

SCHRIFTEN
DES VEREINS FÜR GESCHICHTE
DES BODENSEES
UND SEINER UMGEBUNG

Sonderdruck aus:

139. Heft 2021



JAN THORBECKE VERLAG

Schriftleitung:

Prof. Dr. Jürgen Klöckler, Konstanz

Internationale Abkürzung: Schrr VG Bodensee

Für den Inhalt der Beiträge und die Abgeltung der Bildrechte tragen alleine die Autorinnen und Autoren die Verantwortung

Alle Rechte vorbehalten

© 2021 Jan Thorbecke Verlag,

Verlagsgruppe Patmos in der Schwabenverlag AG, Ostfildern

www.thorbecke.de

ISBN 978-3-7995-1728-7

Martin Mainberger/Klaus Schmieder

ZUR EROSION DER FLACHWASSER- ZONE DES BODENSEES

Verschafft die Rückkehr von Unterwasserpflanzen
den prähistorischen »Pfahlbauten« eine Atempause?

Als 1979 mit dem Projekt »Bodensee-Oberschwaben« die Pfahlbauforschung unter der Leitung Helmut Schlichtherles neu startete, bildeten die Beobachtungen von Privatsammlern die zunächst vielleicht wichtigste Informationsquelle. Seit der ersten Entdeckung der Pfahlbauten Mitte des 19. Jh. hatten meist aus den Uferdörfern stammende archäologische Laien die Fundstellen aus antiquarischem oder wirtschaftlichem Interesse »ausgebeutet« und dabei umfangreiche, heute in die ganze Welt verteilte Sammlungen zusammengetragen.¹ Inzwischen ist die Unterwasser- und Feuchtbodenarchäologie in der Denkmalpflege Baden-Württembergs fest verankert. Die Sammler kooperieren heute eng mit der staatlichen Denkmalpflege und können als beste Kenner der von ihnen regelmäßig besuchten Fundstellen gelten.

Allerdings sind in letzter Zeit die Silhouetten von Personen in Hüftstiefeln oder Wathosen vom Bild der winterlichen Uferplatten fast vollständig verschwunden. Die Gründe dafür sind sicherlich vielfältig. Befragt man die Sammler selbst, wird aber immer neben veränderten Wetter- und Klimabedingungen das Zuwachsen der Strandplatten mit »Seegras«, also Unterwasserpflanzen (submersen Makrophyten) genannt. Herbert Gieß aus Dingelsdorf war »45 Jahre lang Winter für Winter in den Flachwasserzonen unterwegs. Seit fünf, sechs Jahren finde ich fast nichts mehr«. Die Wysse sei seit seiner Jugend in den 1960er Jahren im Winter »wie freigeputzt« gewesen. Vor allem nach den winterlichen Oststürmen seien die Funde frei an der Oberfläche gelegen. Seit einigen Jahren stürben die Wasserpflanzen nun nicht mehr ab und würden von den Stürmen nicht mehr ans Ufer getragen. Sicht auf den Seeboden und damit Zugriff auf die Funde sei auch im Winter – inzwischen seit sechs Jahren in Folge – in weiten Arealen nicht mehr möglich – so die freundliche Mitteilung von Herbert Gieß vom Januar 2020.

NEUE FORSCHUNGSFRAGEN

Dasselbe Bild ergeben auch die aus den letzten Jahrzehnten vorliegenden Luftbilder. Die ersten archäologisch nutzbaren Luftaufnahmen aus der Flachwasserzone des Bodensees stammen aus den frühen 1980er Jahren und gelangten aus privater Hand in die Ortsakten und das Luftbildarchiv des Landesamtes für Denkmalpflege. Hauptmann a. D. der Bundeswehr Rolf Gensheimer hatte zuvor zahlreiche Fundstellen an Land entdeckt und erkundet. Ab 1981 beflog dann vor allem der Luftbildarchäologe Otto Braasch, ebenfalls ein Bundeswehroffizier im Ruhestand, systematisch archäologische Fundstellen in Baden-Württemberg und lieferte dabei in das 1982 neu entstandene Zentrale Luftbildarchiv des Landesdenkmalamtes auch zahlreiche Aufnahmen von Unterwasserdenkmalen.² Im Zuge der systematischen Befliegung der Bodensee-Flachwasserzonen kam es dabei immer wieder auch zu Neuentdeckungen, so in der Stiegener Enge im westlichen Ausgang des Bodensees.³ In allen Bilddokumenten zeichnen sich die Flachwasserzonen als helle Flächen von der Halde und dem Tiefenwasser ab; Pfahlfelder, Palisadenzüge und Kulturschichten als dunkle Punkte, Reihenmuster und Flächen. Hinweise auf Makrophytenbewuchs finden sich in diesen stets im Winterhalbjahr gewonnenen Bilddokumenten nur gelegentlich und vor allem im Bereich von Strömungen und fließendem Wasser im Seerhein und in der Stiegener Enge. Nach Ausweis der Bilder, die im Luftbildarchiv des Landesamtes für Denkmalpflege in Hemmenhofen am Bodensee durchgesehen werden konnten, veränderten sich diese Verhältnisse bis Mitte der 1990er Jahr nicht wesentlich. Leider gelangten danach nur noch gelegentlich Bilder in die Sammlung, so dass die Entwicklung des letzten Jahrzehnts hieraus nicht unmittelbar nachzuvollziehen ist. Allerdings ist der Bewuchs in der Litoralzone des Bodensees über die letzten 20 Jahre auf diversen, öffentlich zugänglichen Satellitenbildern sowohl in der Hauptvegetationsperiode als auch in den Wintermonaten dokumentiert.⁴

Die Beobachtungen der Privatsammler und der Luftbildarchäologie sind deckungsgleich mit unseren eigenen Erfahrungen in den archäologischen Fundstellen. Vom Landesamt für Denkmalpflege betraut, nahmen wir zunächst als Studierende, später als Archäologen und Forschungstaucher ab 1982 auch Stationen in Angriff, die unter ständiger Wasserbedeckung lagen und nur mit taucherischen Mitteln zu erreichen und archäologisch zu erschließen waren.⁵ Diese Arbeiten fanden stets in den Wintermonaten statt, wenn verhältnismäßig große Sichtweiten und ausbleibender Bootsverkehr beste Dokumentations- und Sicherheitsbedingungen ermöglichten⁶. Der Seeboden war in dieser Zeit immer vegetationsfrei. Dokumentiert sind diese Verhältnisse der 1980er, 1990er und 2000er Jahre auf unzähligen Photographien, die Pfähle und Funde, mobile Decksedimente und blanke Seekreiden, niemals aber submerse Wasserpflanzen zeigen.⁷ In den letzten Jahren fällt nun zunehmend auf, dass ganze Uferabschnitte auch im Winter unter mehr oder weniger dichten Makrophytent Teppichen liegen. Nicht zuletzt wegen der lange am Seeboden hängenden, aus den archäologischen Arbeiten resultierenden Sediment-

fahnen sind Beobachtungsmöglichkeiten vielfach stark erschwert. Andererseits könnte diese Entwicklung auch das Potenzial für eine langfristige, natürliche Sicherung der prähistorischen Kulturschichten in der Litoralzone des Bodensees bilden.

Hieraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

(1) Gibt es einen Zusammenhang der Abnahme der Makrophytenbestände insbesondere der Armelechteralgen aufgrund der ab den 1950er Jahren bis Ende der 1970er Jahre zunehmenden Eutrophierung des Bodensees mit den Erosionsvorgängen in der Flachwasserzone des Bodensees?

(2) Bieten die auf Grundlage der inzwischen wieder oligotrophen Wasserverhältnisse seit Mitte der 1980er Jahre zunehmenden Armelechteralgenbestände heute wieder einen Schutz für die Kulturschichten vor Erosion (insbesondere im Winter bei Niedrigwasser)?

(3) Wenn ja, sind Prognosen für die Zukunft möglich?

(4) Wenn (3) nein, welche Maßnahmen müssten ergriffen werden, um die bislang oft nur punktuellen und qualitativen Beobachtungen zu quantifizieren?

(5) Sind diese Fragen und Entwicklungen auf andere große Voralpenseen anwendbar bzw. übertragbar?

