hydromorphologie greift auf Erkenntnisse vor allem der Hydrodynamik, der Geomorphologie und der Limnophysik zurück; vgl. DIN EN 14614 2.18 (2005), DIN EN 16039 Nr. 3.22 (2011), DIN EN 16503 3.17 (Entwurf 2012).
indigene Flora, ~ Fauna	Gesamtheit der Pflanzen- oder Tierarten (einschl. Unterarten, Varietäten), die in einem bestimmten Gebiet einheimisch sind, d. h. sich dorthin ohne Einfluss des Menschen ausgebreitet haben und dort dauerhaft vorkommen und reproduzieren; davon abzugrenzen sind Neozoen bzw. Neophyten sowie Nutz- und Haustiersippen bzw. Kultur- und Zierpflanzensippen sowie Pflanzenarten, die vor 1492 eingewandert oder eingebracht worden sind (Archäophyten).
Intermediärtransport	gerichtete Bewegung von Sedimentpartikeln (z. B. Sand) in einer bodennahen, bewegten Wasserschicht von wenigen Dezimetern Mächtigkeit; die Partikelkonzentration in der Wassersäule ist in vertikaler Richtung nicht konstant, sondern nimmt mit wachsender Entfernung von der \rightarrow Gewässersohle ab.
Kelvin-Wellen	in einem See eine beckenweite, gegen den Uhrzeigersinn laufende Welle an der Grenzschicht zwischen der durchmischten Oberflächenschicht und dem Tiefenwasser.
Kliff	Steilhang eines Festgesteins oder eines scherfesten Lockergesteins (z. B. Geschiebelehm) an einem Abbruchufer (syn. Abrasionsufer) eines Binnensees oder an einer marinen Abbruch- bzw. Abrasionsküste; wesentliche Prozesse sind (i) die \rightarrow Brandung, die zu einer Brandungshohlkehle führt, (ii) Scherkräfte innerhalb des Lockergesteins, die zu einem Abgleiten von Hangmassen führen, sowie (iii) Uferströmungen, die zu einem Abtransport der abgerutschten Gesteinmassen führen.
Kliff, fossiles ~ (syn. totes Kliff, Ruhekliff)	Reliktform eines \rightarrow Kliffs, an dem die typischen Prozesse aktuell nicht mehr wirksam sind.

Kohäsionsgefüge	Gefügemerkmal von Böden oder ↳Lockergesteinen, bei dem die Oberflächeneigenschaften der Einzelkörner die Eigenschaften, die durch ihre Masse verursacht werden, überwiegen; die Kohäsion sorgt im Boden oder im feinkörnigen Lockergestein für den inneren Zusammenhalt der einzelnen Teilchen untereinander; Kohäsionskräfte sind nur bei Lockergesteinen merklich, die hohe Anteile sehr kleiner Körner enthalten, z. B. bei Ton.
Kolmation (syn. Selbstdichtung)	Verdichtung eines Boden- oder Lockergesteinskörpers durch Reduktion des Porenvolumens infolge von physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen (vgl. DIN 4049-3: 1994-10 Nr. 3.3.11 und EN 14614:2004, 2.10).
Konglomerat (Fachbegriff Geologie)	ein grobkörniges, klastisches Sedimentgestein, das aus mindestens 50 % gerundeten Komponenten (Kies oder Geröll) besteht, welche durch eine feinkörnige Matrix verkittet sind.
Konsolidierung (von Sedimenten)	Verfestigung der Sedimentoberfläche, ggf. unter Beteiligung eines Biofilms, und damit die Ausbildung einer ↳kohäsiven Sedimentschicht, die weniger leicht durch wellenerzeugte ↳Bodenschubspannungen mobilisiert werden kann.
Korndurchmesser, nominaler ~ (von Sedimenten; d_n/m)	Durchmesser einer Kugel, die das gleiche Volumen wie das Korn hat (vgl. DIN 4044, Nr. 2.1.18 (1980)).
Kulturschicht	Schichtkörper (syn. Stratum, vgl. ↳Lithostratigraphie), der durch Siedlungsaktivitäten des Menschen (ggf. einschließlich seiner Haustiere) zustande gekommen ist und die Reste der von Menschen bearbeiteten oder genutzten mineralischen und organischen Gegenstände enthält. Die wichtigsten Bestandteile von Kulturschichten in Feuchtbodensiedlungen sind Baumaterialien (Holz, Lehm, Steine), Nahrungsmittelreste (Knochen, Pflanzenreste einschließlich der Pollen), Gefäße (Holz, Keramik), Kleidungs- bzw. Textilreste (Leinen- u. a. Bastgewebe) und Werkzeug-Bestandteile aus Holz, Geweihsubstanz, Knochen, Stein oder Bronze. Die so bezeichnete Kulturschicht befindet sich am Ort ihrer Entstehung (<i>in situ</i>) und ist in ihrem stratigraphischen Zusammenhang (Schichtabfolge) erhalten.
Larssen-Profil	Typ von Profilelementen zum Bau von Spundwänden, bestehend aus stählernen, U-förmigen Spundbohlen; die Spundwand besteht aus einer Reihe von ineinandergeschobenen Spundbohlen, die meist in den Boden gerüttelt, gerammt oder gepresst werden.
Lithostratigraphie	die räumliche („oben-unten“-Beziehung) und strukturelle Gliederung von Gesteinseinheiten (hier: Lockergesteine) aufgrund ihrer lithologischen Merkmale; die lithostratigraphische Einheit ist der Schichtkörper (Stratum) zusammen mit seiner Untergrenze.
Litoral	Lebensraum der ↳Uferzone (hier: eines Sees); das Litoral gliedert sich in das ↳Sublitoral, das ↳Eulitoral und das ↳Epilitoral; vgl. DIN EN 16039 Nr. 3.33 (2011).
Magnitude, Ausmaß der ~	der Faktor, der notwendig ist, um in einer Zahlendarstellung einen Wert um eine Stelle zu vergrößern oder zu verkleinern; in einem Dezimalsystem wird ein Faktor (oder Divisor) von 10 als ‚eine Größenordnung‘ bezeichnet.
Makrophyten	in Süß- oder Brackwasser-Lebensräumen vorkommende, ganz oder teilweise untergetauchte Pflanzen, deren Einzel Exemplare aufgrund ihrer Größe mit bloßem Auge erkennbar und abgrenzbar sind; hierzu gehören alle im Süß- oder Brackwasser vorkommenden Blütenpflanzen, Farne, Moose, Armeleuchteralgen und weitere thallose (Groß-)Algen (vgl. DIN EN 15460: 2007, 3.2; DIN EN 14184:2014-08).
Makrophytengrenze, obere ~ (OMG)	Sohniveau der landseitigen Grenze des Vorkommens von ↳Tauchblattpflanzen; die Grenze ergibt sich je nach Definition durch das Vorkommen einzelner Pflanzen oder durch den Deckungsgrad der Vegetation (z. B. 10 % oder 50 %); das Sohniveau kann absolut (in m NHN) oder relativ (in Meter ober- oder unterhalb des Mittelwasserspiegels) angegeben werden.

