

Wellenexposition und Sedimentmobilisierung im Bereich ausgewählter Unterwasserdenkmäler (UNESCO-Welterbestätten) des Bodensees

Hilmar Hofmann und Wolfgang Ostendorp

Zusammenfassung

An vier erosionsgefährdeten stein- und bronzezeitlichen Unterwasserdenkmälern des Bodensees wurden langfristige und kontinuierliche Freilandmessungen des Oberflächenwellenfelds, der Resuspension von Oberflächensedimenten (Silte, Sand und Kiese), des Sohltransports (Sande, Kiese und Gerölle) und der Sedimentation (Silte und Sande) durchgeführt. Modell-Simulationen ermöglichen räumlich und zeitlich hochaufgelöste Abschätzungen des Wellenenergieeintrags, der sohnahen Strömungsgeschwindigkeiten und des Resuspensionspotentials in der Flachwasserzone des Bodensees. Die Ergebnisse stützen die vorläufigen Beobachtungen, denen zufolge die Kies-/Geröll-Schüttungen zum Erosionsschutz bautechnisch stabil, nicht erosionsgefährdet und ökologisch verträglich sind.

Résumé

Exposition aux vagues et mobilisation des sédiments : exemple de quelques sites lacustres du Patrimoine mondial de l'UNESCO du lac de Constance

Des mesures topographiques, continues et sur le long terme, des surfaces soumises à l'effet des vagues, de la remise en suspension des sédiments superficiels (limon, sable et gravier), du déplacement des éléments lourds (sable, gravier, galets) et des sédiments fins (limon et sable) ont été effectuées sur quatre sites, menacés par l'érosion, du Néolithique et de l'Âge du Bronze du lac de Constance. Un modèle de simulation a permis des estimations à haute résolution spatiale et temporelle de l'enregistrement de l'énergie des ondes, des vitesses d'écoulement des courants et du potentiel de remise en suspension des sédiments dans la zone d'eau peu profonde du lac de Constance. Les résultats confirment les observations préliminaires selon lesquelles les couvertures de gravier et de galets sont une technique fiable de protection contre l'érosion, ne sont pas menacés par l'érosion et sont compatibles sur le plan écologique.

Summary

Wave exposure and sediment mobilisation in the area of selected UNESCO world heritage sites of Lake Constance

Long-term, continuous field measurements were conducted at four Stone and Bronze Age underwater pile dwellings of Lake Constance

that are endangered by erosion to investigate the surface wave field with its properties, the resuspension of surface sediments (silt, sand and gravel), the bed load transport (sand, gravel and pebble), and sedimentation (silt and sand). Model simulations were used for estimations of the wave energy flux to shore, the near-bottom current velocities, and the resuspension potential in shallow nearshore zones of Lake Constance. The results support our preliminary observations, which indicated that gravel/pebble fillings provide shelter against erosion, are hydrodynamically stable, and ecologically harmless.

Riassunto

Esposizione alle onde e mobilizzazione dei sedimenti relativi ad alcuni siti lacustri (Patrimonio mondiale dell'UNESCO) del lago di Costanza

A quattro monumenti sottomarini del lago di Costanza risalenti all'età della pietra e del bronzo e compromessi dalle erosioni sono state fatte misurazioni all'aria aperta continue e per lungo tempo del campo d'onde di superficie, della risospensione dei sedimenti di superficie (limo, sabbia e ghiaia), del trasporto fluviale specifico (sabbia, ghiaia, detriti) e della sedimentazione (limo e sabbia).

Simulazioni modello rendono possibili valutazioni ad alta definizione, sia spazialmente che temporalmente, delle registrazioni dell'energia delle onde, delle velocità della corrente e del potenziale di risospensione nella zona a basso fondale del lago di Costanza. I risultati confermano le osservazioni provvisorie in seguito alle quali le gettate di ghiaia/detriti per la protezione dall'erosione risultano dal punto di vista edile stabili, non messi in pericolo dall'erosione e ecologicamente compatibili.

EINLEITUNG

Die stein- und bronzezeitlichen Kulturschichten der Pfahlbauten des Bodensees und anderer Voralpen- und Alpenseen gehören zum archäologischen Kulturgut von Weltrang. Die wichtigsten von ihnen wurden 2011 in die Liste des UNESCO-Weltkulturerbes aufgenommen (Brem *et al.* 2013). Seit einigen Jahrzehnten sind die Jahrtausendealten Siedlungsschichten jedoch durch Ausspülung der Fundschichten

und Zersetzung der Bauhölzer bedroht. Vor diesem Hintergrund wurden an ausgewählten Unterwasserdenkmälern des Bodensees intensive Feldmessungen und Modell-Simulationen mit teilweise neu entwickelten Messmethoden durchgeführt. Ziele der Untersuchungen waren die Charakterisierung des Oberflächenwellenfelds, die Abschätzung der Wellenexposition, des Resuspensionspotentials und des sohlnahen Sedimenttransports, um die Ursachen für die voranschreitende Erosion zu identifizieren. Gleichzeitig wurden die ersten denkmalpflegerischen Erosionsschutzmassnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und ökologischen Verträglichkeit untersucht.

MATERIAL UND METHODEN

UNTERSUCHUNGSGEBIETE

In den Unterwasserdenkmal-Stationen Sippligen-Osthafen (SIPP), Unteruhldingen-Stollenwiesen (UUHL), Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH) am Ufer des Überlinger Sees, sowie Steckborn-Schanz (STEC) am schweizerischen Untersee-Ufer, wurden zwischen 2008 und 2013 Messungen zum Wellenfeld, zur Resuspension und Wiederablagerung von Oberflächensedimenten, zum sohlnahen Sedimenttransport sowie zur ökologischen Verträglichkeit von Erosionsschutzmassnahmen durchgeführt. Die Stationen UUHL, SIPP und KRAH stehen auf der Weltkulturerbe-Liste „Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen“ der UNESCO. Die Kulturschichten dieser Stationen unterlagen seit längerer Zeit einer erosiven Ausspülung und wurden ebenso wie eine weitere Station in Ermatingen-Westerfeld (ERMW, Untersee, Kt. Thurgau) zwischenzeitlich durch verschiedene Arten von Kies- und Geröllschüttungen gesichert. Die einzelnen Untersuchungsgebiete weisen unterschiedliche Expositionen gegenüber dem Wind und der Lage zu Schifffahrtsrouten auf.