ENTWICKLUNG DER SUBMERSEN MAKROPHYTENVEGETATION IM BODENSEE IM VERGANGENEN JAHRHUNDERT

Erste Dokumente zum Makrophytenbestand am Bodenseeufer datieren zu Anfang des 20. Jh.⁸ Geißbühler⁹ (1938) führte eine Untersuchung der Gesellschaften der höheren Pflanzen und der Tierwelt in der Luxburger Bucht von Romanshorn durch. Jaag¹⁰ (1946) beschrieb die höhere Wasservegetation im Bodensee und detailliert zwischen Kreuzlingen und Ermatingen in den Jahren 1943 und 1944 und gab 1968¹¹ nochmals einen Veränderungsbericht zu den Verhältnissen in den 1940er Jahren. Hierin ist auch ein Vergleich der Vegetationsverhältnisse der Stiegener Enge zwischen Stiegen und Stein a. Rh. in den Jahren 1946 und 1967 mit entsprechenden Kartendarstellungen enthalten. Lang¹² (1967) dokumentierte dann sehr ausführlich die Vegetationsverhältnisse des westlichen Bodenseegebietes und leitete auch 1967 die erste seeumfassende Bestandsaufnahme der Makrophytenvegetation des Bodensees auf der Basis von Luftbildinterpretationen und Geländekartierungen¹³. Diese wurde 1978 methodengleich wiederholt¹⁴. Schmieder¹⁵ leitete 1993 die dritte seeumfassende Bestandsaufnahme der submersen Makrophytenvegetation und gibt mit Co-Autoren auch einen aktuellen, seeumfassenden Überblick über die Vegetationsverhältnisse der Flachwasserzone¹⁶.

Ende der 1970er Jahre wurde der Höhepunkt der Eutrophierungsphase des Bodensees erreicht, verbunden mit drastischen Veränderungen der submersen Makrophytenvegetation der Flachwasserzone¹⁷. Vor allem die Characeenbestände (Abb. 1) gingen stark zurück und wurden durch hochwüchsige Arten wie dem Teichfaden (*Zannichellia palustris*) und dem Kamm-Laichkraut (*Stuckenia pectinata*) ersetzt. Grundsätzlich können beide Vegetationstypen – niedrigwachsende Characeen- und hochwüchsige Laichkrautbestände – die Scherspannung von Wellen, welche zur Erosion von Sedimenten führt, reduzieren¹⁸. Während letztere aber nur eine kurze Vegetationsperiode haben und teilweise bereits im Sommer die Sprosse schon absterben, können Characeen bis weit in den Winter hinein und teilweise sogar über die ganze Winterperiode wachsen und so diese Erosionsschutzfunktion weitaus länger ausüben. Die Überwinterung von Characeen wurde Mitte des 20. Jh. bereits von Jaag¹⁹ dokumentiert. Nach seinen Angaben überwinterten im Strömungsbereich auch Schweizer Laichkraut (*Potamogeton helveticus*), Krauses Laichkraut (*Potamogeton crispus*), Dichtes Laichkraut (*Groenlandia densa*) und die Kanadische Wasserpistie (*Elodea canadensis*). Dagegen berichtet Geißbühler²⁰ (1938) von der Luxburger Bucht im Obersee, dass Herbst- und Winterstürme die Wasse von allen pflanzlichen Bewohnern leerfegen. Auch Herbivorie winterastender Wasservögel kann die Bestände von Characeen bis zu bestimmten Wassertiefen stark dezimieren.²¹ Am Bodensee ist ein enger Zusammenhang zwischen dem Vorkommen von Characeen und der Anzahl winterastender Kolbenenten (*Netta rufina*), für welche Characeen die Hauptnahrungsquelle während der Zugzeit darstellen, dokumentiert.²²

Seit Ende der 1980er Jahre zeitigten die Bemühungen der Anrainerländer des Bodensees zur Gewässerreinigung erste Erfolge, die Characeen-Bestände erholten sich v. a. im Untersee²³ und hatten bis 1993 bereits weite Teile der Flachwasserzone des gesamten Sees wieder besiedelt.²⁴ Allerdings starben die Bestände in diesem Zeitraum über den Winter komplett ab und besiedelten als typische Pionierarten mit unzähligen Diasporen²⁵



Abb. 1: Characeen-Bestände am Nordufer der Insel Reichenau. Im Vordergrund *Chara aspera* (Foto: K. Schmieder)

die Flachwasserzone jährlich neu. Schmieder et al.²⁶ (2006) dokumentierte 2005 erste wieder überwinterte Characeen-Bestände am Südufer des Zellersees. Zur Dominanz gelangten die Characeen dann Anfang des neuen Jahrtausends und der Trend setzte sich unvermindert fort²⁷. Auch Wiederfunde von über Jahrzehnte verschollenen Armleuchteralgenarten gelangen Anfang des 21. Jh.²⁸ Dies ist aufgrund der Fähigkeit der Characeendiasporen, ihre Keimfähigkeit über viele Jahrzehnte zu erhalten,²⁹ möglich. Auch wenn diese durch Sedimentbildungsprozesse im Litoral in tieferen Sedimentschichten konserviert liegen, können sie durch flächige Erosionsprozesse bei Starkwindereignissen oder durch punktuelle Störungen mit Bootsankern wieder an die Oberfläche befördert werden und bei adäquaten Keimbedingungen sich wieder ansiedeln. Zudem können sich die sehr leichten Diasporen bei lateralen Sedimenttransportvorgängen im Litoral leicht ausbreiten. Auch Wasservögel können zur großräumigeren Verbreitung von Diasporen beitragen.³⁰

Gut dokumentierte Beispiele sind überdies aus dem Konstanzer Trichter bekannt, in dem noch in den 1990er und 2000er Jahren eindrucksvolle Luftbilder freiliegender Seekreidebänke entstanden (vgl. auch Abb. 2). Inzwischen sind die entsprechenden Areale dicht mit Characeen v. a. *C. globularis* und *C. contraria* (Petershauser Ufer) bewachsen, oder werden zunehmend von Laichkräutern (*Potamogeton helveticus*, *S. pectinata*, *P. perfoliatus*, (Konstanz-Frauenpfahl) besiedelt.³¹

EROSION IN DEN FLACHWASSERZONEN DES BODENSEES

Die ältesten Daten zu prähistorischen Seeufersiedlungen am Bodensee liegen mit absoluten Datierungen am Anfang des 4. vorchristlichen Jahrtausends. Sie sind also

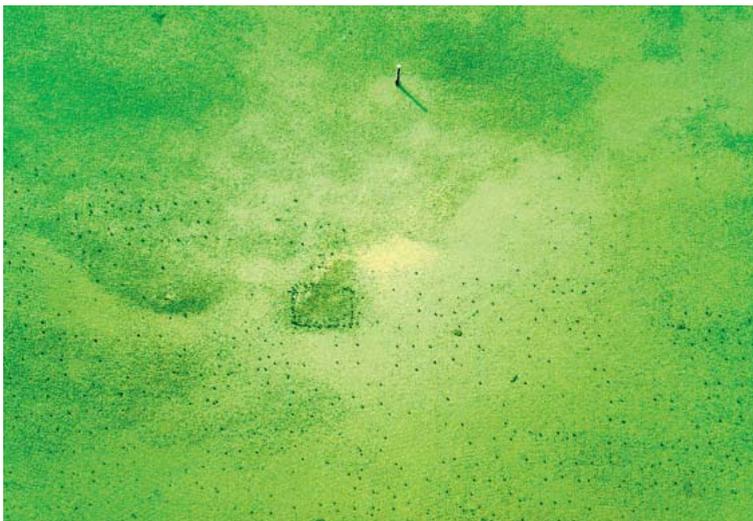


Abb. 2: Blick auf das Pfahlfeld von Hinterhausen I, Konstanzer Trichter, vom 7. März 1991. Die dunklen Punkte und Punktreihen bezeichnen prähistorische Hausfundamente. Das Rechteck in der Bildmitte datiert nach Holzartenzusammensetzung und Bauart in die jüngere Vergangenheit – es handelt sich wohl um Einrichtungen der Fischereiwirtschaft (Luftbild: Otto Braasch)

sechs Jahrtausende, eingebettet und geschützt von limnischen Seesedimenten, erhalten geblieben. Die Tatsache, dass sie in unserer Zeit an die Oberfläche treten, hat die staatliche Denkmalpflege von den frühen 1980er Jahren an intensiv beschäftigt. Es wurde schnell deutlich, dass in vielen Fällen das schützende Sedimentbett aus limnischen See-kreiden bereits stark reduziert ist und die wissenschaftlich außerordentlich wertvollen organischen Kulturschichten vielerorts massiven Verlusten durch wasserbauliche Eingriffe, aber auch schleichende Erosionsvorgänge ausgesetzt waren.³² Als unübersehbar wurde, dass die denkmalpflegerischen Rettungsmaßnahmen mit der Dynamik und Geschwindigkeit der Zerstörungen nicht Schritt halten konnten, begann das Landesdenkmalamt mit der Ausweisung von Reservaten und ließ ausgewählte Fundstellen teilweise oder ganz mit Geotextilien oder Kies abdecken³³. Im Gefolge des internationalen Projektes »Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee«³⁴ und auch im Zusammenhang mit der Anerkennung der »Prähistorischen Pfahlbauten um die Alpen« als seri-elles transnationales UNESCO-Welterbe³⁵ werden die südwestdeutschen »Pfahlbauten« seit 2011 systematisch im Rahmen von Managementplänen überwacht.

