

Erosionsinstabile Sedimentfraktionen in den Unterwasserdenkmal-Stationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen am Bodensee

Wolfgang Ostendorf¹

Anlässlich von Erosionsschutzmaßnahmen in zwei Unterwasserdenkmalen des UNESCO-Welterbes in der Flachwasserzone des Überlingersees (Bodensee) wurden Sedimentfallen (Container 0,35 × 0,26 × 0,14 m, L × B × H) in den Schüttungskörper eingesetzt, die mit originalem Schüttungsmaterial (Grobkies, Geröll) bekannter Menge gefüllt waren. Die Fallen dienten zur Simulation der standörtlichen Sedimentationsbedingungen. Nach neunmonatiger Expositionsdauer wurden die Container geborgen und einer erneuten Korngrößenanalyse unterzogen. In den Behältern hatte sich Feinmaterial v.a. im Korngrößenbereich 0,035 bis 0,112 mm (Grobsilt, Feinsand) abgelagert. Grobsilte und Feinsande kommen auch in den umgebenden Oberflächensedimenten vor, waren 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. Die Sedimentationsraten lagen bei 1,86 bzw. 2,99 kg Trockenmasse/m² innerhalb von 9 Monaten (Sedimentzuwachsrate 1,7 bzw. 2,8 mm). Die deutlich höheren Massenanteile an organischer Substanz und Gesamt-Carbonat lassen vermuten, dass ein Teil des sedimentierten Materials direkt aus der Bioproduktion der Umgebung (biogene Carbonatfällung der Armleuchteralgen, *Chara* sp.) und des Makrozoobenthos in den Fallen (Molluskenschalen, u.a. *Dreissena polymorpha*) stammt. Diese Ergebnisse liefern wichtige methodische Hinweise für die weitere Entwicklung von litoralen Sedimentfallen und für die Herkunftsanalyse der Fallsedimente.

»Erosion sensitive grain size classes in endangered underwater monument sites in the littoral of Lake Constance (Germany).«

In two UNESCO World Heritage pile dwelling sites on the littoral platform of Lake Überlingersee (Lake Constance) 9 containers, 35 × 26 × 14 cm, l × w × h, were inserted in the gravel body of an erosion protection fill to shed light on the erosional processes which threaten these prehistoric monuments. The containers were filled with known amounts of the original filling material to simulate the on site sedimentation conditions in the bulk material. After nine months of exposure coarse silt and fine sand (0.035 to 0.112 mm) had accumulated. Compared with top sediments in the surrounding area these grain size classes were considerably over-represented.

Coarse silt and fine sand were therefore assumed to be the fractions most susceptible to erosional processes including suspension transport. This is largely in compliance with predictions from the Hjulström-Sundborg diagram. Sedimentation rates of 1.86 and 2.99 kg d. m. m⁻² (1.7 and 2.8 mm) in nine months were calculated. Carbonate and organic matter contents were much higher than in the surrounding sediment surface so that a significant amount of the sedimented matter was assumed to come directly from biogenous products outside the traps (photosynthetic calcite production by stoneworts, *Chara* sp.) or from the top layer of the traps (snails and sessile zebra mussels, *Dreissena polymorpha*). The preliminary results of this study provide useful information both for the development of sediment traps in the turbulent littoral zone of lakes, and for the provenance analysis of sedimented matter.

Keywords: sediment trap, carbonate, erosion protection measure, UNESCO World Heritage, pile dwellings.

1. Einleitung

Die flächenhafte Erosion, wie sie im Bereich zahlreicher Unterwasserdenkmale am Bodensee beobachtet wird, beinhaltet die Mobilisierung und den Abtransport von Feststoffen der Sedimentoberfläche unter dem Einfluss von Wellen und Strömungen (Übersicht bei Carter 1988, 83ff.). Ob und in welchem Umfang Partikel bewegt werden können, hängt unter sonst gleichen Bedingungen von deren Sinkgeschwindigkeit ab, die innerhalb einer Materialklasse mit wachsendem Äquivalentdurchmesser zunimmt. Partikel mit kleinem Äquivalentdurchmesser, deren Sinkgeschwindigkeit klein ist im Vergleich zur turbulenten Geschwindigkeit des sie umgebenden Wasserkörpers, werden in die Wassersäule aufgenommen und können durch großräumige Strömungen fortbewegt werden (Suspensionstransport). Welche Korngrößenklassen, durch die bodennahen Scherkräfte bewegt, die laminare Grenzschicht verlassen und in den turbulenten Wasserkörper aufgenommen werden können, hängt von zahlreichen hydraulischen, sedimentologischen und (mikro-)topographischen Merkmalen der Sedimentoberfläche ab, die zudem breitskaligen zeitlichen Veränderungen unterliegen und daher im konkreten Fall schwer nachzuerfolgen sind.