WELLEN-, STRÖMUNGS- UND RESUSPENSIONSMESSUNGEN, DATENANALYSE

Die Eigenschaften des Oberflächenwellenfelds und der Resuspension von Partikeln in der Flachwasserzone wurden zwischen 2008 und 2011 über Monate hinweg kontinuierlich mit speziell für den autonomen Langzeitbetrieb entwickelten Geräten

gemessen. Die Messung des Oberflächenwellenfelds erfolgte durch Drucksensoren (Messintervall: 16 Hz, Auflösung: 0,1 mbar) (Hofmann 2007; Hofmann *et al.* 2008). Die bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten und die akustische Rückstreustärke wurden mit einem ADV (Akustischer Strömungssensor, Nortek) über 64 s und mit einem Messintervall von 8 Hz während einer jeden Messperiode von 120 s gemessen. Die optische Rückstreustärke wurde mit einem für den autonomen Betrieb umgebauten Trübesensor (Seapoint) sekundlich erfasst. Sowohl das optische als auch das akustische Rückstreusignal wurden gegenüber der Partikelkonzentration kalibriert (Hofmann 2007).

Die Auswertung der erhobenen Messdaten erfolgte mit selbst entwickelten Routinen im Programm MATLAB. Aus den Daten der Drucksensoren wurden alle relevanten Wellenparameter (Wellenhöhe, -periode, -länge, -energie und -energiefluss) zeitlich hochaufgelöst für 1-Minuten-Intervalle berechnet (Hofmann *et al.* 2008).

Die aus den Eigenschaften der Wellen abgeleitete bodennahe, welleninduzierte Strömungsgeschwindigkeit wurde mit Hilfe von empirischen Relationen, die die Eigenschaften der Sedimente (Korngrößenverteilung und Dichte der Partikel) berücksichtigen, dazu benutzt, das Auftreten von Resuspension für ausgewählte Wassertiefen sowie die zugehörigen maximalen Äquivalentdurchmesser der resuspendierten Körner zu berechnen (Hofmann *et al.* 2011).

SEDIMENTFALLEN

Anlässlich der Umsetzung von Erosionsschutzmassnahmen in den Unterwasserdenkmalstationen SIPP und KRAH wurden Ende Oktober 2009 Sedimentfallen (Container 0,35 × 0,26 × 0,14 m, L×B×H, $A_o = 0,0882 \text{ m}^2$, $V = 0,0120 \text{ m}^3$) in den Schüttungskörper eingesetzt, die zuvor mit originalem Schüttungsmaterial (Grobkies, Geröll) genau bekannter Menge gefüllt worden waren (Abb. 1). Die Fallen dienten zur Simulation der standörtlichen Sedimentationsbedingungen (Ostendorp 2013). Nach etwa neunmonatiger Expositionsdauer wurden die Container Ende Juli 2010 geborgen und einer erneuten Korngrößenanalyse unterzogen. Die Massendifferenzen in den einzelnen Fraktionen spiegelten den Netto-Eintrag an Feststoffen in den Schüttungskörper wider.

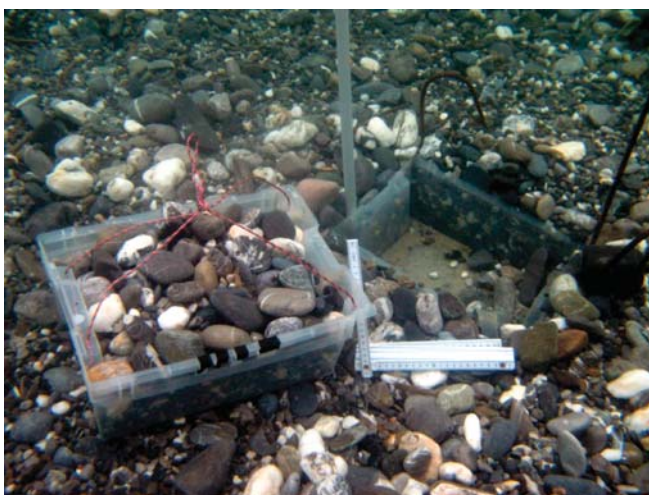


Abb. 1 - Sedimentfallen: links - befüllter Container vor dem Einsetzen in den Schüttungskörper (Station KRAH) in ca. 1 m Wassertiefe; rechts - Container nach Bergung (Station SIPP), deutlich ist die Anreicherung der Geröllen sowie der Bewuchs mit Dreikantmuscheln (*Dreissena polymorpha*) zu erkennen. Foto: J. Köninger.



Abb. 2 - Sand-/Kies-Tracer: links - Tracer in vier verschiedenen Korngrößen, teils beschichtet und eingefärbt, teils im Rohzustand (schwarz); rechts - Ausbringung der Tracer entlang einer Startstrecke in der Station STEC.

SOHLTRANSPORTMESSUNGEN MIT SAND-, KIES- UND GERÖLLTRACERN

Der sohlnahe Partikeltransport auf der Uferbank der Stationen UUHL, SIPP, KRAH und STEC wurde experimentell mit Hilfe neu entwickelter Tracer untersucht (Ostendorp und Härter 2013). Die Sand-/Kies-Tracer (vier Korngrößenklassen, Ø 0,8 bis 18 mm) wurden am Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart mit einem Doppelschnecken-Extruder aus einem Eisen-Polypropylen-Compound hergestellt, danach grundiert und mit jeweils unterschiedlichen Fluoreszenzfarben gefärbt (Abb. 2). Die Geröll-Tracer (Kaliber 45/55 mm und 60/95 mm) wurden als Gussbetonkörper hergestellt, in die Permanent-Magnete eingebettet waren. Die Geröll-Tracer wurden durch eine Kennung individualisiert, so dass die Bewegungen der einzelnen Körner separat erfasst werden konnten.

Die Tracer wurden am 07.05. (UUHL) und am 27./28.05.2010 (SIPP, KRAH) bzw. am 17.11.2011 (STEC) getrennt nach Fraktionen entlang von 20 m langen Bezugsstrecken in etwa 0,9 bis 1,8 m Tiefe unter dem mittleren Mittelwasserspiegel (i) in der Nähe der Haldenoberkante, (ii) in Strandnähe sowie (iii) in der Mitte zwischen beiden Bereichen ausgebracht. Das erste Monitoring erfolgte nach 3 Wochen (UUHL), nach 35 und 36 Wochen im März 2011 (SIPP, KRAH) und nach 69 Wochen am 20.03.2013 in STEC. Ein zweites Monitoring wurde in UUHL nach weiteren 144 Wochen bzw. in SIPP und KRAH nach weiteren 105 Wochen im März 2013 durchgeführt. Dabei wurden (i) die Lage und Orientierung der Gerölle durch archäologische Forschungstaucher kontrolliert sowie (ii) nach einem Rasterplan Oberflächensedimentproben entnommen, die darin enthaltenen Tracer-Körner mit einem Magnetabscheider angereichert und gezählt.