Hierbei geht es auch um ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Wirkungsketten.³⁶ Als Hauptursache für die Flächenerosion wird eine hohe Erosionsdynamik in den Flachwasser- und Uferzonen angenommen, wobei im Fall des Bodensees im Hintergrund Hafengebaggerungen, Einbauten wie Rohrleitungen, die Verbauung der Ufer sowie zunehmender Wellenschlag durch die Freizeitschiffahrt im Hintergrund stehen.³⁷ In manchen Fällen ließen sie sich auch mit Vegetationsveränderungen in Verbindung bringen. Eine große Rolle wurde insbesondere dem erstmals Mitte der 1960er Jahre einsetzenden großflächigen Rückgang der Uferrohrichte³⁸ zugewiesen.³⁹ Der Einfluss submerser Makrophyten floss in die Diskussion hingegen erst in jüngster Zeit ein⁴⁰. Im Hintergrund standen vor allem systematische Beobachtungen zum Verhältnis von Wasserqualität und Trophiegrad einerseits und Dichte und zeitliche Ausdehnung der submersen Vegetation andererseits.⁴¹ Wahl (2017) entdeckte eine Veränderung der Seespiegeldifferenzen im vergangenen Jahrzehnt zwischen Obersee und Untersee und vermutete einen Zusammenhang mit der Entwicklung submerser Makrophyten⁴². Danach führt der »Krautstau« durch das wintergrüne Schweizer Laichkraut (*Potamogeton helveticus*) zu einer Seespiegelanhebung des Obersees gegenüber dem Untersee um ca. 30 cm. Zuletzt haben die Makrophyten in Bezug auf Ursachen und Wirkungen von Erosion in der Flachwasserzone sowie mögliche Gegenmaßnahmen aber nur noch eine marginale Rolle gespielt.⁴³

BEOBACHTUNGEN IM KONSTANZER TRICHTER UND AN DER HORNSPITZE DER HALBINSEL HÖRI

Die prähistorischen Seeufersiedlungen in der Flachwasserzone bei Konstanz (einen Überblick gaben zuletzt Dieckmann et al. 2018)⁴⁴ gehörten zu den ersten, die im

Rahmen des 2011 neu aufgelegten Monitoringprogrammes des Landesamtes für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart angegangen wurden. Erste Bestandsaufnahme- und Monitoringarbeiten wurden in der Fundstelle »Konstanz-Hinterhausen I« durchgeführt, die stellvertretend für die Konstanzer Pfahlbauten als Teil der Welterbestätte ausgewiesen worden war. Parallel erfolgten jeweils in den Wintermonaten weitere Untersuchungen in »Konstanz-Frauenpfahl« und »Konstanz-Hinterhausen II«⁴⁵. Die seit langem bekannten stein- und bronzezeitlichen Fundstellen »Konstanz-Rauenegg« und »Dominikanerkloster« sind heute ebenso wie ein weit landwärts, im Bereich des »LAGO-Einkaufszentrums« liegendes sowie ein Pfahlfeld im Bereich der Otto-Raggenbass-Straße⁴⁶ überbaut und unzugänglich. 2018 wurden die archäologischen Arbeiten im Konstanzer Trichter vorläufig abgeschlossen. Nachfolgend werden die Entwicklungen in den Unterwasserfundstellen kursorisch beschrieben.

KONSTANZ-HINTERHAUSEN I

Die Fundstelle Konstanz-Hinterhausen I wurde bereits 1859 entdeckt⁴⁷ und gehört somit zu den ältesten Nachweisen prähistorischer Seeufersiedlungen am Bodensee. Sie wurde archäologisch vor allem durch ein umfangreiches Arsenal an Steingeräten bekannt.⁴⁸ Luftbilder von 1991 zeigen ein sehr strukturiertes Pfahlfeld, in dem man in Einzelfällen einzelne Hausgrundrisse zu erkennen meint (Abb. 2). Die unterwasserarchäologische Aufnahme der Station erbrachte dann ab 2011 ein Pfahlfeld, das sich vom heutigen, durch eine »Renaturierungsmaßnahme« umgeformten Ufer etwa 80 m weit in die Flachwasserzone erstreckt und bei 400 m Länge eine Fläche von 165 a einnimmt. Die Pfähle waren zu diesem Zeitpunkt bis etwa 30 cm vom Seeboden exponiert, was vor allem bei nicht aus Eiche bestehenden Laubholzpfählen als deutlicher Hinweis auf nicht allzu lange – d. h. einige Jahre, maximal Jahrzehnte zurückliegende Freistellungsprozesse – gewertet werden muss. Weitere deutliche Anhaltspunkte auf zurückliegende Erosionsvorgänge lieferten bis auf die Spitzen reduzierte Pfähle in Ufernähe. Erste Auswertungen geben zu erkennen, dass im Pfahlfeld mit die ältesten Daten, die wir von prähistorischen Pfahlbauten des Bodensees kennen, enthalten sind.⁴⁹ Um die zugrundeliegenden Prozesse in Zukunft quantitativ beobachten und bewerten zu können, wurde in die Fundstelle ein aus 20 Punkten bestehendes Messpunkt- und Erosionsmarkernetz eingebracht.

Im Zuge der ersten Bestandsaufnahme, die wir in den Frühjahrsmonaten 2011 und 2012 vornahmen, hatten wir nahezu in der gesamten Station einen schütterten Characeenbewuchs angetroffen. Die Kartierungen, Notizen und Photographien zeigen neben flächigen Teppichen überwinterter Pflanzen allerdings immer wieder auch freiliegende Seekreiden und unbewachsene Geröllriegel an. Die archäologischen Arbeiten in den Folgejahren konzentrierten sich dann jeweils auf einzelne Untersuchungstreifen, sodass systematische Beobachtungen zur gesamten Fläche erst wieder im Herbst 2019 gewonnen werden konnten. Der Characeenbewuchs war jetzt so stark, dass ein Auffinden der Erosionsmarker sich ohne Einsatz eines RTK-GPS Gerätes, das zentimetergenaues Ab-

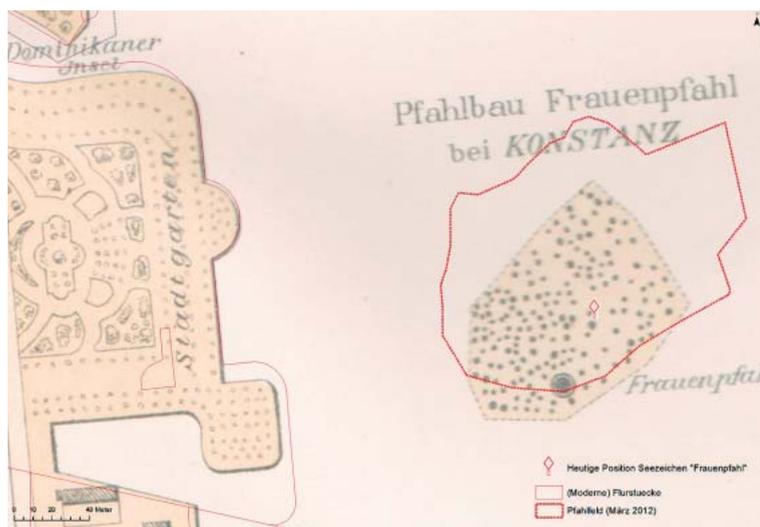
stecken gesuchter Punkte ermöglicht, sehr mühsam blieb. Insgesamt elf abgelesene Punkte ergaben dann in einem Fall einen Sedimentabtrag von einem Zentimeter, in allen anderen Fällen Zuwächse von Sediment. In mehreren Fällen war der ursprünglich fünf Zentimeter über den Seeboden aufragende Marker vollständig verschüttet.