Makrozoobenthos	Gesamtheit der im Ψ Benthal lebenden wirbellosen Tiere oberhalb einer definierten Körpergröße; die Körpergröße wird gewöhnlich durch die Maschenweite des Siebes oder Netzes angenähert, auf dem sich die Tiere beim Siebvorgang anreichern (z. B. 0,2 oder 0,5 mm).
Matrix (Fachbegriff Petrographie)	die relativ feinkörnige Grundmasse eines (Locker-)Gesteins, von der deutlich grobkörnigere oder andersartige Gesteinsbestandteile unterscheidbar sind.
Modelldomäne	der in einem numerischen Modell für die Berechnung von Modellparametern berücksichtigte räumliche Ausschnitt oder Bereich.
Morphodynamik (der Seeuferzone)	die zeitabhängige Substrat- und Reliefänderung des Seeufers in ufernormaler und in Uferlängsrichtung durch Erosion, Sedimentation und Bodenbildung unter dem maßgeblichen Einfluss von Seespiegelschwankungen, Wellen und Strömungen.
Ökosystemleistung engl. <i>ecosystem services</i> , ESS (syn. Ökosystemdienstleistung)	eine Nutzenstiftung bzw. ein Vorteil, den Menschen von Ökosystemen (hier: Seeufer) beziehen; hierzu zählen auch kulturelle Ökosystem(dienst)leistungen, z. B. Erholung, Naturtourismus und ästhetischer Genuss der Einzigartigkeit von Landschaftsausschnitten.
Ökoton	Übergangsbereich zwischen zwei verschiedenen Ökosystemen, oft gekennzeichnet durch besondere Lebensbedingungen und Biotope, die in den benachbarten Ökosystemen nicht auftreten, sowie durch einen besonderen Artenreichtum.
OMG	Ψ Makrophytengrenze, obere \sim
oszillierende Strömung	Ψ Strömung
Phasengeschwindigkeit ($v_p/m s^{-1}$)	Ausbreitungsgeschwindigkeit gleicher Phasen (gleiche Auslenkung zu einem Referenzzeitpunkt und -ort) einer monochromatischen Welle in Ausbreitungsrichtung; berechnet sich aus der Wellenlänge (d. h. die Strecke, die zurückgelegt wird), dividiert durch die Periodendauer (die Zeit, die dafür benötigt wird).
Profundal	Lebensraum des Seebodens einschließlich der unmittelbar angrenzenden Wasserschichten, in dem aufgrund des Lichtmangels keine Nettoprimärproduktion von Ψ Tauchblattpflanzen mehr möglich ist; zur Seeoberfläche hin wird das Profundal durch das Litoral abgegrenzt.
Refraktion (von Oberflächenwellen)	eine von der Wassertiefe abhängige Änderung der Wellenausbreitungsrichtung, die in der Ψ Flachwasserzone wirksam wird; bei sanft ansteigenden Uferplattformen führt ihre Wirkung dazu, dass sich Wellenfronten zunehmend parallel zur Uferlinie ausrichten.
Renaturierung (eines Seeufers)	leitbildorientierte Wiederherstellung oder Entwicklung eines vorher anthropogen beeinträchtigten Seeuferabschnitts in Richtung auf einen naturnäheren Zustand; vgl. DIN 4047 Teil 10 7.28 in Verbindung mit der Begriffsfassung der ‚Naturnähe‘ in N.N. 2003b Textbox No. 1, DIN EN 14614 2.31 (2005).
Ripströmung (syn. Rippstrom, Brandungsrückströmung)	lokale begrenzte, orthogonal zur Uferlinie seewärts führende Strömung; an naturnahen Ufern treten Brandungsrückströmungen in Reliefdepressionen der strandnahen Uferzone auf, die seitwärts von Untiefen (z. B. Sandbänke) begrenzt sind; ähnliche Phänomene treten auf, wenn parallel zum Ufer verlaufende Strömungen an Uferquerbauwerken (z. B. Hafmolen) zum Seebecken hin abgelenkt werden.
Röhricht	Bestand aus meist einer oder wenigen Arten von Ψ Röhrichtpflanzen
Röhrichtpflanze	großwüchsige, grasartige Blütenpflanze, die aufgrund morphologischer, anatomischer und physiologischer Merkmale Überflutungstolerant ist und daher auf nassen bzw. überschwemmten Standorten oft großflächige Bestände bildet (Untergruppe der Ψ Sumpfpflanzen [syn. Helophyten]); Photosynthese und Kohlenstoff-Assimilation finden überwiegend im Luftraum statt; an Seeufern gehören zu den Röhrichtpflanzen v. a. Schilfrohr,