ÖKOLOGISCHE BEGLEITUNTERSUCHUNGEN AN DEN EROSIONSSCHUTZMASSNAHMEN

Die Erosionsschutzmassnahmen bestanden aus ca. 0,2 bis 0,3 m mächtigen Kies- und Geröllschüttungen, die grossflächig (KRAH im Okt. 2009; ERMW im Nov./Dez. 1998) oder als wabenartige Riegel (SIPP im Okt. 2009; STEC im Sept. 2011) auf die Kulturschicht-Flächen aufgebracht wurden. Das Schüttungsmaterial bestand zu etwa 1/3 aus 8/16 mm und zu 2/3 aus



32/100 mm Körnung. Die Voruntersuchungen wurden im Juli/August 2008 (SIPP, KRAH, STEC) auf den späteren Schüttungsarealen und naturbelassenen Referenzflächen durchgeführt (Ostendorp *et al.* 2013). Im Juli/August 2010 (SIPP, KRAH) bzw. 2012 (STEC) folgten mit der gleichen Methodik die Nachuntersuchungen. In der Station ERMW wurden im Juli/August 2010 nur Nachuntersuchungen durchgeführt, die die Entwicklung 12 Jahre nach Einbau der Kiesschüttung (8/16 mm Körnung) zeigten. Die Untersuchungen erstreckten sich u. a. auf sedimentologische Analysen und die quantitative Erfassung der Unterwasservegetation. Die Auswertung erfolgte durch einen Vorher/Nachher-Vergleich sowie durch den Vergleich der Testflächen mit den Referenzflächen.

ERGEBNISSE

EIGENSCHAFTEN DES OBERFLÄCHENWELLENFELDS

Das Oberflächenwellenfeld des Bodensees ist nicht nur durch Windwellen, sondern auch durch Schiffswellen charakterisiert (Hofmann *et al.* 2008). Schiffswellen, die durch Fähren, Passagierschiffe und den Katamaran erzeugt werden, können einen wesentlichen Beitrag an der im Uferbereich dissipierten Oberflächenwellen-Energie haben und stellen somit einen potentiellen Vektor für die Resuspension von Partikeln dar (Hofmann *et al.* 2008; Hofmann *et al.* 2011; Hofmann *et al.* 2013). In Abbildung 3 sind exemplarisch die Eigenschaften des Wellenfelds während einer windwellen-dominierten und einer schiffswellen-dominierten Periode an der Station UUHL gezeigt. Die schiffswellen-dominierte Periode ist durch eine tagesperiodische Verteilung der Wellenhöhe gekennzeichnet - grosse Wellenhöhen am Tag und niedrige in der Nacht. Diese wird durch das Auftreten von Schiffswellen erzeugt, die vor allem am Tag (Fähr- und Passagierschiffe) und nur selten in der Nacht zu beobachten sind (Hofmann *et al.* 2008). Das Auftreten von Schiffswellen ist durch die einzelnen Peaks gekennzeichnet. Schiffswellen erreichen Wellenhöhen von 0,05-0,3 m und besitzen Perioden von 3-4 s. Dagegen betragen die Wellenhöhen und -perioden von windinduzierten Wellen 0-0,8 m bzw. 1-2,5 s (Abb. 3). Windwellen sind durch ihr sporadisches Auftreten vor allem in den Wintermonaten gekennzeichnet. Schiffswellen dagegen treten regelmässig und periodisch auf

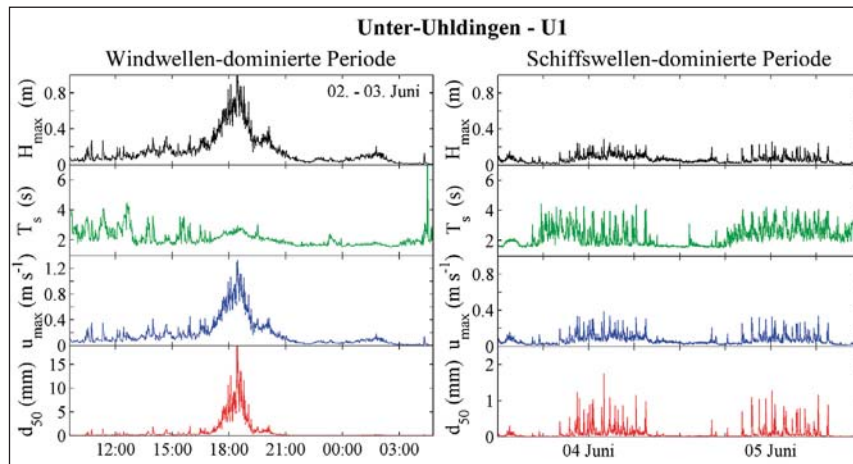


Abb. 3 - Charakteristisches Wellenfeld während einer durch Windwellen dominierten Periode (links) und einer durch Schiffswellen dominierten Periode (rechts) im Untersuchungsgebiet Unteruhldingen - U1 in 2008. Maximale Wellenhöhe (H_{max} , schwarz), signifikante Wellenperiode (T_s , grün), maximale, bodennahe Strömungsgeschwindigkeit (u_{max} , blau) und maximal resuspendierbare mittlere Korngröße (d_{50} , rot).