Dass dies kein Zufallsergebnis, etwa nach einem Sturmereignis ist, zeigen deutlich Satellitenaufnahmen, die für einige Jahre ab 2006 öffentlich zugänglich sind.⁵⁰ Die Winterbilder des Jahres 2012 weisen mit einem lückigen Characeen-Bestand eine gute Übereinstimmung mit unseren Kartierungen auf. Ab 2018 scheinen die Characeen das gesamte Areal des Pfahlfeldes in Beschlag genommen zu haben; im tieferen Wasser erscheinen jetzt größere Flecken mit höheren Pflanzen (*Potamogeton helveticus*?), die sich im Jahr 2019 noch einmal vergrößern und verstärken.

KONSTANZ-FRAUENPFAHL

Die Fundstelle »Konstanz-Frauenpfahl« wurde ebenfalls bereits im 19. Jahrhundert von dem Konstanzener Apotheker, Stadtrat und Gelehrten Ludwig Leiner entdeckt. Aus dem ein gutes Stück abseits des Ufers im freien Wasser vor dem Konstanzener Hafen gelegenen Pfahlfeld (Abb. 3) sind vor allem bronzezeitliche, aber auch neolithische Materialien bekannt. Aus dendrochronologischen Datierungen liegen Schlagdaten von der Wende des 2. zum 1. vorchristlichen Jahrtausends vor⁵¹. Die nur mithilfe eines Wasserfahrzeugs zu erreichenden Fundstelle wurde 1982 erstmals archäologisch betachtet; schon damals wiesen bis 2,5 m hoch aufragende, nur noch mit ihren Spitzen verankerte eichene Pfähle auf eine große Dynamik der Erosion hin.⁵² Diese Beobachtungen bestätigte sich im Zuge einer ersten systematischen Bestandsaufnahme der Station, die 2011 begonnen und nach einigen Unterbrechungen 2018 abgeschlossen wurde.⁵³ Schon der Vergleich der Aufmessung Leiners⁵⁴ mit den heutigen Verhältnissen lässt erkennen, dass das Pfahlfeld heute wesentlich größer ist als im 19. Jahrhundert. Leiner hatte ein Areal

Abb. 3: Ludwig Leiners Aufmessung der Fundstelle am Frauenpfahl von 1882. Das heute freiliegende Pfahlfeld (Stand 2012) erscheint nach Norden und Osten verschoben. Das Seezeichen »Frauenpfahl« wurde in der Zeit zwischen 1876 und heute mehrfach versetzt.



von »118 Aren« ermittelt; heute nimmt das Pfahlfeld mit etwa 16800 qm oder 168 a eine wesentlich größere Fläche ein. Selbst wenn man bei aus dem 19. Jh. stammenden Vermessungen mit erheblichen Unsicherheiten zu rechnen hat, ist doch deutlich erkennbar, dass heute wesentlich größere Teile vor allem im Süden und im Osten freiliegen (Abb. 3)⁵⁵. Der Umfang der Geländeänderungen der letzten dreißig Jahre wird im Vergleich von Tiefen-Vermessungsdaten deutlich. Aus zurückliegenden Zeiträumen liegen Daten von 1987, 1990 und 2001 vor (Vermessungsbüro Egle, über die Aufnahmetechnik ist nichts bekannt; Internationale Bodenseetiefenvermessung der IGKB 1990; bathymetrische Vermessung Institut für Seenforschung). Vergleicht man diese Daten mit den 2015 erhobenen Daten des »Tiefenschärfe«-Projektes der LUBW⁵⁶ wird deutlich, dass die Tiefenwerte vor allem im südlichen Bereich der Fundstelle stark zugenommen haben. Hier lassen sich innerhalb des Beobachtungszeitraums – in Übereinstimmung mit den Einzelbeobachtungen von 1982 – an manchen Stellen Abträge in der Größenordnung von einem Meter feststellen (Abb. 4). Im Hintergrund dieser Veränderungen stehen wohl nicht nur der zunehmende Wasserverkehr, sondern bereits längere Zeit zurückreichende hydrologische Verschiebungen im Bereich der Abflussschwelle des Obersees in den Konstanzer Seerhein und den Untersee. Diese sind vor allem mit der Verengung des Ausflusses durch das Vorrücken der Stadt Konstanz in die Flachwasserzone seit dem Mittelalter in Verbindung zu bringen⁵⁷.

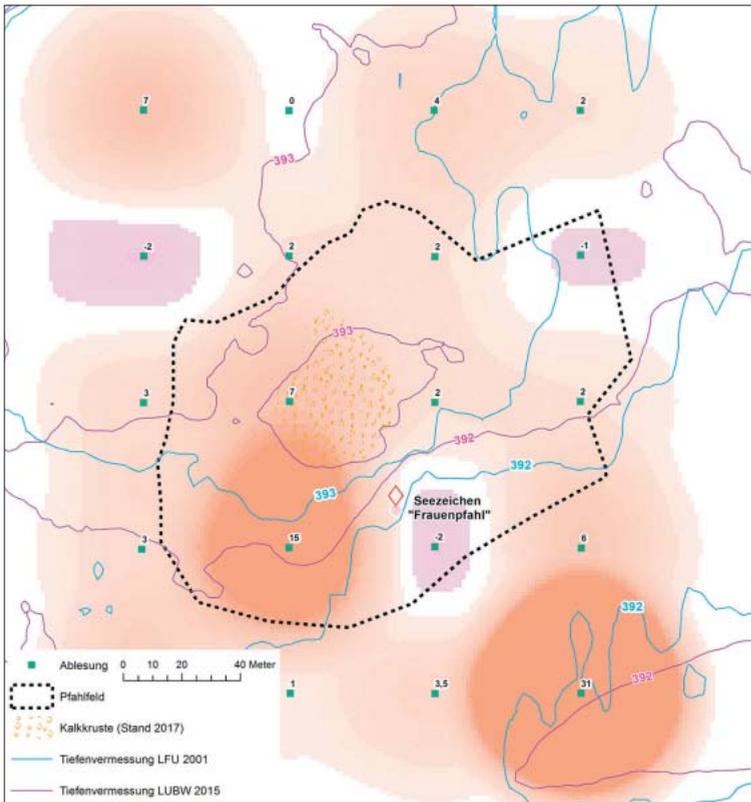


Abb. 4: Die Fundstelle Konstanz-Frauenpfahl mit den bathymetrischen Verhältnissen 2001 und 2015. Unweit nördlich des Frauenpfahls berühren sich die 393er Isohypse aus 2001 und die 392er Isohypse aus der Messung für 2015. Die Ergebnisse der Ablesung der Erosionsmarker im Winter sind lila (Sedimentabträge) und orange (Sedimentaufträge) dargestellt.

Als wichtige Voraussetzung für die archäologische Erfassung der Fundstelle und zugleich zur langfristigen Kontrolle von Erosionsvorgängen hatten wir 2012 auch hier ein aus 20 Eichenpflocken⁵⁸ zusammengesetztes Messraster vermarktet. Nach den Vorgängen der Vergangenheit war damit zu rechnen, dass diese Erosionsmarker bereits nach wenigen Jahren deutlich freierodiert sein würden. Umso größer war die Überraschung, als wir Herbst 2018 eine erste vollständige Kontrolle der Marker vornahmen (Abb. 4). Nur drei der Marker zeigten Sedimentabträge an, die mit ein bis zwei Zentimeter äußerst gering blieben. Die übrigen Marker wiesen Sedimentaufträge von mehreren Zentimetern auf; in einem Fall wurde eine Sedimentbedeckung von 26 Zentimeter gemessen. Oberflächen mit leichten Sanden und Muschelbruch, wie wir sie bei früheren Kampagnen angetroffen hatten, blieben dabei die Ausnahme. Große Flächen der Fundstelle sind heute von Muscheln – vermutlich der Quagga-Muschel – besiedelt, die stellenweise bis fünf Zentimeter mächtige, lebende Krusten bilden.

Völlig unerwartet waren zugleich die Veränderungen bei der Unterwasservegetation. 2012 waren im südöstlichen Bereich der Fundstelle flächige Characeen-Bestände kartiert worden (Abb. 5). 2019 war dieser Bestand fast vollständig verschwunden. Große Flächen im Osten der Fundstelle sind heute von bis fast an die Wasseroberfläche aufwachsende Wasserpflanzen, bei denen es sich wohl um *Potamogeton helveticus* handelt⁵⁹ eingenommen. Stichproben ergaben, dass pro Quadratmeter mit hunderten von Einzelsprossen zu rechnen ist. An der Gewässersohle in diesen Beständen kommt die Strömung, die in Richtung Norden stark zunimmt, fast vollständig zum Erliegen.