Rohrglanzgras, Rohrkolben-Arten, Teichbinsen-Arten, Igelkolben-Arten und Seggen-Arten (vgl. DIN 4047 Teil 5, Nr. 3.1.17; DIN EN 15460:2008-01, Ziff. 3.6).

Schichtung, gradierte ~ (Fachbegriff Geologie)

ein Gefügemerkmal von Sedimentgesteinen oder rezent abgelagerten Sedimenten, bei dem die Größe der Sedimentpartikel von der Schichtbasis zur Oberseite hin abnimmt.

Schwimblattpflanze

Wasserpflanze, die am Gewässergrund wurzelt und deren Blätter normalerweise auf der Wasseroberfläche schwimmen (es kommen aber auch Unterwasserblätter vor); die Assimilation erfolgt dabei im Luftraum über die nicht wasserbedeckte Blattoberseite; bestandsbildende Schwimblattpflanzen der Seeufer sind Seerosen-Arten, Teichrosen-Arten, Froschbiss u. a.

Sedimentnetttransport

resultierende Menge an transportiertem Sediment (Masse oder Volumen) über eine definierte Zeitperiode (Akkumulation minus Erosion).

See

eine natürliche, künstliche oder gegenüber ihrem natürlichen Zustand erheblich veränderte oberirdische Vertiefung der Erdoberfläche (Seebecken) des Binnen- oder des Küstenlandes ohne bedeutende hydraulische Verbindung zum Meer, die (i) allseitig von festem Land umgeben ist, (ii) zumindest zeitweise mit Wasser gefüllt ist, (iii) deren tägliche Durchflussmenge im Vergleich zum Volumen gering ist, (iv) in der zeitunabhängig gleichgerichtete Strömungen von untergeordneter Bedeutung für die Ausbildung der Biozönosen sind, und die (v) am natürlichen Wasserkreislauf teilnimmt; zweckmäßigerweise wird eine freie Wasserfläche von mindestens 0,01 km² sowie an der tiefsten Stelle eine Mindestwassertiefe vorausgesetzt, bei der Ψ Sumpfpflanzen nicht über die Wasseroberfläche hinausreichen; vgl. DIN 4049 Teil 3, Nr. 2.1.32 (1994).

Seekreide

Krustenkalk-Ablagerung im Litoral von Seen, die als Folge des photosynthetischen Kohlendioxid-Entzug durch Unterwasserpflanzen (v. a. Armleuchteralgen) gebildet wurden; reine Seekreiden enthalten mehr als 95 % CaCO₃ (Calcit) mit sehr geringen Anteilen von MgCO₃, silikatischer Klastika und organischer Substanz; umgelagerte Seekreiden oder Mischfazies haben einen entsprechend geringeren Kalkgehalt.

Seeoberfläche (A₀/m²)

die durch die Uferlinie des Festlands und der Inseln eingeschlossene Wasserfläche eines See; vgl. DIN 4049 Teil 3, Nr. 2.1.37 (1994), DIN EN 16039 Nr. 3.32 (2011).

Seespiegel (z/m NHN)

die durchschnittliche Höhe der von Wellen- und Schwingungskräften unbeeinflussten Wasseroberfläche (Ruhewasserspiegel) eines Sees, bezogen auf eine festgelegte Bezugsfläche für Höhenmessungen (hier: Normalhöhennull).

Seeuferdynamik

fortwährende Veränderung der Biotope und Biozönosen des Seeufers als Resultat der Feststoff-, hydrologischen, morphologischen und Vegetationsdynamik unter dem Einfluss zeitveränderlicher Umgebungsbedingungen und episodischer, natürlicher Störungen.