1 Anschrift des Verfassers: Wolfgang Ostendorf, Dr., Priv.-Doz., Limnologisches Institut der Universität Konstanz, 78457 Konstanz, Deutschland, wolfgang.ostendorf@uni-konstanz.de

Im vorliegenden Zusammenhang sind nicht die Elementarprozesse oder die numerische Modellierung einzelner Ereignisse von Interesse, sondern die empirisch darstellbaren Resultate, die sich an bestimmten Uferabschnitten (die Unterwasserdenkmal-Stationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen) nach Ablauf eines längeren Zeitraums (November 2009 bis Juli 2010) ergeben haben.

Um die Äquivalentdurchmesser der erosionsinstabilen Fraktionen zu ermitteln, sind neben theoretischen hydrodynamischen Ansätzen (Übersicht z.B. Merritt et al. 2003; U.S. Department of the Interior 2006) mehrere empirische Ansätze möglich, z.B. die Analyse der Korngrößenverteilung in der Wassersäule (Suspensionsfracht) oder in Sedimentfallen sowie das Sediment-Tracking, d.h. die Dokumentation der Verlagerung von Tracer-Sedimentfraktionen (hierzu vgl. Ostendorp/Härter 2013). Die Ergebnisse müssen dabei stets mit dem Korngrößenspektrum der Oberflächensedimente im mutmaßlichen Liefergebiet verglichen werden.

Für die vorliegende Arbeit wurden Sedimentfallen ausgebracht, deren hydraulische Eigenschaften denen lokaler Geröll- und Kiessedimentoberflächen nachgebildet wurden, so dass sie die tatsächlichen Ablagerungsbedingungen im engeren Untersuchungsgebiet widerspiegeln. Die innerhalb von etwa neun Monaten Expositionszeit eingetragenen Feststoffe wurden analysiert (Korngrößenverteilung, org. Substanz, Carbonat) und mit den Oberflächensedimenten im mutmaßlichen Liefergebiet verglichen.

2. Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurden die Unterwasserdenkmal-Stationen Sipplingen-Osthafen und Litzelstetten-Krähenhorn im Überlingersee (Bodensee) ausgewählt, die im Oktober 2009 mit einer Erosionssicherung versehen worden waren. Beide Stationen zählen zum UNESCO-Welterbe »Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen« (UNESCO 2011). Die denkmalpflegerische Sicherungsmaßnahme besteht in einer Geröll/Kiesschüttung aus gewaschenem Wandkies von etwa 0,25 m Mächtigkeit, die auf einem Teil des erosionsgefähr-

deten Kulturschichtareals als »Wabenschüttung« (Sipplingen-Osthafen) oder als flächige Schüttung (Litzelstetten-Krähenhorn) eingebracht worden waren (Köninger 2009). Die Schüttungsriegel in Sipplingen besitzen eine Breite von etwa 5 bis 6 m bei einer uferparallelen bzw. uferqueren Länge von 55 und 70 m. Die 2009 noch unvollständige Flächenschüttung in Litzelstetten-Krähenhorn erstreckt sich uferparallel auf ca. 75 m Länge bei einer Breite von etwa 10 bis 15 m.

Beide Stationen waren Teil des gemeinsamen Mess- und Untersuchungsprogramms innerhalb des Interreg IV-Projekts »Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee«, in dem Wellen, Strömungen, Partikeltransport, topographische Veränderungen, Erosionsraten sowie die ökologischen Auswirkungen der Erosionsschutzmaßnahmen untersucht wurden (vgl. Brem et al. 2013).