Abb. 5: Das Erosionsmarkernetz in der Fundstelle am Frauenpfahl mit Beobachtungen zur Makrophytenbedeckung. Das bathymetrische Modell beruht auf den Ergebnissen des »Tiefenschärfe«-Projektes der LUBW 2015; eingetragen sind Isohypsen der Vermessungen von 2001 und 2015.



DIE HORNSPITZE DER HALBINSEL HÖRI

Nach Voruntersuchungen in den 1970er Jahren bildete die Spitze der Halbinsel Höri im Bodensee-Untersee seit Anfang der 1980er Jahre einen Schwerpunkt denkmalpflegerischer und unterwasserarchäologischer Untersuchungen.⁶⁰ Bei den großflächigen Untersuchungen, die im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogrammes in der Fundstelle »Hörnle I« durchgeführt wurden, handelt es sich um die bislang umfangreichste und bedeutendste Forschungsgrabung im südwestdeutschen Alpenvorland. Im Hintergrund standen allerdings auch drängende denkmalpflegerische Anliegen. Tempo und Dynamik der Flächenerosion im Ufer- und Flachwasserbereich ließen erkennen, dass die Fundstelle massiv von Flächenerosion betroffen war und binnen kurzer Zeit verloren zu gehen drohte⁶¹.

Der Beginn des Zerstörungsprozesses lässt sich in Hornstaad auf die 1930er Jahre datieren. Zu einem deutlichen Schub der Erosionsprozesse kam es in engem zeitlichen Zusammenhang mit dem Schilfsterben der 1960er Jahre, aus dem eine landwärtige Verlagerung der Strandwälle, Abspülung der limnischen Deckschichten und schließlich großflächige Freilegung von Pfahlfeld und Kulturschichten resultierte.⁶² Die Flachwasserzone war in den 1970er und 1980er Jahren vom Ufer bis zur Halde im Sommer mit submersen Makrophyten – genannt werden *Chara* spp. und *Najas* spp. – bewachsen, im Winter aber vegetationsfrei.⁶³ Auf Luftbildern aus dieser Zeit sind die charakteristischen Wälle aus am Winterufer angespülten Makrophyten zu erkennen.⁶⁴ Noch im Winter 1991 war die Hornspitze vollkommen vegetationsfrei (Abb. 6). Auf Satellitenbildern vom 1. Januar 2010⁶⁵ ist dagegen wieder ein flächendeckender Bewuchs zu erkennen.

Das Areal im Umfeld von Hörnle I ist heute flächig mit Kieseinbauten überschüttet. Erosionmarker befinden sich aber in einer senkrecht zum Ufer angelegten Linie in der unmittelbar benachbarte Fundstelle Hörnle III. Die beiden seewärtigen Marker wiesen bei ihrer Kontrolle im Februar 2020 geringe Sedimentzuwächse bzw. keine Veränderungen auf. Die beiden landwärtigen Marker waren hingegen trotz präziser Absteckun-



Abb. 6: Luftbild von der Hornspitze der Halbinsel Höri, Untersee, vom 8. März 1991. Oben rechts im Bild einige wenige Flecken submerser Makrophyten (Luftbild: Otto Braasch)

gen mit RTK-GPS nicht mehr aufzufinden. Da die Fundstelle innerhalb eines für den Wasser- und Personenverkehr gesperrten Naturschutzgebietes liegt⁶⁶ erscheint unwahrscheinlich, dass die Marker – hier handelte es sich um Messketten – wie an anderer Stelle geschehen, von Badenden entfernt oder durch Ankervorgänge verloren gegangen sind. Wahrscheinlicher ist, dass sie von Sediment verschüttet liegen.

AUSBLICK

Zusammenfassend kann auf der Grundlage dieser Einzelbeobachtungen zunächst festgehalten werden, dass es einen deutlichen zeitlichen Zusammenhang des Rückganges submerser Makrophyten, vor allem überwinternder Characeen-Bestände, und dem Auftreten von Flächenerosion in der Flachwasserzone des Bodensees gibt. Es ist dabei evident, dass im Hintergrund des Makrophytenrückganges vor allem Veränderungen im Trophiegrad des Wassers und damit einhergehende Schwankungen in der Lichtdurchlässigkeit des Wassers stehen.⁶⁷ Die Entdeckung der prähistorischen Pfahlbauten bereits in der Mitte des 19. Jh., also lange vor dem Beginn der massiven Eutrophierung des Bodensees, sowie weitere Berichte aus der ersten Hälfte des 20. Jh. belegen dabei, dass der Grad der Pflanzenbedeckung nur ein Faktor in wahrscheinlich vielfach verwobenen und mit Rückkoppelungseffekten verbundenen Wirkungsketten darstellt.

Zugleich mehren sich Hinweise, dass die Rückkehr der submersen Makrophyten – vor allem der Characeen – in das Eulitoral des Bodensees die Beweglichkeit von Leichtsedimenten und damit den Stoffhaushalt als Ganzes stabilisiert. Unterstützt werden unsere Beobachtungen vom westlichen Bodensee durch zeitlich hochaufgelöste Messungen im östlichen Bodenseeraum.⁶⁸ Wie unsere Untersuchungen im Konstanzer Trichter und vom Untersee zeigen, könnte dies für manche prähistorische Fundstelle, die über Jahrzehnte dramatischen Substanzverlusten ausgesetzt waren, zumindest eine Atempause verschaffen.

Prognosen für die Zukunft sind auf Grundlage unserer Daten allerdings noch nicht möglich. Für den Beobachtungszeitraum von 1888 bis 2007 war eine Abnahme der Obersee-Wasserstände beobachtet worden.⁶⁹ Ob sich diese Tendenz fortsetzen wird, ist anhand der Beobachtungen der LUBW⁷⁰ allerdings fraglich. Auch wie sich dynamisch verändernde globale Rahmenbedingungen – Zunahme der Luft- und Wassertemperaturen, Zunahme von extremen Wetterereignissen – auf den Bodensee und im Speziellen auf die Unterwasserdenkmale auswirken werden, ist gegenwärtig noch weitgehend offen. Dasselbe gilt für die aktuelle Massenausbreitung von Neozoen wie der Quagga-Muschel.⁷¹ Zudem ist festzuhalten, dass unsere Untersuchungen, gemessen an der großen Anzahl von Fundstellen noch sehr anekdotisch bleiben. Alleine die prähistorischen Seeufersiedlungen Baden-Württembergs summieren sich am Bodensee zu über hundert Fundstellen.⁷² Dazu kommen am ganzen See zahlreiche Unterwasserdenkmale aus historischer

Zeit. Für einen Großteil dieser Fundstellen gibt es zu einer Entwarnung keinerlei Anlass. Submerse Makrophyten stellen im System Flachwasserzone einen Faktor von vielen dar. Wie fatal Eingriffe wie Baggerungen, Steg- oder Hafenbauten⁷³, übersteilte künstliche Ufer⁷⁴ und Schiffsbetrieb⁷⁵) zusammenwirken können, lässt sich etwa am Beispiel der altberühmten stein- und bronzezeitlichen Fundstelle und Teil des UNESCO-Welterbes Sipplingen-Osthafen zeigen. Besonders im Umfeld des Hafens gibt es weiterhin deutliche Hinweise auf erosive Sedimentabträge (Abb. 7).

Einen Lichtblick in Bezug auf Erosionsvorgänge archäologischer Fundstellen in der Flachwasserzone des Bodensees stellen die hier vorgestellten Daten und Beobachtungen dennoch dar. Die Denkmalpflege in Baden-Württemberg musste in der Vergangenheit, ebenso wie das Amt für Archäologie Thurgau erhebliche Mittel aufwenden, um auch nur die denkmalpflegerisch dringlichsten Problemfälle mit massiven Kiesabdeckungen zu schützen. Die Langzeitwirkung dieser Maßnahmen ist indes weitgehend unerforscht, sodass auch die Schüttungen selbst in engem Zeitraster beobachtet werden müssen – nicht zuletzt auch in ihren Auswirkungen auf die Unterwasservegetation. Die bisherigen Untersuchungen ergeben ein noch recht uneinheitliches Bild⁷⁶. Falls die Rückkehr der überwinterten Makrophytenbestände auch nur einen Teil der Unterwasserdenkmale besser schützen oder das Zusammenwirken niedriger Wasserstände, Wind- und Schiffswellen abfedern könnten, wäre schon viel gewonnen.