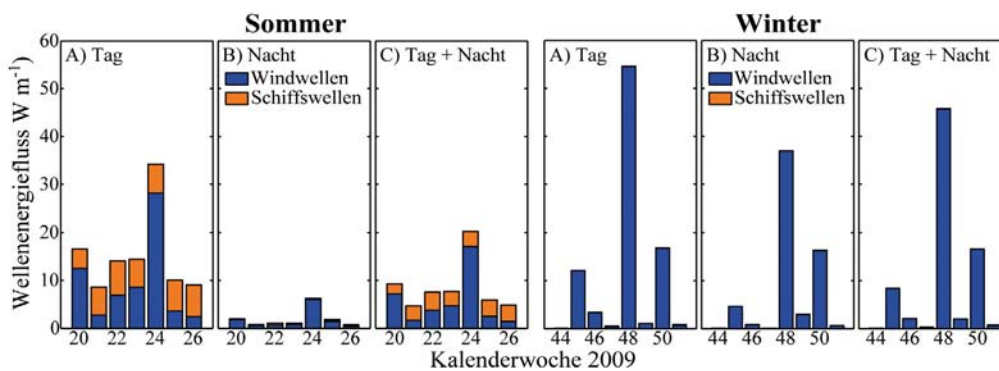


Abb. 4 - Wellenstatistik: Mittlerer, wöchentlicher Wellenenergiefluss ($W m^{-1}$) von Wind- und Schiffswellen (A) am Tag (09-21 Uhr), (B) in der Nacht (21-09 Uhr) und (C) Tagesmittelwert am Standort Unteruhldingen während einer Periode im Sommer und im Winter 2009. Wellen $<0,05 m$ sind bei der Berechnung nicht berücksichtigt.

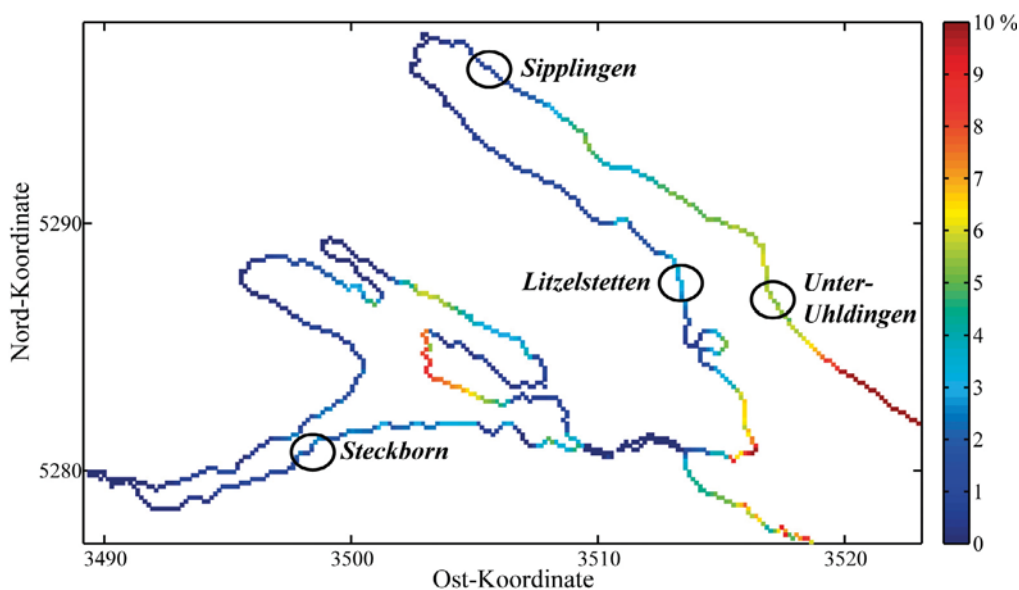


Abb. 5 - Räumlich aufgelöste, mittlere Wellenexposition der Ufer im Bereich des Überlinger Sees und des Bodensee-Untersees (inkl. der Stationen SIPP, UUHL, KRAH und STEC) über den Zeitraum Februar 2009 bis Januar 2010. Die Exposition ist als die relative Häufigkeit von Wellen $>0,15 m$ dargestellt.

(Tag-Nacht-Zyklus und saisonaler Zyklus) und können während der Sommermonate in einigen Gebieten (z. B. UUHL) das Wellenfeld und seine Eigenschaften dominieren.

WELLENEXPOSITION DER UFER

Wind- und Schiffswellen können aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Welleneigenschaften und vor allem anhand ihrer Wellenperioden unterschieden werden (Hofmann *et al.* 2008). Die statistische Auswertung der Wellen-Daten aller Untersuchungsgebiete zeigt die unterschiedliche Exposition und die zeitliche Variabilität gegenüber Wind- und Schiffswellen (Hofmann *et al.* 2013). Am Beispiel der Station UUHL sind die zeitliche Variabilität (Tag/Nacht) und der Einfluss von Schiffswellen auf die Exposition der Uferzone wiedergegeben (Abb. 4). Schiffswellen dominieren energetisch das Wellenfeld am Tag und können im Sommer bis zu 50 % der ins Ufer eingetragenen Wellenenergie (Wellenenergiefluss) ausmachen. Im Winter dagegen stammt fast die gesamte ins Ufer eingetragene Energie von Windwellen. Der Energieeintrag wird durch einzelne, zeitlich sehr kurze, aber energetisch intensive Ereignisse dominiert. Dies steht im Gegensatz zu der Situation im Sommer, für die ein geringerer, aber stetiger Energieeintrag durch Schiffswellen zu beobachten ist.

Im langjährigen Mittel (2008-2011) sind die untersuchten Stationen UUHL, KRAH, STEC und SIPP wie folgt gegenüber Wind- und Schiffswellen exponiert: (i) im Sommer: 8, 5, 2 bzw. 3 $W m^{-1}$, davon 56, 65, 77, 85 % Windwellen und 44, 35, 23, 15 % Schiffswellen und (ii) im Winter: 8, 3, 4 bzw. 2 $W m^{-1}$, davon 98, 87, 98, 96 % Windwellen und 2, 13, 2, 4 % Schiffswellen.

Die Ergebnisse verdeutlichen zum einen die unterschiedliche Exposition der einzelnen Untersuchungsgebiete gegenüber Oberflächenwellen im Allgemeinen, aber vor allem die zum Teil sehr grosse und je nach Gebiet und Jahreszeit sehr unterschiedliche Bedeutung von Schiffswellen.