Seeuferzone

gürtelförmig um den See reichende Zone beiderseits der Ψ Uferlinie, in der der landseitige Abschnitt durch die Hochwasserstände des Sees beeinflusst wird und dessen wasserseitiger Abschnitt bis zu der durchschnittlichen Seetiefe reicht, bei der

- (a) signifikante Ψ Tiefwasserwellen in Ψ Flachwasserwellen übergehen oder
- (b) die photosynthetisch wirksamen Strahlungsmengen am Seegrund im Jahresmittel eine positive Nettoprimärproduktionbilanz substratgebundener Ψ Tauchblattpflanzen möglich machen.

Es gilt jeweils die maximale der nach (a) und (b) ermittelten Seetiefe. Unterstellt werden ein naturnahes Relief und naturnahe Wasserstandsschwankungen.

Die landseitige Grenze der Uferzone ist dort erreicht, wo sich vorübergehende Hochwasserstände des Sees weder direkt durch Überflutungen noch indirekt durch Aufstau des Grundwassers bemerkbar machen. Häufig ist diese Linie durch einen Vegetationswechsel zwischen einer überflutungs- oder grundwassertoleranten Feuchtgebietsvegetation und einer rein terrestrischen Vegetation bzw. dem Acker- oder Siedlungsland zu erkennen. -

Die seeseitige Grenze ist dort erreicht, wo sich signifikante Tiefwasserwellen durch Versteilung und Deformation (Shoaling) und parallele Ausrichtung zu den Tiefenlinien (↪Refraktion) zu Flachwasserwellen umbilden und damit infolge Grundberührung (↪Wellenbasis) zu einem Sedimenttransport bzw. zu ufermorphologischen Veränderungen in der Lage sind. Diese Linie kann beispielsweise bei einem kräftigen Sturm anhand der Wellenform ausgemacht werden. In vielen Fällen ist sie auch an einem deutlichen Gefälleknick zwischen wenig geneigter Uferplattform und dem steilen Beckenhang (Halde) zu erkennen. Bei kleinen Seen mit geringer Wellenentwicklung und bei solchen mit Hartsubstraten, grobem Geröll oder anstehendem Felsgestein sind diese Merkmale nicht deutlich genug ausgeprägt, so dass besser die untere Grenze des Vorkommens von geschlossenen Rasen substratgebundener ↪Tauchblattpflanzen (v. a. *Chara* spp., *Nitellopsis* spp., *Scapania* spp. u.a. Moose, *Isoetes* spp., *Potamogeton* spp.) herangezogen wird. Die untere Makrophytengrenze hängt vom trophischen Zustand des Sees ab und kann sich demnach im Zuge von Reinhaltmaßnahmen, gefolgt von einer Oligotrophierung verschieben. Um allen möglichen Merkmalsausprägungen an realen Stillgewässern Genüge zu tun, soll die jeweils tiefere der beiden Grenzlinien gelten.

Weiterhin wird aus pragmatischen Gründen eine Einflusszone von z. B. 50 m Breite oberhalb der Hochwasserlinie festgelegt. Die Seeuferzone beinhaltet als Lebensraum das ↪Litoral; vgl. DIN EN 14614 Nr. 2.4 und 2.29 (2005), DIN EN 16039 Nr. 3.3 und 3.48 (2011).

Sohldynamik

zeitliche Änderungen des lokalen Niveaus der Gewässersohle.

Sohltransport

gerichtete Bewegung von Sedimentpartikeln (Sand, Kies, Gerölle) im unmittelbaren Kontakt zur Gewässersohle; die Bewegung erfolgt schiebend, rollend oder hüpfend unter dem Einfluss oszillierender ↪Strömungen (während des Wellendurchgangs an Seeufern und Meeresküsten) oder gleichmäßiger Strömungen (Fließgewässer).

Sportboot (syn. Vergnügungsboot)

wind- oder maschinenbetriebenes Wasserfahrzeug mit mindestens einem Rumpf, das dem Freizeitvergnügen auf dem Wasser dient (Motorboot, Segelboot; nicht: Wassermotorrad) und eine Länge von 20 m nicht überschreitet; vgl. § 1.01 Nummer 14 Binnenschiffahrtsstraßen-Ordnung (BinSchStrO) 1954; für den Bodensee gilt abweichend die Bodensee-Schiffahrtsordnung, BSO (Vergnügungsfahrzeug n. Art. 0.02 a und k, BSO).

Stillgewässer

Oberbegriff, der Seen ($A_0 \geq 0,01 \text{ km}^2$) sowie vergleichbare Klein- und Kleinstgewässer ($A_0 < 0,01 \text{ km}^2$) umfasst.

Strömung, oszillierende ~

periodische Hin- und Zurückbewegung der Teilchen eines Fluids auf Orbitalbahnen, die kreisrund oder elliptisch sind; sichtbare Kennzeichen für oszillierende Strömungen sind Strömungsrippel, die in der Flachwasserzone von Seen und Küsten bei Vorliegen bestimmter Sedimentkorngrößen auftreten.

Sublitoral

dauernd überschwemmter Lebensraum des Seeufers zwischen der mittleren Niedrigwasserstandslinie und der seeseitigen Grenze des ↪Litorals; landseits wird das Sublitoral durch das ↪Eulitoral abgegrenzt.