Zum besseren Verständnis der Wirkungsketten müsste allerdings die Datenbasis und Informationsdichte erheblich erweitert werden. Zunächst wäre eine systematische Durchsicht historischer Luft- und Satellitenbilder hilfreich. Diese liegen in großer Anzahl und weitgehend unerschlossen in Militärarchiven und bei Kampfmittelbeseitigungsdiensten, bei kommerziellen Satellitenbetreibern, aber auch in Ortsarchiven und Gemeindeverwaltungen vor. Mithilfe bereits entwickelter Bildgebungsverfahren kann



Abb. 7: Freigespültes Pfahlfeld in Sipplingen (Areal östlich des Osthafens). Die Pfähle sind im März 2020 dicht mit Muscheln besetzt. (Foto: M. Mainberger)

auf Grundlage dieser Daten ein Vegetationsindex die Veränderungen des Bewuchses im hier besonders relevanten Winterhalbjahr in den vergangenen Jahrzehnten dokumentieren.⁷⁷ In einem weiteren Schritt könnte dann der aktuelle Bewuchs der Flachwasserzone seeumfassend sowohl im Sommer als auch im ausgehenden Winter mittels moderner Fernerkundungsmethoden quantifiziert werden. Eine solche Bestandskarte wäre ein wertvolles Instrument zur Beurteilung aktueller Erhaltungszustände, und eingeschränkt auch zukünftiger Entwicklungen. Es besteht kein Zweifel, dass solche Schritte aus methodischer, aber auch praktischer denkmalpflegerischer Sicht Bedeutung weit über den Bodensee hinaus hätten. Dass der zweitgrößte See Mitteleuropas kein Einzelfall ist, zeigen Befunde etwa aus dem Bielersee⁷⁸. Allerdings kann die eingangs gestellte Frage der Übertragbarkeit der hier vorgestellten Befunde auf andere nördliche, präalpine Seen hier nur unzureichend beantwortet werden. Praktisch alle dieser Seen durchliefen ähnlich wie der Bodensee eine Phase rasanter Eutrophierung in den 1960er und 1970er Jahren und eine daran anschließende Re-Oligotropierungsphase.⁷⁹ Nur wenige der Schweizer Seen⁸⁰ – etwa der Walensee – erreichten in der Re-Oligotropierung dem Bodensee vergleichbare Phosphorkonzentrationen. Dabei lässt aber die spezielle Morphologie des Walensees, mit nur geringen Anteilen an Flachwasserzonen, bezüglich der hier diskutierten Fragen kaum einen Vergleich zu. Andere Schweizer Seen mit dem Bodensee vergleichbaren Flachwasserzonen, wie der Genfer See und der Bieler See, befinden sich danach aktuell noch in einem mesotrophen Zustand, so dass bezüglich der Entwicklung der Makrophytenvegetation die Verhältnisse folglich sehr unterschiedlich sind. Neuere Erhebungen zu den submersen Makrophyten dieser Seen fehlen allerdings. Insofern nimmt der Bodensee hier eine Vorreiterstellung ein.

Anschriften der Verfasser:

Dr. Martin Mainberger, UwArc, Ballrechterstr 3, D-79219 Staufen i. Br.,

martin.mainberger@uwarc.de

Prof. Dr. Klaus Schmieder, Universität Hohenheim, Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie, FG Landschaftsökologie und Vegetationskunde 320 A,

August-von-Hartmann Str. 3, D-70599 Stuttgart,

Klaus.Schmieder@uni-hohenheim.de

ANMERKUNGEN

1 SCHLICHOTHERLE, Helmut: Die Sondagen 1973–1978 in den Ufersiedlungen Hornstaad-Hörnle I. Befunde und Funde zum frühen Jungneolithikum am westlichen Bodensee (Siedlungsarchäologie im Alpenvorland I. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 36) Stuttgart

1990, S. 24. – SCHÖBEL, Gunter: Die Spätbronzezeit am nordwestlichen Bodensee. Taucharchäologische Untersuchungen in Hagnau und Unteruhldingen 1982–1989 (Siedlungsarchäologie im Alpenvorland IV Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühge-

- schichte in Baden-Württemberg 47) Stuttgart 1996, S. 13.
- 2 PLANCK, Dieter: Luftbildarchäologie in Baden-Württemberg, in: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 12 (1983) S. 1–7.
- 3 MAINBERGER, Martin/SCHNYDER, Matthias: Monitoring im Grenzbereich: Fallbeispiel Orkopf (Eschenz TG/Öhningen-Stiegen BW), in: Hansjörg Brem/Beat Eberschweiler/Gerhard Grabher/Helmut Schlichtherle/Gerd Schröder (Hg.): Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms »Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein« zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser, Bregenz 2013, S. 237.
- 4 (Google Earth; letzter Abruf 4.2.2020)
- 5 BILLAMBOZ, André/SCHLICHTHERLE, Helmut: Moor- und Seeufersiedlungen. Die Sondagen 1981 des Projekts Bodensee-Oberschwaben, in: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 1981 (1982) S. 36–50. – KOLB, Martin/KÖNINGER, Joachim/SCHÖBEL, Gunter: Taucharchäologie am Bodensee, Kreis Konstanz und Bodenseekreis, in: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 1983 (1984) S. 45–50.
- 6 SCHLICHTHERLE, Helmut/WAHLSTER, Barbara: Archäologie in Seen und Mooren. Den Pfahlbauten auf der Spur, Stuttgart 1986, S. 30.
- 7 Vgl. z. B. SCHÖBEL (wie Anm. 1) Abb. 28–32. – KOLB, Martin: Funde und Befunde aus den taucharchäologischen Ausgrabungen in den Schichten 7, 8 und 9 von Sipplingen-Osthafen. Siedlungen der Pfynner Kultur im Osthafen von Sipplingen, Bodenseekreis (Hemmenhofener Skripte 4) Hemmenhofen 2003, Abb. 17. – KÖNINGER, Joachim: Die frühbronzezeitlichen Ufersiedlungen von Bodman-Schachen I – Befunde und Funde aus den Tauchsondagen 1982–1984 und 1986 (Siedlungsarchäologie im Alpenvorland VIII) Stuttgart 2006, Abb. 25–26.
- 8 SCHRÖTER, Carl/KIRCHNER, Emil Otto Oskar: Die Vegetation des Bodensees, in: Schrr VG Bodensee 31 (1902) S. 1–86. – BAUMANN, Erich: Die Vegetation des Untersees (Bodensee). Archiv für Hydrobiologie, Supplement, Band 1 (1911) S. 1–554.
- 9 GEISSBÜHLER, Jakob: Beiträge zur Kenntnis der Uferbiozönosen des Bodensees, in: Mitt. Thurg. Naturf. Ges. 31 (1938) S. 3–38.
- 10 JAAG, Otto: Die höhere Wasservegetation, in: Untersuchungen zur Abklärung hydrologischer Fragen der Bodenseeregulierung. Gutachten, vervielfältigtes Manuskript (1946) S. 10–110.
- 11 JAAG, Otto: Höhere Wasservegetation, Ergänzungsbericht zum Gutachten 1946, in: Bodenseeregulierung, Abklärung hydrobiologischer Fragen (1968) ETH Zürich, S. 3–37.
- 12 LANG, Gerhard: Die Ufervegetation des westlichen Bodensees, in: Arch. Hydrobiol. Suppl. 32 (4) (1968) S. 437–574.
- 13 LANG, Gerhard: Die Makrophyten in der Uferzone des Bodensees unter besonderer Berücksichtigung ihres Zeigerwertes für den Gütezustand, in: Ber. Internat. Gewässerschutzkomm. Bodensee (IGKB) 12 (1973) 67 S.
- 14 LANG, Gerhard: Die submersen Makrophyten des Bodensees – 1978 im Vergleich mit 1967, in: Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee (IGKB) 26 (1981) 64 S.
- 15 SCHMIEDER, Klaus: Submersen Makrophyten der Litoralzone des Bodensees 1993 im Vergleich mit 1978 und 1967 in: Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee (IGKB) 46 (1998) 171 S.
- 16 SCHMIEDER, Klaus/MURPHY, Fionn/DIENST, Michael/STRANG, Irene/BOY, Eva/SANNY, Mona-Lisa/JANKE, Margaret Louise/ULMA, Markus/HOHNER, Jana/FRANKE, Gunnar: Die Entwicklung der Characeen-Bestände des Bodensees als Spiegel der trophischen Veränderungen der vergangenen Jahrzehnte, in: Rostock. Meeresbiolog. Beitr. 27 (2017) S. 81–93. – MURPHY, Fionn/SCHMIEDER, Klaus/BAASTRUP-SPOHR, Lars/PEDERSEN, Ole/SAND-JENSEN, Kaj: Five decades of dramatic changes in submerged vegetation in Lake Constance. Aquatic Botany 144 (2018) S. 31–37.
- 17 LANG (wie Anm. 13, Anm. 14)
- 18 VERMAAT Jan E./SANTAMARIA, Louis/ROOS, Pieter J.: Water flow across and sediment trapping in submerged macrophyte beds of contrasting growth form. Arch. Hydrobiol. 148/4 (2000), S. 549–562. – JAMES, William F./BARKO, John W.: Macrophyte influences on the zonation of sediment accretion and composition in a north temperate reservoir, in: Arch. Hydrobiol. 120 (1990) S. 129–142. – JAMES, William F./BARKO, John W./BUTLER, Malcolm G.: Shear stress and sediment resuspension in relation to submersed macrophyte biomass, in: Hydrobiologia 515 (2004) S. 181–191.
- 19 JAAG (wie Anm. 11)
- 20 JAAG (wie Anm. 10)