MUSTER UND DYNAMIK WELLENINDUZIRTER RESUSPENSION

Die durch Oberflächenwellen induzierten bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten führen zur Resuspension von Sedimentpartikeln. Muster und Dynamik der Resuspension entsprechen den Eigenschaften (Wellenhöhe, -periode und -länge) des Wellenfelds und sind stark von der Wassertiefe abhängig (Hofmann *et al.* 2011; Hofmann *et al.* 2013). Bei gleich bleibenden Welleneigenschaften nimmt die bodennahe Strömungsgeschwindigkeit mit abnehmender Wassertiefe stark zu. Bei höheren bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten können nicht nur mehr, sondern auch grössere Partikel resuspendiert werden. Dies ist aus den Zeitreihen der maximalen Geschwindigkeit über dem Sedimentboden u_{max} und der maximal resuspendierbaren, mittleren Korngrösse d_{50} am Beispiel der Station UUHL ersichtlich (Abb. 3). Hier erreichen Windwellen in 1 m Wassertiefe u_{max} -Werte von bis zu 1,2 $m s^{-1}$ und Schiffswellen 0,2-0,4 $m s^{-1}$. Während Starkwindereignissen können Partikel bis zu 10-20 mm Äquivalentdurchmesser remobilisiert werden. Schiffswellen resuspendieren teilweise deutlich kleinere Partikelgrössen von 0,5-1,5 mm, aber dafür am Tag sehr regelmässig und häufig (Tag-Nacht-Zyklus), im Gegensatz zu Windwellen, die sporadisch und weniger häufig auftreten. Das

regelmässige Auftreten von Schiffswellen begrenzt die Konsolidierung der Sedimente, die damit für darauf folgende Windwellenereignisse leichter remobilisierbar und erodierbar sind.

RÄUMLICH UND ZEITLICH HOCHAUFGELOSTE MODELLIERUNG DES OBERFLÄCHENWELLENFELDS, DER WELLENEXPOSITION DER UFER UND DER RESUSPENSION VON PARTIKELN

Das Oberflächenwellenfeld des gesamten Bodensees wurde mit dem Wellenmodell SWAN (Simulation WAVes Nearshore) räumlich und zeitlich hochaufgelöst über lange Zeiträume (Jahre) simuliert. Details zum Modellaufbau und der Validierung des Modells finden sich in Seibt *et al.* (2013) und Hofmann *et al.* (2013). Ziel der Modell-Simulationen war es, neben dem Wellenfeld die Wellenexposition und das Resuspensionspotential der Bodensee-Uferabschnitte zu bestimmen. Ein Maß für die Wellenexposition des jeweiligen Uferabschnitts ist die signifikante Wellenhöhe (H_{sig}).

Abbildung 5 zeigt die räumlich aufgelöste mittlere Wellenexposition der Ufer des Überlinger Sees und des Untersees, die alle vier Unterwasserdenkmal-Stationen umfassen, über den Zeitraum zwischen Februar 2009 und Januar 2010. Die Stationen SIPP, UUHL, KRAH und STEC weisen während 1-2, 5-6, 3-4 und 2-3 % der Zeit des Jahres Wellenhöhen $>0,15$ m auf. Ab dieser Wellenhöhe ist mit Resuspension in der Flachwasserzone zu rechnen. UUHL weist die höchste Wellenexposition aller Stationen auf, die mit der größten Windwirklänge aller Stationen und der Westwind-Exposition (dominante Windrichtung am Bodensee) zu begründen ist. Dagegen weist die Station SIPP trotz gleicher Windexposition, aber geringerer Windwirklänge als UUHL die geringste Wellenexposition auf. Die Wellenexpositionen von KRAH und STEC, die gegenüber Nordostwinden exponiert sind, liegen dazwischen. Die Ergebnisse der Langzeit-Simulationen spiegeln trotz fehlender Schiffswellen-Simulation ein ähnliches Bild der Wellenexposition wider wie die Langzeitmessungen dieser Studie. Die Exposition der Seeufer gegenüber Windwellen lässt sich nicht nur für die hier ausgewählten Unterwasserdenkmal-Stationen berechnen, sondern auch für die anderen Fundstellen rund um den Bodensee. Damit wird es möglich, das Gefährdungspotential der Fundstellen durch Wellen und die damit verbundene Resuspension von Partikeln abzuschätzen und besonders gefährdete Fundstellen zu identifizieren.

Die Ergebnisse der zeitlich und räumlich hochaufgelösten Modellierung der Eigenschaften des Oberflächenwellenfelds können für die Modellierung des Resuspensionspotentials verwendet werden. Dabei werden die pro Zeitschritt modellierten Wellenparameter mit den Daten zur räumlichen Korngrössenverteilung der Feinsediment-Fraktion (Schünemann 1993) durch empirische Relationen (CERC 2002) miteinander verknüpft. Dadurch sind zeitlich und räumlich hochaufgelöste Aussagen zum Auftreten von Resuspension möglich. Die Abbildung 6 zeigt exemplarisch für die Station UUHL die Verteilung auftretender Resuspension (graue Flächen) in der Flachwasserzone während eines Starkwindereignisses. Dadurch lassen sich Zonen, in denen verstärkt Resuspension auftritt, von Zonen trennen, die weniger stark betroffen sind. Es bleibt zu berücksichtigen, dass die Vorhersagekraft solcher Modellrechnungen

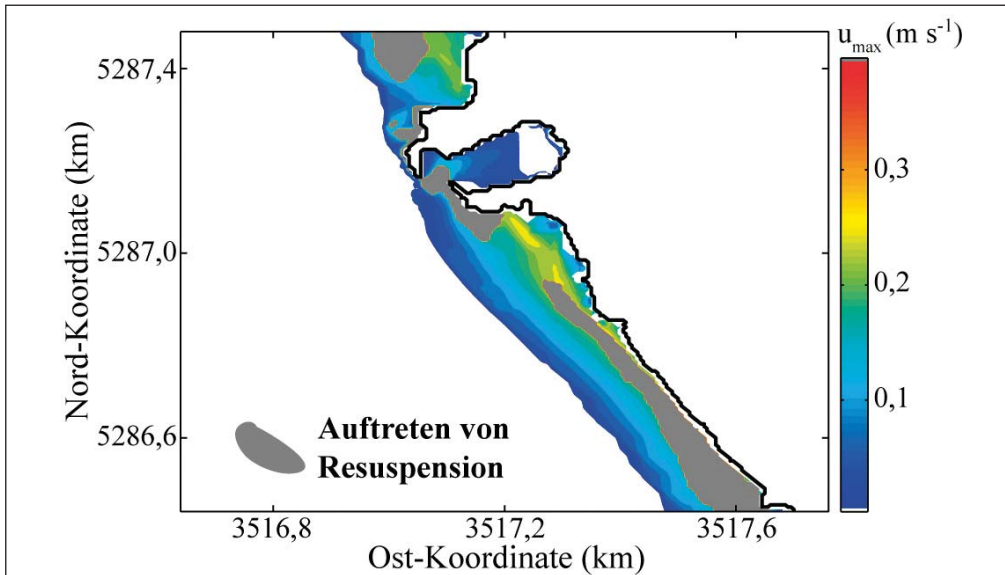


Abb. 6 - Modellierung des zeitlich-dynamischen Resuspensionspotentials im Bereich des Standorts Unteruhldingen. Räumliche Verteilung der bodennahen Strömungsgeschwindigkeit u_{max} ($m s^{-1}$) und der potentiellen Resuspension am 23.11.2009 um 15 Uhr während eines Starkwindereignisses.