3. Methoden

Anlässlich der Schüttungsarbeiten wurden vier (Sipplingen-Osthafen) bzw. fünf (Litzelstetten-Krähenhorn) nestbare Stapelcontainer (0,35 × 0,26 × 0,14 m, L × B × H, Öffnungsfläche 0,0882 m²) mit originalem Schüttungsmaterial oberflächenbündig gefüllt. Im Labor wurde das Material der einzelnen Container nass gesiebt, um die Kornmassen (Trockensubstanz, g TS) differenziert nach Korngrößenfraktionen zu ermitteln. Danach wurden die Container erneut mit dem ursprünglich enthaltenen Material befüllt (Abb. 1a). Am Ende der Schüttungsarbeiten (Ende Oktober 2009) wurden die Container verlustfrei in die Schüttungsoberfläche eingesetzt (Abb. 2a und b). Um den Arbeitsvorgang zu erleichtern, waren bereits vorher gleichartige Container eingebaut worden (Abb. 1b), in die die befüllten Container eingesetzt wurden, so dass ihre Oberfläche bündig mit der umgebenden Schüttungsoberfläche abschloss. Die vier Container der Wabenschüttung in Sipplingen-Osthafen wurden an verschiedenen Ecken der Schüttungsriegel in größerer Entfernung zueinander eingebracht (Abb. 2b), während sich die fünf Container in Litzelstetten-Krähenhorn auf einer Fläche von rd. 25 × 10 m



Abb. 1: Container zur Ermittlung des Feinmaterialeintrags: (a) links – fertig befüllter Container an Land, (b) rechts – Container unter Wasser unmittelbar vor dem Einsetzen in den Platzhalter-Container; die Kies- und Geröll-Oberfläche schließt ebenerdig mit der Umgebung ab (Foto: J. Köninger).



Abb. 2.: Lage der Container in den Schüttungsflächen der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (a – links) und Sipplingen-Osthafen (b – rechts, die Schüttung war zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht endgültig fertiggestellt); Quelle: RPS/LAD, Luftbildbefliegung durch O. Braasch am 19.10.2009 (Sipplingen) und am 5.11.2009 (Krähenhorn).

in einem Abstand von 5 bis 10 m verteilt (Abb. 2a). Die Oberfläche von drei der vier Container in Sipplingen-Osthafen lag zwischen 393,70 m und 394,03 m ü. NN, ein weiterer Container befand sich bei 393,40 m ü. NN. Die Container in Litzelstetten-Krähenhorn lagen auf 393,54 m bis 393,97 m ü. NN. Die Container befanden sich somit rd. 1,3 m unter mMW bzw. 0,6 m unter mNW (mittleres Mittelwasser, mMW: 395,20 m, mittleres Niedrigwasser, mNW: 394,50 m ü. NN Amsterdam, Periode 1981–2009). Alle Container waren während der gesamten Expositionszeit wasserbedeckt.

Am 22.07. (Litzelstetten-Krähenhorn) bzw. 24.07.2010 (Sipplingen-Osthafen) wurden die Container verlustfrei geborgen und ihr Inhalt in geeignete Gefäße umgefüllt. Die gesäuberten Behältnisse wurden wieder an Ort und Stelle eingesetzt, so dass sie für eine weitere Beprobung zur Verfügung stehen. Das Material wurde im Labor gesiebt und getrocknet, so dass die ermittelten Massen der einzelnen Korngrößenfraktionen mit der Ausgangssituation unmittelbar vergleichbar waren. In den Fraktionen 0,63–1,12 mm (feiner Grobsand, fGS) bis 11,2–20,0 mm (grober Mittelkies, gMG) wurden durch visuelle Schätzung die Anteile der verschiedenen Materialklassen ermittelt. In den Fraktionen 0,063–0,112 mm (feiner Feinsand, fFS) bis 1,12–2,0 mm (grober Grobsand, gGS) sowie in den vereinigten Fraktionen <0,2 mm (Ton+Silt+Feinsand) wurden die Massenanteile an organischer Substanz (OS, mg g⁻¹ TS) und an Gesamt-Carbonat (GC, mmol g⁻¹ TS) bestimmt. Die Ergebnisse hieraus wurden mit den entsprechenden Daten der Oberflächensedimente aus der weiteren Umgebung der Container, d.h. dem mutmaßlichen Liefergebiet der Suspensionsfracht, verglichen.

Die Exponierung und Bergung der Container wurde von archäologischen Forschungstauchern vorgenommen. Die Korngrößenanalyse der Sand-, Kies- und Geröllfraktionen sowie die Bestimmung der organischen Substanz (OS, als Glühverlust) und des Gesamt-Carbonats (GC, durch Umsetzung mit HCl, c = 1 mol L⁻¹ und Rücktitration mit NaOH, c = 0,2 mol L⁻¹) wurden nach Ostendorp/Blum (1998) durch-