- 21 SCHMIEDER, Klaus/WERNER, Stefan/BAUER, Hans-Günther: Submersed macrophytes as a food source for wintering waterbirds at Lake Constance, in: *Aquat. Bot.* 84 (2006) S. 245–250.
- 22 SZIJJ, Josef: Ökologische Untersuchungen an Entenvögeln (Anatidae) des Ermatinger Beckens (Bodensee), in: *Vogelwarte* 23 (1965) S. 24–70. – SCHUSTER, Siegfried/BLUM, Vinzenz/JAKOBY, Harald, u. a. (Bearb.): Die Vögel des Bodenseegebietes. Hrsg. von der Ornithologischen Arbeitsgemeinschaft Bodensee, Stuttgart 1983, 379 S. – BAUER, Hans-Günther/STARK, Herbert/LÖFFLER, Herbert: Die Bedeutung der Wasservögel für das Ökosystem Bodensee im Winterhalbjahr, in: *Naturschutz, Landschaftspflege. Bad.-Württ.* 74 (2002) S. 167–258.
- 23 SCHMIEDER, Klaus: Die Änderung der submersen Vegetation des Gnadensees zu Beginn der 80er Jahre. Institut für Seenforschung Langenargen 1985 (unpub. Bericht), 26 S. – SCHMIEDER, Klaus: Veränderungen der submersen Makrophytenvegetation des Bodensee-Untersees von 1967 bis 1986 als Spiegelbild der trophischen Entwicklung (Institut für Seenforschung, unpub. Bericht 1991), 155 S.
- 24 SCHMIEDER (wie Anm. 15) Abb. 1.
- 25 KRAUSE, Werner: Charales (Charophyceae), in: Ettl, H./Gärtner, G./Heynig, H./Mollenhauer, D. (Hg.): Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 18, Jena, Stuttgart, Lübeck, Ulm 1997, S. 49.
- 26 SCHMIEDER et al. (wie Anm. 21).
- 27 SCHMIEDER, Klaus: Die Characeen des Bodensees, in: *Rostock. Meeresbiol. Beitr.* 13 (2004) S. 79–194. – SCHMIEDER (wie Anm. 17). – MURPHY et al. (wie Anm. 16).
- 28 DIENST, Michael/SCHMIEDER, Klaus: Wiederfund von *Tolypella glomerata* (Characeae) im Bodensee-Untersee. *Berichte der Botanischen Arbeitsgemeinschaft Südwestdeutschland*, Band 2 (2003), S. 114–116. – DIENST, Michael/STRANG, Irene: Kartierung der Unterwasservegetation im FFH-Gebiet »Bodanrück«. Rohdaten (2009).
- 29 KRAUSE (wie Anm. 25).
- 30 GREEN, Andy J./SOONS, Merel/BROCHET, Anne-Laure/KLEYHEEG, Eric: Dispersal of plants by waterbirds, in: *Why birds matter: Avian Ecological Function and Ecosystem Services*, Chapter: 6, Publisher: University of Chicago Press, Editors: C. H. Şekercioğlu, D. G. Wenny, C. J. Whelan, S. 147–195.
- 31 DIENST, Michael/MAINBERGER, Martin/SCHMIEDER, Klaus/STRANG, Irene: Kartierung submerser Makrophyten im Seerhein (Konstanz–Gottlieben) und im Rheinsee (Eschenz) des Bodensees. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Unveröff. Bericht (2017), 111 S.
- 32 BÜRGI, Jost/SCHLICHOTHERLE, Helmut: Gefährdete Ufersiedlungen am Bodensee, in: *Archäologie der Schweiz* 9,2 (1986) S. 34–41.
- 33 SCHLICHOTHERLE, Helmut: Constitution de réserves archéologiques sur les sites de bord de lacs et les tourbières de l'Allemagne du sud-ouest, in: D. Ramseyer, L. Roulière, Marie-Jeanne (Hg.): *Archéologie et Erosion: Mesure de Protection pour la sauvegard de site lacustres et palustres. Actes de la rencontre internationale de Marigny*, 29.–30. septembre 1994, Lons-le-Saunier 1996, S. 25–34.
- 34 BREM et al (wie Anm. 3).
- 35 HAGMANN, Sabine/SCHLICHOTHERLE, Helmut: Das UNESCO-Welterbe »Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen« in Baden-Württemberg. Schutz und Vermittlung einer ungewöhnlichen Welterbestätte, in: *Denkmalpflege in Baden-Württemberg* 14,1 (2014) S. 2–8.
- 36 MAINBERGER, Martin/HOHL, Wolfgang: Monitoring in archäologischen Denkmälern in der Flachwas-serzone – eine Einführung in Techniken und Methoden, in: BREM et al. (wie Anm. 3) S. 183.
- 37 BÜRGI/SCHLICHOTHERLE (wie Anm. 32) – BREM, Hansjörg/SCHLICHOTHERLE, Helmut: »Nasse Denkmäler« – Chancen und Probleme des Kulturgutes unter Wasser, in: *Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hg.): Was haben wir aus dem See gemacht? Kulturlandschaft Bodensee, Arbeitsheft* 10, Stuttgart 2001, S. 19–30.
- 38 OSTENDORP, Wolfgang: Die Ursachen des Röh-richtrückgangs am Bodensee-Untersee, in: *Carolinea* 48 (1990) S. 85–102. – SCHMIEDER, Klaus/DIENST, Michael/OSTENDORP, Wolfgang: Einfluss des Wasserstandsganges auf die Entwicklung der Uferrohrichte an ausgewählten Uferabschnitten des westlichen Bodensees in den vergangenen 40 Jahren, in: *Schrr VG Bodensee* 121 (2003) S. 143–165. – OSTENDORP, Wolfgang/BREM, Hansjörg/DIENST, Michael/JÖHNK, Klaus/MAINBERGER, Martin/PEINTINGER, Markus/REY, Peter/ROSSKNECHT, Henno/SCHLICHOTHERLE, Helmut/STRAILE, Dietmar/STRANG, Irene: Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Bodensee, in: *Schrr VG Bodensee* 125 (2007) S. 224.
- 39 BREM, Hansjörg/EBERSCHWEILER, Beat/SCHLICHOTHERLE, Helmut: Gefährdetes Kulturgut am Bodensee und Zürichsee, in: BREM et al. (wie Anm. 3) S. 17.