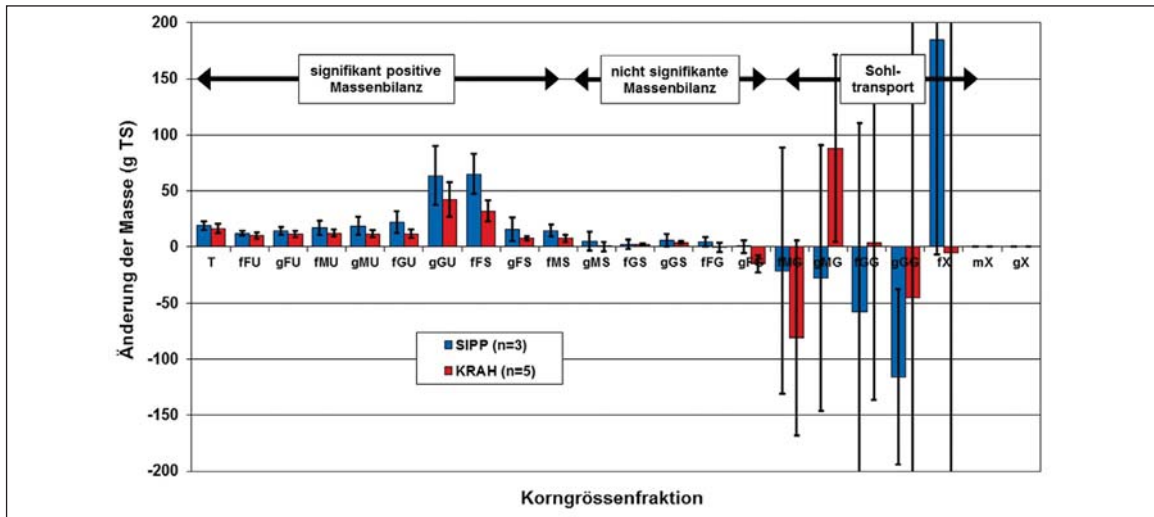


Abb. 7 - Netto-Gewinne und -verluste (Mittelwerte, einf. Standardabweichungen) in 3 Sedimentfallen der Station SIPP und in 5 Fällen der Station KRAH zwischen Ende Oktober und Ende Juli 2010, jeweils unterschieden nach Korngrößenfraktionen (T - Ton, U - Silt, S - Sand, G - Kies, X - Gerölle; F, M, G - Fein-, Mittel-, Grob-Fraktion, f, g - feine bzw. grobe Teilfraktion). Die Netto-Einträge der Fraktionen Ton (T, <0,002 mm) bis feiner Mittelsand (fMS, 0,200 - 0,355 mm) sind signifikant, während die Massenänderungen in den Fraktionen feiner Mittelkies (fMG, 6,3 - 11,2 mm) bis feine Gerölle (fX, 63 - 112 mm) auf Einzelkorn-Bewegungen zurückgehen.

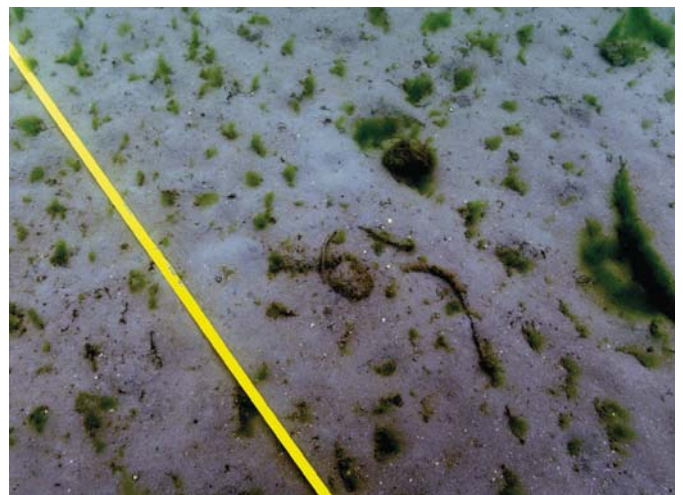


Abb. 8 - Sohltransport: links - geborgene Tracer-Gerölle aus der Station UUHL nach 34 monatiger Expositionszeit; die Oberseiten sind mit einer Kalkkruste überzogen, dennoch sind der Code und die Markierungen deutlich zu erkennen; rechts - im Sediment eingebettete Tracer-Gerölle in der Station KRAH nach 34 monatiger Expositionszeit, nur noch die Markierungsschnüre sind zu erkennen, links daneben das Massband zur Positionseinstimmung. Foto W. Hohl, LAD Bad.-Württ.

und die möglichen Schlussfolgerungen im Besonderen von der Datenqualität der Korngrößenverteilung abhängen.

Hochaufgelöste Simulationen über lange Zeiträume (über Monate oder ein ganzes Jahr) ermöglichen räumlich hochaufgelöste Abschätzungen des Resuspensionspotentials, die die Interaktion zwischen dem Auftreten einzelner Starkwindereignisse und der tatsächlichen Wasserspiegellage berücksichtigen (saisonale Wasserspiegelschwankungen von 1,5-2,5 m).

SEDIMENTATION DER SUSPENSIONSFRACHT

In den Sedimentationsfallen (Abb. 1) hatte sich Feinmaterial v. a. im Korngrößenbereich 0,035 bis 0,112 mm (Grobsilt, Feinsand) abgelagert (Abb. 7). Material dieser Kornklassen ist auch in den umgebenden Oberflächensedimenten weit verbreitet, war aber in den Fallen deutlich überrepräsentiert. Daher wird in Übereinstimmung mit den Voraussagen des Hjulström-Sundborg-Diagramms angenommen, dass diese Fraktionen besonders leicht mobilisiert und durch Suspensionstransport verfrachtet werden (Ostendorp 2013). Die Sedimentationsraten lagen bei 1,86 (Station KRAH) bzw. 2,99 kg m⁻² Trockenmasse (SIPP) innerhalb von 9 Monaten. Dies entspricht Sedimentzuwachsrate von 1,7 bzw. 2,8 mm. Die deutlich höheren Massenanteile an organischer Substanz und Gesamt-Karbonat in den Fallensedimenten lassen vermuten, dass ein Teil des sedimentierten Materials direkt aus der Bioproduktion der Umgebung (photosynthetische

Karbonatfällung der Armeleuchteralgen) und der Wirbellosenfauna in den Fallen (Molluskenschalen, v. a. der Dreikantmuschel) stammt.