geführt. Zur Korngrößenbestimmung im Bereich <0,63 mm wurde eine Stichprobe der bergfeuchten Feinsediment-Probe ohne Wasserzugabe durch ein 0,63-mm-Sieb geführt und bis zur weiteren Aufarbeitung mit dem Saturn DigiSizer® 5200 von MICROMERITICS® am Institut für Seenforschung der LUBW in Langenargen kühl und feucht aufbewahrt. Die Sediment-Stichprobe wurde 2 bis 3 Tage lang mit 15%iger H₂O₂ dispergiert und dann entsprechend der Standard-Betriebsanweisung »V3-Laseroptische Korngrößenanalyse« gemessen. Die Bezeichnung der Kornfraktionen folgt der DIN 4022 bzw. der EN ISO 14688 und EN ISO 14689-1, wobei die dort angegebenen Fraktionen noch einmal in eine Fein- und eine Grobfraction unterteilt wurden (vgl. Ostendorp/Blum 1998, Tab. 6a). Weiterhin wurde die Fraktion >63 mm im Unterschied zu den genannten EN-ISO-Normen mit der Bezeichnung »Gerölle« (63–200 mm) belegt.

4. Ergebnisse

4.1. Einbringung, Bergung und Zustand der Container

Dank des schon vorab eingebauten Platzhalter-Containers (Abb. 1b) konnten die befüllten Container problemlos und ohne Materialverluste eingebracht und geborgen werden. Während der gesamten Expositionsdauer waren die Container wasserbedeckt, wobei die Höhe der minimalen Wasserbedeckung Ende Februar 2010 bei etwa 0,8 m, die der maximalen Wasserbedeckung Ende Juni 2010 bei rd. 2,6 m lag. Die Oberkanten der meisten Container lagen genau ebenerdig zu der umgebenden Kiesschüttung (Abb. 3b), so dass dem rollend-rutschend-hüpfenden Transport von Kiesen auf der Substratoberfläche (Sohltransport) sowie dem Suspensions-transport über die Wassersäule kein Hindernis im Weg stand.

Auf der Substratoberfläche in den Sedimentcontainern hatten sich die Grobkiese und Gerölle angereichert (»Geröllpflaster«, vgl. Parker/Klingeman 1982), während sich die feineren Kiese offenbar in das Lückensystem abgesetzt hatten (Abb. 4a). Die Substratoberfläche war stark mit der sessilen Dreikantmuschel (*Dreissena polymorpha* PALLAS 1771)

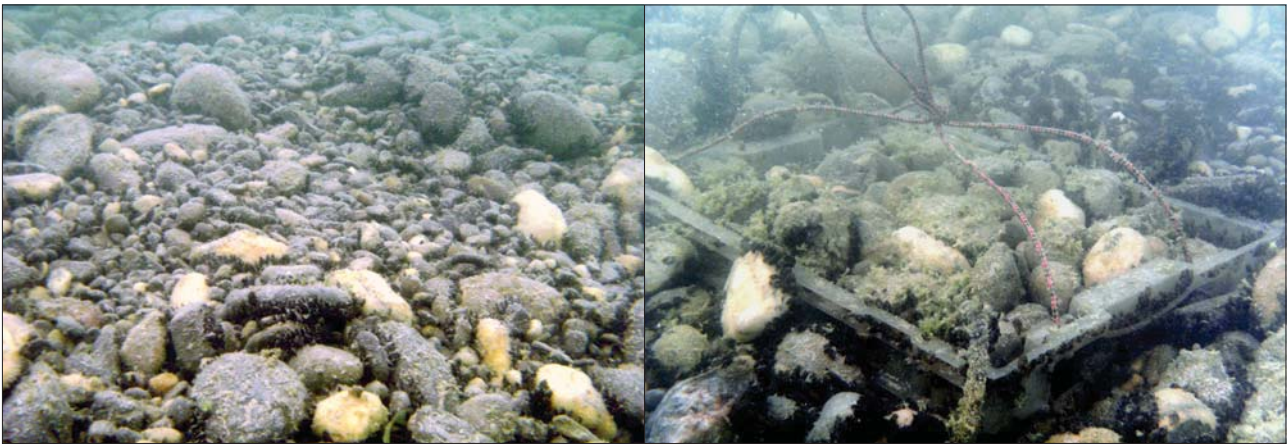


Abb. 3: Schüttungsfläche in der Station Litzelstetten-Krähenhorn; (a) links – Oberfläche, deutlich zu sehen ist der teils starke Besatz mit Dreikantmuscheln bereits im ersten Jahr nach der Herstellung; (b) rechts – Container, die Kies/Geröll-Oberfläche im Container liegt auf einem Niveau mit der Umgebungsoberfläche; Fotos vom 22.07.2010.