Sumpfpflanze (syn. Helophyte)

krautige oder grasartige, einjährige oder ausdauernde Farn- oder Blütenpflanze, die in einem überschwemmten oder zumindest wassergesättigtem Substrat wurzelt, deren Blätter sich jedoch zum größten Teil im Luftraum befinden und die auch nur hier Photosynthese durchführen kann; zu den Helophyten gehören auch die ↪Röhrichtpflanzen.

Suspensionstransport

gerichtete Bewegung von Sedimentpartikeln (Ton, Silt, Feinsand) in der durch Hintergrundströmungen bewegten Wassersäule; die Partikelkonzentration in der Wassersäule an einem Ort ist unter gegebenen Bedingungen weitgehend unabhängig von der Distanz über dem Seegrund.

Szenario (Fachbegriff der Zukunftsforschung)

synthetische Abfolge von Ereignissen, die die Aufmerksamkeit auf Prozesse und Entscheidungserfordernisse lenken soll; hier: konstruierte Gesamtheit der Gegebenheiten, die sich

	auf die Abundanz von Pflanzen- und Tierarten bzw. die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften auswirken.
Tauchblattpflanze (syn. submerse Makrophyte)	Wasserpflanze (↳Makrophyte), deren anatomisch und physiologisch angepassten Vegetationsorgane (Blätter, Stängel, Wurzel bzw. analoge Organe z. B. bei Armleuchteralgen) sich zur Gänze unter Wasser befinden; der Blütenstand kann sich über dem Wasserspiegel befinden.
Tiefwasserwelle	eine Welle, deren Wellengeschwindigkeit im Wesentlichen von der Wellenlänge abhängig ist (vgl. DIN 4049 Teil 3 Nr. 2.6.14, 1994); im Unterschied zur ↳Flachwasserwelle hat die Tiefwasserwellen keine Grundberührung, d. h. die Wassertiefe unter der Welle ist größer als die ↳ Wellenbasis.
Uferlinie	Berührungslinie von Seegrund (↳Gewässersohle) und Wasserspiegel bei einem bestimmten Wasserstand (zumeist bei mehrjährig mittlerem Mittelwasserstand), vgl. DIN 4047 Teil 5 Nr. 1.3, DIN 4049 Teil 3 Nr. 2.1.14, DIN 4054 Nr. 1.8.
Uferlinienführung	natürlicher oder durch menschliche Einflussnahme hervorgerufener Verlauf der Uferlinie unter Angabe eines Betrachtungsmaßstabs (z. B. 1:10.000 oder 1:25.000); unterschieden werden u. a. gestrecktes Ufer, Bucht, Landvorsprung, Deltafront, Ausmündungstrichter, künstliche Quereinbauten (z. B. Hafentmolen) und Einbuchtungen (z. B. Hafenbecken).
Uferstruktur	Merkmalskomplex, der sich aus der Art der topographischen Objekte in der ↳Seeuferzone, ihre flächige Ausdehnung und lineare Erstreckung entlang der ↳Uferlinie, ihre reliefverändernden Eigenschaften und ihre Nachbarschaftsbeziehungen ergibt (vgl. weitere Erläuterungen in Kapitel 3).
Uferzone	↳Seeuferzone
Untere Makrophytengrenze, UMG, (syn. Makrophyten[tiefen]grenze)	maximale Wassertiefe bei der substratgebundene ↳Makrophyten zumindest in Einzel-exemplaren vorkommen (vgl. DIN EN 15460:2008-01, 3.8); die Grenze dichter, geschlossener Makrophytenbestände kann in geringerer Wassertiefe liegen.
Vegetationsdynamik	qualitative (betr. das Artenspektrum) und quantitative Veränderungen (betr. die Abundanzanteile der Arten) der Ufervegetation im Zeitverlauf, aufgrund einer gerichteten Abfolge (Sukzession) oder von natürlichen Störungen (vgl. ↳Seeuferdynamik).
Vergnügungsschifffahrt	Nutzung von Wasserfahrzeugen zu sportlichen oder touristischen bzw. Erholungszwecken (↳Sportboot).
Wasserstand (eines Sees) (z/m NHN)	die zeitabhängige Höhe der von Wellen- und Schwingungskräften unbeeinflussten Wasseroberfläche (Ruhewasserspiegel) eines Sees, bezogen auf eine festgelegte Bezugsfläche für Höhenmessungen (hier: Normalhöhennull); vgl. DIN 4049 Teil 3 Nr. 2.2.2 und 2.2.4 (1994), DIN EN 16039 Nr. 3.50 (2011).
Wasserstandsdynamik	Veränderungen der mittleren Häufigkeit von bestimmten charakteristischen ↳Wasserständen (z. B. Mittel-, Höchst- und Niedrigwasserstand).
Wasserstandsvariation	die Streuung der Einzelmesswerte des ↳Wasserstands einer Wasserstandszeitreihe; vgl. DIN EN 16039 Nr. 3.50 (2011).
Wellenbasis (z_w/m)	Wassertiefe, in der die Geschwindigkeit der oszillierenden ↳Strömung unter einer Oberflächenwelle so gering ist, dass kein Sohltransport mehr stattfindet; nach einer Faustregel entspricht diese Tiefe an offenen Meeresküste bei ausgereiftem Seegang der halben Wellenlänge; an der Ufern von Binnenseen wird diese Tiefe meist nicht erreicht (vgl. https://www.io-warnemuende.de/fragen-zum-meer.html).
Wellendiffraktion	↳Diffraktion