SOHLTRANSPORT

Die Positionskontrollen der Geröll-Tracer ergaben, dass sich die groben Gerölle (Kaliber 60/95 mm) innerhalb von knapp 3 Jahren nur geringfügig bewegt hatten und die kleineren Tracer (45/55 mm) lediglich im Nahbereich bis etwa 1,5 m Entfernung von der Startposition (Abb. 8).

Auch die Sand-/Kies-Tracer wurden nur über ein enges Gebiet von weniger als 200 m² verteilt, wobei allein die Kornklassen im feinen Feinkies (ffG)-Bereich oder darunter ($\varnothing < 3,5$ mm) in nennenswertem Umfang verlagert wurden. Die Verteilungsbilder zeigten in vielen Fällen mehr oder minder kreisförmige Isokonzen, d. h. die Verlagerung insbesondere der feinen Kies-Tracer erfolgte in alle Richtungen. In UUHL wurde zusätzlich auch eine land-/seewärtige Komponente sichtbar (Abb. 9). In STEC kam es innerhalb von knapp 16 Monaten zu einer deutlichen Verdriftung in Richtung Westen, die mit der westlich gerichteten Hauptströmung des Seerheins in Verbindung gebracht wird (Abb. 9).

ÖKOLOGISCHE VERTRÄGLICHKEIT DER EROSIONSSICHERUNGSMASSNAHMEN

Die Experimente zum Sohltransport haben ergeben, dass Material oberhalb der Mittelkies-Fraktion ($\varnothing > 6,3$ mm) nur in sehr geringer Masse und Grobkiese bzw. Gerölle ($\varnothing > 35,5$ mm) praktisch überhaupt nicht transportiert werden. In Übereinstimmung damit erwiesen sich die Erosionsschutzmassnahmen der Stationen SIPP, KRAH und STEC, die 2010, 2011 und 2013 visuell kontrolliert wurden, als bautechnisch stabil und nicht erosionsgefährdet.

Auf den neu geschaffenen Schüttungsflächen konnte sich innerhalb von 9 Monaten (erstes Monitoring) aufgrund der geringen Verfüllung des Porenraums mit Feinsediment (Kolmation) noch keine Unterwasservegetation entwickeln (Ostendorp *et al.* 2013). Auf den älteren Flächen (ERMW) war die Armeleuchteralgen-Vegetation auf Bereiche mit hohem Feinsedimentanteil beschränkt. Der Ausfall der Unterwasservegetation als Strukturelement und Lebensraum führte zu einer beträchtlichen Verringerung der flächenbezogenen Individuendichte der Wirbellosenfauna verglichen mit unbeeinflussten, vegetationsbedeckten Standorten der Umgebung.

Wie die Sedimentfallen-Experimente gezeigt haben, kommt es nur sehr langsam zu einer Verfüllung des Porenraums. Bei einer Sedimentzuwachsrate von 1,7 bzw. 2,8 mm (KRAH, SIPP) würde es rechnerisch rd. 25 bis 30 Jahre dauern, bis sich ein 0,25 m mächtiger Schüttungskörper mit einer mittleren Porosität von 32,5 % verfüllt hätte. Wir empfehlen für zukünftige Massnahmen die Förderung der Kolmation durch Verwendung eines Schüttungsmaterials mit beträchtlichem Feinkies- und Grobsandanteil. Durch die rasche Kolmation soll sich das Schüttungs-substrat möglichst rasch an die Verhältnisse naturbelassener Sedimentoberflächen angleichen, so dass die Nachteile, v. a. die fehlende Wasserpflanzen-Bedeckung, gefolgt von einer verringerten Wirbellosen-Dichte, minimiert werden.

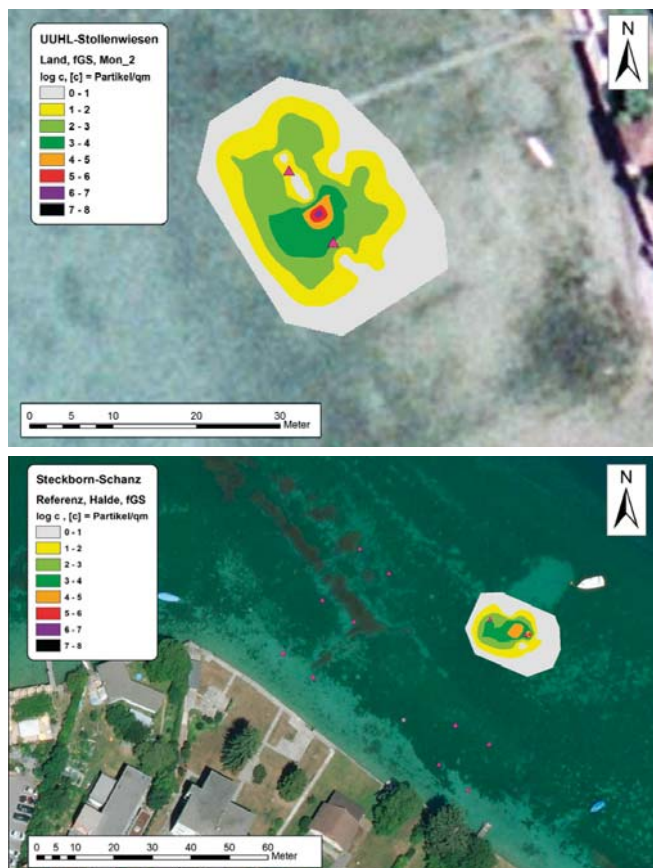


Abb. 9 - Transport der Sand-Tracer (Fraktion gFS, 0,8 - 0,9 mm): oben - Station UUHL, Bereich „Mitte“ nach 34 Monaten (07.05.2010 bis 05.03.2013); unten - Station STEC, Bereich „Halde“ nach 16 Monaten (17.11.2011 bis 20.03.2013); dargestellt ist der \log_{10} der Partikelkonzentration (# m⁻²); die roten Dreiecke markieren die Enden der Vermessungsbezugsstrecke (Startposition).