- 40 WEBER, Michael: Numerische Modellierung von Wellen und Strömungen zur Abschätzung von Resuspension und Sedimenttransport im Bodensee, in: BREM et al. (wie Anm. 3) S. 63. – WESSELS, Martin/HOFMANN, Hilmar/OSTENDORP, Wolfgang/SCHRÖDER, Gerd/WEBER, Michael: Handlungsoptionen zum Schutz archäologischer Denkmale in der Flachwasserzone, in: BREM et al. (wie Anm. 3) S. 295.
- 41 DIENST et al. (wie Anm. 31).
- 42 STRANG, Irene/FRANKE, Gunnar/MAINBERGER, Martin: Water level changes in Lake Constance and their relationship to changes in macrophyte settlement in the outflows of Lake Constance Upper and Lower Lake, *Limnologica*, 87 (2021) 1258–8, <https://doi.org/10.1016/j.limno.2021.125858>.
- 43 HOFMANN, Hilmar/OSTENDORP, Wolfgang: Seeufer: Wellen – Erosion – Schutz – Renaturierung. Handlungsempfehlungen für den Gewässerschutz. Ergebnisse aus dem ReWaM-Verbundprojekt HyMo-BioStrategie (2015–2018), Konstanz 2019.
- 44 DIECKMANN, Bodo/NELLE, Oliver/VOGT, Richard: Mehr als ein Haus am See – neue horgenzeitliche Pfähle in Konstanz, in: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2017 (2018) S. 85–87.
- 45 MAINBERGER, Martin/SCHLICHOTHERLE, Helmut: Erste Schritte zu einer unterwasserarchäologischen Bestandsaufnahme im Konstanzer Trichter, in: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2012 (2013) S. 31–36. – NELLE, Oliver/BAUM, Tilman/MÜLLER, Adalbert/MILLION, Sebastian/SCHLICHOTHERLE, Helmut: Pfählfeld Hinterhausen: erste Datierungen und Hausgrundrisse, in: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2015 (2016) S. 91–94. – MAINBERGER, Martin/GOLDHAMMER, Julia/NELLE, Oliver: Taucher im Grünen. Eine Bestandsaufnahme der spätbronzezeitlichen Siedlungsanlage am »Frauenpfahl« vor Konstanz, in: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2018 (2019) S. 112–116.
- 46 DIECKMANN (wie Anm. 44).
- 47 WAGNER, Erich: Fundstätten und Funde im Großherzogtum Baden. Erster Teil. Das badische Oberland Tübingen 1908, S. 24.
- 48 DZIWIW, Stefan: Das Fundmaterial der Seeufersiedlung Konstanz-Hinterhausen. Bachelor-Arbeit an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2013).
- 49 NELLE et al. (wie Anm. 45).
- 50 (Google Earth; letzter Abruf 15.1.2020)
- 51 MAINBERGER et al. (wie Anm. 45).
- 52 SCHÖBEL (wie Anm. 1) S. 153.
- 53 MAINBERGER/SCHLICHOTHERLE (wie Anm. 45) – MAINBERGER et al. (ebd.)
- 54 HEIERLI, Jakob, Pfahlbauten. Neunter Bericht, in: Mitteilungen der Antiquarischen Gesellschaft Zürich 22,2 (1888) Taf. 20.12.
- 55 Vgl. auch MAINBERGER/SCHLICHOTHERLE (wie Anm. 45) Abb. 8.
- 56 WESSELS, Martin/ANSELMETTI, Flavio/ARTUSO, Roberto/BARAN, Ramona/DAUT, Gerhard/GAIDE, Sefanie/GEIGER, Alain/GROENEVALD, Jan Derk/HILBE, Michael/MÖST, Karin/KLAUSER, Berthold/NIEMANN, Steffen/ROSCHLAUB, Robert/STEINBACHER, Frank/WINTERSTELLER, Paul/ZAHN, Ernst: Bathymetry of Lake Constance – State of the Art in Surveying a Large Lake, in: Hydrographische Nachrichten 100, S. 6–11.
- 57 MAINBERGER, Martin: Kalkkrusten in den Abflussschwellen des Bodensees. AGBU Aktuelles Thema April 2015. http://www.bodensee-ufer.de/Aktuelles_Thema/aktuelles_thema.html (Zugriff: 15.05.2019).
- 58 MAINBERGER/HOHL (wie Anm. 36) Abb. 15.
- 59 DIENST et al. (wie Anm. 31).
- 60 SCHLICHOTHERLE, Helmut: Vorgeschichtliche Pfahlbausiedlungen um die Spitze der Halbinsel Höri, in: Götz, Franz (Hg.): Beiträge zur Geschichte der Gemeinde Gaienhofen und ihrer Ortsteile, Singen/Htwl. 1987, S. 17–28. – SCHLICHOTHERLE, Helmut: Die Sondagen 1973–1978 in den Ufersiedlungen Hornstaad-Hörnle I. Befunde und Funde zum frühen Jungneolithikum am westlichen Bodensee (Siedlungsarchäologie im Alpenvorland I. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 36) Stuttgart 1990. – DIECKMANN, Bodo/HARWATH, Arno/HOFFSTATT, Jutta: Hornstaad-Hörnle IA. Die Befunde einer jungneolithischen Pfahlbausiedlung am westlichen Bodensee (Siedlungsarchäologie im Alpenvorland IX Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg) Stuttgart 2006, S. 7–275.
- 61 SCHLICHOTHERLE 1990 (wie Anm. 60), S. 15
- 62 SCHLICHOTHERLE, Helmut: Urgeschichtliche Feuchtbodensiedlungen in Baden-Württemberg. Der Aufgabenbereich des »Projekts Bodensee – Oberschwaben«. Denkmalpflege in Baden-Württemberg, in: Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege 9 (1980) S. 102. – BREM et al. (wie Anm. 4) S. 19.
- 63 SCHLICHOTHERLE (wie Anm. 60) S. 22.

- 64 Ebd, Abb. 15; DIECKMANN et al. (wie Anm. 60) Abb. 5.
- 65 Google Earth, abgerufen am 4.2.2020
- 66 Vgl. DIECKMANN et al. (wie Anm. 60) Abb. 1.
- 67 SCHMIEDER (wie Anm. 15). – SCHMIEDER et al. (wie Anm. 16). – MURPHY et al. (ebd.).
- 68 OSTENDORP, Wolfgang/SALVARINA, Ioanna/ROTHHAUPT, Karl-Otto: Ökologische Auswirkungen von Seeufermauern, in: HOFFMANN/OSTENDORP (wie Anm. 43) Abb. 9.
- 69 LUFT, Gerhard/IHRINGER, Jürgen: Langzeitverhalten der Bodensee-Wasserstände. <http://www.bodensee-hochwasser.info/pdf/langzeitverhalten-bodensee-wasserstaende.pdf> (Zugriff: 11.03.2020).
- 70 WAHL (wie Anm. 42).
- 71 https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/seespiegel/Seespiegel_47-Internet.pdf, abgerufen am 26.2.2020 – KÖNINGER, Joachim/EBERSBACH, Renate/GOLDHAMMER, Julia/HAGMANN, Sabine: Quagga-Muscheln, Erosionsrinnen und eine neue Palisade in der UNESCO-Welterbestation Unteruhldingen – Stollenwiesen, in: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2018 (2019) S. 107–112.
- 72 EBERSBACH, Renate/MAINBERGER, Martin/GOLDHAMMER, Julia/OSTENDORP, Wolfgang: Archäologische Denkmalpflege in der Uferzone des Bodensees, in: HOFMANN/OSTENDORP (wie Anm. 44) Abb. 1.
- 73 HOFMANN, Hilmar: Messung und Modellierung von Wellen, Strömungen und Sedimenttransport in der Flachwasserzone von Seen, in: HOFMANN/OSTENDORP (wie Anm. 43) S. 62.
- 74 OSTENDORP et al. (wie Anm. 68).
- 75 HOFMANN, Hilmar/SALVARINA, Ionna/ROTHHAUPT, Karl-Otto: Die Fahrgastschifffahrt als Stressor in der Flachwasserzone von Seen, in: HOFMANN/OSTENDORP (wie Anm. 44).
- 76 EBERSBACH et al. (wie Anm. 72), S. 122.
- 77 SCHMIEDER, Klaus/WOITHON, Anette/HEEGE, Thomas/PINNEL, Nicole: Remote sensing techniques and GIS modeling for monitoring and assessing the littoral vegetation at Lake Constance. *SIL Proceedings*, 1922–2010, 30:10, 1604–1606, (2010) DOI: 10.1080/03680770.2009.11902384
- 78 ISELI, Christoph: Einfluss der submersen Makrophytenvegetation auf die Erosionsprozesse in der Flachwasserzone des Bielersees: eine Fragestellung (in Vorbereitung).
- 79 Z. B. LACHAVANNE, Jean-Bernard/JUGE, Raphael/PERFETTA, Jean: The consequences of water oligotrophication on macrophytic vegetation of Swiss lakes. *SIL Proceedings*, 1922–2010, 24:2, S. 943–948, (1991) DOI: 10.1080/03680770.1989.11898887. – LEHMANN, Anthony/LAVACHANNE, Jean-Bernard: Changes in the water quality of Lake Geneva indicated by submerged macrophytes. *Freshwater biology* 42/3 (1999) S. 457–466. – Für den Genfer See s. DUBOIS, Jean-Paul/GILLET, Christian/HILGERT, Nadine/BALVAY, Gérard: The impact of trophic changes over 45 years on the Eurasian perch, *Perca fluviatilis*, population of Lake Geneva, in: *Aquatic Living Resources* 21,4 (2008) S. 401–410. doi:10.1051/alr:2008051
- 80 <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/zustand-der-gewaesser/zustand-der-seen/wasserqualitaet-der-seen.html>, letzter Abruf 9.4.2020.