Wellenenergiefluss ($E_F/W\ m^{-1}$)	Energie, die pro Längeneinheit (z. B. Meter Uferlänge bei uferparallelen Wellenkämmen) und Zeiteinheit durch eine (↪Tiefwasser-)Welle transportiert wird; der Wellenenergiefluss einer Tiefwasserwellenserie ist dem Produkt aus Ausbreitungsgeschwindigkeit und dem Quadrat der ↪signifikanten Wellenhöhe proportional.
Wellenhöhe (H/m)	Höhendifferenz zwischen dem Hochpunkt eines Wellenbergs und dem Tiefpunkt eines Wellentals, d. h. die Summe der maximalen Wasserspiegelauslenkungen nach oben und nach unten, bezogen auf den Ruhewasserspiegel.
Wellenhöhe, signifikante ~ (H_s/m)	das arithmetische Mittel der Wellenhöhen aus dem Drittel der höchsten Wellen innerhalb einer festgelegten Beobachtungszeit (z. B. 20 Minuten); entspricht in etwa der Wellenhöhe, die ein geübter Beobachter als ‚maßgebende Wellenhöhe‘ schätzen würde.
Wellenklima	charakteristisches, durch Überlagerung verschiedener Wellen erzeugtes lokales Gesamtwellenbild; umfasst (i) die aktuell vom Wind erzeugten (Windsee) und (ii) die älteren oder ins betrachtete Gebiet von anderer Stelle hereingetragenen Wellen (Dünung) sowie (iii) die Schiffswellen; vgl. DIN 4044 Nr. 1.67 (1980), DIN 4049 Teil 3, Nr. 2.6.3 und 2.6.7 (1994).
Wellenlänge (λ/m)	horizontaler Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wellenkämmen, gemessen in Ausbreitungsrichtung der Welle.
Wellenperiode (T_s/s)	zeitlicher Abstand zwischen den Durchgängen zweier aufeinanderfolgender Wellenkämme an einem Ort, betrachtet in Ausbreitungsrichtung der Wellen.
Wellenperiode, signifikante ~ (T_s/s)	das arithmetische Mittel der Wellenperioden aus dem Drittel der höchsten Wellen (↪Wellenhöhe) innerhalb einer festgelegten Beobachtungszeit (z. B. 20 Minuten).
Wellenrefraktion	↪Refraktion
Wellenspektrum	Gesamtheit aller an einem Ort in einer bestimmten Zeitspanne vorkommenden Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen bzw. -frequenzen.
Windlaufänge (syn. Windwirklänge, Fetch)	Länge der maximalen Wegstrecke, die ein Wind aus einer gegebenen Richtung über der freien Seeoberfläche zurücklegen kann, um an einem gewählten Punkt der Seeoberfläche Oberflächenwellen zu erzeugen; die Windlaufänge kann durch abschattende hohe Bäume oder Gebirgszüge gegenüber einer ebenen Landschaft verringert sein („effektive“ Windlaufänge); vgl. DIN EN 16039 Nr. 3.19 (2011).
Zero-Crossing-Methode (syn. Nulldurchgangsmethode)	Verfahren zur Definition von Wellen in Abgrenzung von anderen Wasserspiegelschwankungen in einem unregelmäßigen Wellenfeld; es werden nur solche Schwankungen als Welle angesehen, bei denen die Auslenkung des Wasserspiegels die Null-Linie (Ruhewasserspiegel) über- oder unterschreitet.

Autoren

Autoren

Murat Aydin, Bauingenieur B. Eng.

Regierungspräsidium Tübingen
 Ref. 53.2 – Gewässer I. Ordnung, Hochwasserschutz und Gewässerökologie Neckar - Bodensee
 Konrad-Adenauer-Str. 20, 72072 Tübingen
 E-Mail: murat.aydin@rpt.bwl.de
 Web: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpt/Abt5/Ref532/>

Bauingenieur mit den fachlichen Schwerpunkten Wasserwirtschaft und Wasserbau am Bodensee. Aufgabenbereiche: Projektleitung und Umsetzung von Maßnahmen zum Hochwasserschutz, zur ökol. Gewässerentwicklung und zur Gewässerbewirtschaftung; operative, bauliche und finanzielle Abwicklung von Wasserbaumaßnahmen, Potenzialanalyse der Auswirkungen von Vorhaben am Bodensee in wasserwirtschaftlicher Hinsicht. Mitglied der IGKB AG ‚Renaturierungspotenzial‘.

Christian Degel, Dipl.-Ing.

Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik, IBMT
 Hauptabteilung Ultraschall
 Joseph-von-Fraunhofer-Weg 1, 66280 Sulzbach
 E-Mail: christian.degel@ibmt.fraunhofer.de
 Web: www.ibmt.fraunhofer.de

Maschinenbauingenieur mit Schwerpunkt Ultraschallwandler und Sensorträger. Technische und wissenschaftliche Expertise: Entwicklung von neuartigen ein- und mehrelementigen Schallwandlern und Systemen für die Bereiche Industrie, Medizin und Sonar. Tiefsttauchende, druckneutrale Trägerfahrzeuge (AUVs) und Komponenten sowie schwimmenden Trägersysteme (USVs) für den idealen Einsatz von Ultraschall-Messsystemen.

Renate Ebersbach, Priv.-Doz. Dr. phil.

Landesamt für Denkmalpflege im Reg.-Präsidium Stuttgart
 Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie
 Fischersteig 9, 78343 Gaienhofen-Hemmenhofen
 E-Mail: renete.ebersbach@rps.bwl.de
 Web: www.denkmalpflege-bw.de

Archäologin mit den fachlichen Schwerpunkten Feuchtboden- und Siedlungsarchäologie. Forschungen zu stein- und bronzezeitlichen Pfahlbauten in Süddeutschland und der Schweiz; denkmalpflegerische Betreuung von Unterwasser- und Moorfundstellen, Mitglied verschiedener nationaler und internationaler Gremien zur Unterwasserarchäologie.

Julia Goldhammer, Dr. phil.

Landesamt für Denkmalpflege im Reg.-Präsidium Stuttgart
 Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie
 Fischersteig 9, 78343 Gaienhofen-Hemmenhofen
 Email: julia.goldhammer@rps.bwl.de
 Web: www.denkmalpflege-bw.de

Archäologin, geprüfte Forschungstaucherin, fachliche Schwerpunkte: Steinzeiten, Bronzezeit und Feuchtbodenarchäologie; denkmalpflegerische Betreuung der Vor- und frühgeschichtlichen Bodendenkmäler am und im Bodensee und anderen Gewässern Baden-Württembergs. Mitglied in nationalen und internationalen unterwasserarchäologischen Gremien.

Lothar Heissel, Dipl.-Ing., Leitender Baudirektor

Regierungspräsidium Tübingen
 Ref. 53.2 – Gewässer I. Ordnung, Hochwasserschutz und Gewässerökologie Neckar - Bodensee
 Konrad-Adenauer-Str. 20, 72072 Tübingen
 E-Mail: lothar.heissel@rpt.bwl.de
 Web: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpt/Abt5/Ref532/>

Referatsleiter und Technischer Leiter des Landesbetriebs Gewässer im Regierungspräsidium Tübingen. Der Zuständigkeitsbereich umfasst mit Donau, Neckar inkl. deren Hauptzuflüsse und dem Bodenseeufer sämtliche Gewässer I. Ordnung im Regierungsbezirk Tübingen. Das Aufgabengebiet der rund 90 Mitarbeitenden beinhaltet neben der Gewässerunterhaltung sämtliche gewässerökologischen und hochwasserschutzbezogenen Maßnahmen.

Hilmar Hofmann, Dr. rer. nat.

Limnologisches Institut der Universität Konstanz
 Arbeitsgruppe Umweltphysik
 Mainaustraße 252, D-78464 Konstanz
 E-Mail: hilmar.hofmann@uni-konstanz.de
 Web: www.biologie.uni-konstanz.de/uphys-HilmarHofmann/

Experte auf dem Gebiet der aquatischen Umweltphysik (empirische und modellbasierte Ansätze). Schwerpunkte: physikalische Prozesse in der Flachwasserzone von Seen (Wellen, Strömung, Sedimentdynamik, biotische Interaktionen), groß- und kleinskalige Transportprozesse, Treibhausgasemission und -budgetierung und Migration und Verteilung von Plankton.

Jens Hornung, Dr. rer. nat.

Technische Universität Darmstadt
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt
E-Mail: hornung@geo.tu-darmstadt.de
Web: https://www.geo.tu-darmstadt.de/iag/personen/mitarbeiter_details_geo_4440.de.jsp

Martin Mainberger, Dr. phil.

UwArc GbR
Ballrechterstr. 3, D-79219 Staufen i. Br.
E-Mail: martin.mainberger@uwarc.de
Web: www.uwarc.de

Wolfgang Ostendorf, Priv.-Doz. Dr. rer. nat.

Limnologisches Institut der Universität Konstanz
Arbeitsgruppe Umweltphysik
Mainaustraße 252, D-78464 Konstanz
E-Mail: wolfgang.ostendorf@uni-konstanz.de
Web: www.limnologie.uni-konstanz.de/ostendorf/

Karl-Otto Rothhaupt, Prof. Dr. rer. nat.

Limnologisches Institut der Universität Konstanz
Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie
Mainaustraße 252, 78464 Konstanz
E-Mail: karl.rothhaupt@uni-konstanz.de
Web: www.limnologie.uni-konstanz.de/rothhaupt/

Ioanna Salvarina, Dr. rer. nat.

Aristotle University of Thessaloniki
Laboratory of Ichthyology, School of Biology
UP Box 134, University Campus, 541 24, Thessaloniki, Greece
E-Mail: iosalvarina@auth.gr ; isalvarina@gmail.com
Web: <http://fishlab.bio.auth.gr/students/post-doc/>

Helmut Schlichtherle, Dr. phil.