Eine weitere Überlegung ist, ob bei grossflächigen Vorhaben nicht vorrangig mit Wabenschüttungen (z. B. SIPP) anstatt mit Flächenschüttungen (z. B. KRAH) gearbeitet werden sollte. Dies hätte neben Kostenvorteilen auch ökologische Vorteile, da die Unterwasserpflanzen- und die Wirbellosen-Besiedlung in den Wabeninnenflächen denen der naturbelassenen Flächen ähnlich ist. Für einen Teil der Gesamtmaßnahme könnten also die oben beschriebenen negativen ökologischen Folgen vermieden werden.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Durch die Kombination aus Freilandmessungen (Wellenfeld, Resuspension, sohlnahe Strömungsgeschwindigkeiten, Sohltransport) und Modell-Simulationen konnten einige ursächliche Faktoren der Erosion von prähistorischen Unterwasserdenkmälern am Bodensee-Ufer identifiziert und erklärt werden. Wind- und Schiffswellen tragen im Jahresmittel 2 bis 8 $W\ m^{-1}$ (Wellenenergiefluss) in die untersuchten Uferzonen ein und erzeugen bodennahe Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 1,2 $m\ s^{-1}$ (Windwellen) bzw. 0,4 $m\ s^{-1}$ (Schiffswellen), wodurch Silte, Sande und Kiese mit einem Äquivalentdurchmesser von bis zu 10-20 mm mobilisiert werden können. Detaillierte Langzeit-Simulationen ermöglichen Rückschlüsse auf das Gefährdungspotential der Bodenseeufer gegenüber Partikelresuspension. Diese Modellergebnisse konnten durch Sohltransport-Messungen im Freiland weitgehend bestätigt werden. Es zeigte sich, dass innerhalb des Versuchszeitraums von knapp 3 Jahren nur

Tracer-Partikel bis etwa 3,5 mm in nennenswertem Umfang verlagert wurden. Grobkiese und kleine Gerölle wurden nur über Distanzen bis etwa 1,5 m bewegt. In den Sedimentfallen, mit denen die Porenraumverfüllung der Erosionsschutzmassnahmen (Grobkies-/Geröllschüttungen) simuliert wurde, sammelten sich überwiegend Grobsilte und Feinsande (0,035 bis 0,112 mm) an, von denen ein Teil vermutlich direkt aus der biogenen Karbonatproduktion der Umgebung stammt. Die Erosionsschutzmassnahmen erwiesen sich als bautechnisch stabil und nicht erosionsgefährdet. Sie sind trotz des geringen Fortschritts der Porenraumverfüllung (1,86 bis 2,99 $kg\ m^{-2}$ Trockenmasse innerhalb von 9 Monaten) ökologisch verträglich.

DANKSAGUNG

Wir danken den Wissenschaftlichen Werkstätten der Universität Konstanz für die Entwicklung der Drucksensoren, des Trübe-Loggers und der Geröll-Tracer. Dank gilt auch Christian Seibt, Beatrix Rosenberg, Josef Halder, Thomas Gretler, John Schneider und Christian Schmidt sowie den Tauchequipen des Landesamts für Denkmalpflege Baden-Württemberg und des Amts für Archäologie des Kt. Thurgau unter der Leitung von Wolfgang Hohl bzw. Matthias Schnyder, ausserdem Martin Wessels und seinen Mitarbeitern am Institut für Seenforschung (ISF) der LUBW für die Durchführung von Korngrössenanalysen und die gute Kooperation während der gemeinsamen Messkampagnen. Dynamische Windfelder wurden durch MeteoSchweiz, Michael Sprenger und Michael Graf bereitgestellt.

Literatur

- BREM (H.), EBERSCHWEILER (B.) UND SCHLICHOTHERLE (H.) 2013.** - Gefährdetes Kulturgut im Bodensee und Zürichsee. - In: BREM (H.), EBERSCHWEILER (B.), GRABHER (G.), SCHLICHOTHERLE (H.) UND SCHRÖDER (H. G.) Hrsg. *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms „Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein“ zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser.* Bregenz, Vorarlberg Museum, S. 15-24 (Vorarlberg Museum Schriften 1).
- CERC 2002.** - *Shore protection manual: Volume I.* Vicksburg, Mississippi, US Army Coastal Engineering Research Center (Books for Business).
- HOFMANN (H.) 2007.** - *Characteristics and implications of surface gravity waves in the littoral zone of a large lake (Lake Constance)* PhD Thesis. Universität Konstanz, 136 S. ISBN:978-3-86727-714-3.
- 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, S. 368-380.
- 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, 9, 12 S., W09505.
- 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.), SCHLICHOTHERLE (H.) UND SCHRÖDER (H. G.) Hrsg. *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms „Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein“ zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser.* Bregenz, Vorarlberg Museum, S. 37-51 (Vorarlberg Museum Schriften 1).
- OSTENDORP (W.) 2013.** - Erosionsinstabile Sedimentfraktionen in den Unterwasserdenkmal-Stationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sippligen-Osthafen am Bodensee. In: BREM (H.), EBERSCHWEILER (B.), GRABHER (G.), SCHLICHOTHERLE (H.) UND SCHRÖDER (H. G.) Hrsg. *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms „Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein“ zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser.* Bregenz, Vorarlberg Museum, S. 67-77 (Vorarlberg Museum Schriften 1).
- OSTENDORP (W.) UND HÄRTER (C.S.) 2013.** - Sohltransport in der Flachwasserzone des Bodensees: Methodenentwicklung und erste Ergebnisse. - In: BREM (H.), EBERSCHWEILER (B.), GRABHER (G.), SCHLICHOTHERLE (H.) UND SCHRÖDER (H. G.) Hrsg. *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms „Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein“ zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser.* Bregenz, Vorarlberg Museum, S. 79-93 (Vorarlberg Museum Schriften 1).
- 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.), SCHLICHOTHERLE (H.) UND SCHRÖDER (H. G.) Hrsg. *Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms „Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein“ zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser.* Bregenz, Vorarlberg Museum, S. 149-170 (Vorarlberg Museum Schriften 1).
- SCHÜNEMANN (B.) 1993.** - *Litoralsedimente des Bodensees: Mineralogie - CS Analytik - Granulometrie* (Sedimentuntersuchungen im Rahmen der Kartierung der Makrophytenvegetation des Bodensees 1993). Langensargen, Institut für Seenforschung, 146 S.