Landesamt für Denkmalpflege im Reg.-Präsidium Stuttgart
Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie
Fischersteig 9, 78343 Gaienhofen-Hemmenhofen
E-Mail: helmut.schlichtherle@rps.bwl.de

Geologe mit Schwerpunkt Sedimentologie und Geophysik. Entwickler des Unterwassergeoradars und eines vollautomatischen Multisensor-Gesteins-Scanners (i-rock-reader). Lehrtätigkeit und Forschungsprojekte im Bereich lakustrine und terrestrische Sedimentdynamik, Sequenz-/Zyklostratigraphie, Reservoircharakterisierung und Forensik.

Archäologe mit Schwerpunkt auf Fundstellen in Feuchtgebieten und unter ständiger Wasserbedeckung (Siedlungsarchäologie, Landschaftsarchäologie, Schiffsarchäologie). Forschungstaucher und Ausbilder. Geländearchäologische Arbeiten, Gutachter- und Beratertätigkeit. Technische und wissenschaftliche Expertise im Kontext von Archäologie, Ökologie und Denkmalschutz unter Wasser.

Limnologe mit den fachlichen Schwerpunkten Seeuferökologie, Renaturierungsbiologie, Sedimentologie, Gewässerschutz und Wasserrahmenrichtlinie; Entwickler des HMS-Verfahrens der Seeuferstruktur-Bewertung; aktuelle Forschungen über die Auswirkungen anthropogener Uferstrukturveränderungen und -nutzungen auf die Uferbiozönosen.

Limnologe mit Forschungsinteressen in der Ökologie von litoralen und pelagischen Lebensgemeinschaften von Seen, v. a. des Bodensees (Rolle des Trophiewandels für die Ökologie des Bodensees, Einfluss invasiver Tierarten auf litorale Lebensgemeinschaften). Mitglied nationaler und internationaler Fachverbände sowie im Fachbereich See der Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB).

Biologin mit dem fachlichen Schwerpunkt Hydrobiologie und mit Expertise in den Fachgebieten Makrozoobenthos, stabile Isotopen, Nahrungsökologie, Wasserrahmenrichtlinie und Fledermausökologie. Aktuelle Forschungen über die Beziehung von Fledermausaktivität und Wasserverfügbarkeit und -qualität in Griechenland.

Archäologe mit Schwerpunkt Siedlungsarchäologie und Feuchtbodenarchäologie. Leitung zahlreicher Denkmalpflege- und Forschungsprojekte am Bodensee und in den Feuchtgebieten Oberschwabens. Konzeption und Durchführung von Schutzmaßnahmen in Zusammenarbeit mit Fachbehörden und Organisationen des Natur- und Umweltschutzes, Forschungseinrichtungen sowie Experten der Unterwasser- und Moorarchäologie.

Martin Wessels, Dr. rer. nat.

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
Institut für Seenforschung
Argenweg 50/1, 88085 Langenargen
E-Mail: martin.wessels@lubw.bwl.de
Web: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>

Geologe mit den fachlichen Schwerpunkten Sedimentologie, Limnologie, Seenphysik und Hydroakustik. Ansprechpartner für private und öffentliche Einrichtungen und die Verwaltungsebenen zu sämtlichen wasserwirtschaftlich relevanten Themen.

Klaus van de Weyer, Dr. rer. nat.

Ianaplan GbR
Lobbericher Str. 5, 41334 Nettetal
E-Mail: klaus.vdweyer@ianaplan.de
Web: www.ianaplan.de

Limnologe mit den fachlichen Schwerpunkten Makrophyten, Fließgewässer- und Seeökologie, Entwickler verschiedener Verfahren zur Bewertung von Gewässern anhand von Makrophyten; Gutachter und Sachverständiger für Makrophyten, Buchautor, Taucher, Unterwasserfotograf. Mitglied verschiedener nationaler und internationaler Gremien als Makrophyten-Experte. Gründer der Ianaplan GbR.



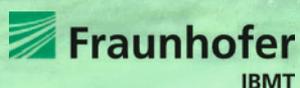
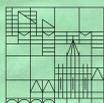
Verbundpartner:

Universität Konstanz, Limnologisches Institut, Arbeitsgruppe Umweltphysik und Arbeitsgruppe Aquatische Ökologie
Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg im Regierungspräsidium Stuttgart, Fachgebiet Feuchtbodenarchäologie
Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik (IBMT), Hauptabteilung Ultraschall
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Institut für Seenforschung (ISF)
Iana•plan Dr. Klaus van de Weyer GbR

Assoziierte Partner:

Regierungspräsidium Tübingen, Referat 53.2 – Gewässer I. Ordnung, Hochwasserschutz Neckar-Bodensee; Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Abteilung Wasserwirtschaft; Landesfischereiverband Baden-Württemberg e.V.; Arbeitsgruppe Bodenseeufer e.V.; Gemeinde Hagnau a.B.; Gemeinde Kressbronn; Landesamt für Umwelt Brandenburg, Referat W26 Gewässerentwicklung; Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege; Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Referat Qualität der Seen; Amt für Archäologie Thurgau.

Universität
Konstanz



Iana•plan