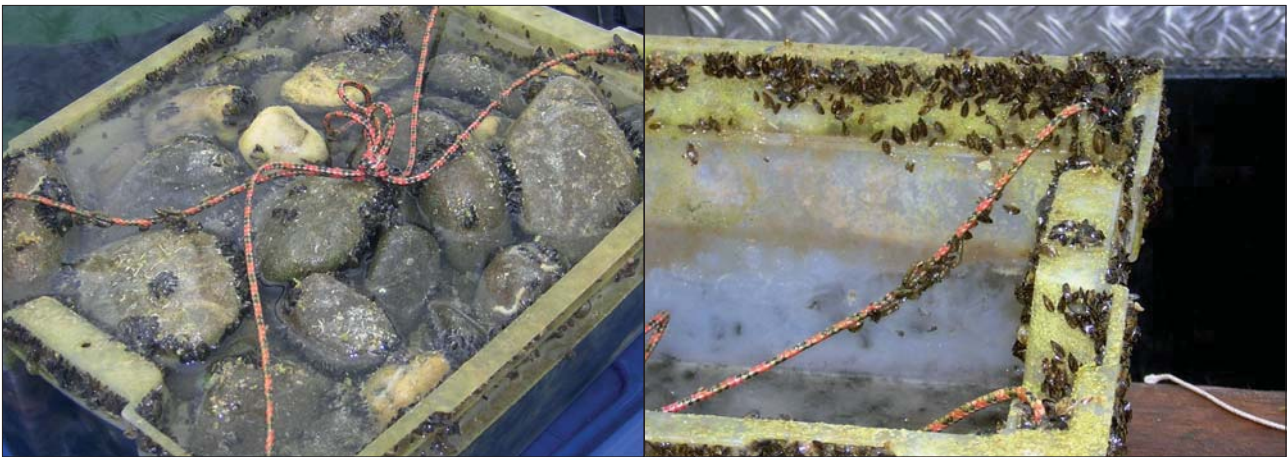


Abb. 4: (a) links – gebogener Container (Sipplingen-Osthafen): an der Oberfläche sind nur Grobkiese und Gerölle zu erkennen (vgl. auch Abb. 1); (b) rechts – geleerter Container mit anhaftenden Dreikantmuscheln, die bis zu einer Tiefe von etwa 3 cm vordringen (Sipplingen-Osthafen); Fotos vom 24.07.2010.

überwachsen, während ein Makrophyten-Bewuchs vollständig fehlte (Abb. 3a). Auffällig war, dass sich die Dreikantmuscheln vorwiegend auf den Stirnseiten der Gerölle angesiedelt hatten, während die flach gewölbten Oberseiten weitgehend frei geblieben waren. Die oberflächennahe *Dreissena*-Besiedlungsschicht war etwa 3 cm mächtig (Abb. 4b); unterhalb dieser Schicht fanden sich Gerölle und Kiese mit schwarzen Eisensulfid-Überzügen, die sich im anaeroben Milieu niedergeschlagen hatten.

4.2. Korngröße

Das originale Schüttungsmaterial war gekennzeichnet durch eine Dominanz von Mittelkies (MG), Grobkies (GG) und feinen Geröllen (fX), denen geringe Anteile an Sand beigemischt waren. Dem Schüttungsmaterial fehlten Feinbestandteile im Silt- und Tonbereich völlig (Abb. 5). Nach Ende der etwa neunmonatigen Expositionszeit waren die Mengen der Gerölle und Kiese praktisch unverändert, während die Feinmaterial-Mengen unterhalb der groben Mittelsand-Fraktion (gMS, 0,355–0,63 mm) deutlich angestiegen waren. Die Silt- und Ton-Anteile (<0,063 mm) waren erst neu hinzugekommen; sie fehlten im originalen Schüttungsmaterial.

In der Abbildung 6 sind die Massenbilanzen der Container zusammengestellt. Die Verteilungen der Massenbilanzen entlang der Korngrößenfraktionen waren in beiden Stationen ähnlich. Sie lassen sich in drei Abschnitte gliedern:

- 1 Im Bereich der Fraktionen Ton (T, <0,002 mm) bis feiner Mittelsand (fMS, 0,200–0,355 mm) war die Materialbilanz signifikant positiv, d.h. das Material wurde von außen in die Container eingetragen. Auffällig war der außerordentlich hohe Eintrag von grobem Grobsilt (gGU, 0,035–0,063 mm) und feinem Feinsand (fFS, 0,063–0,112 mm).
- 2 Im Bereich der Grobsande und Feinkiese (gMS bis gFG) war die Materialbilanz nicht signifikant von Null verschieden, d.h. netto wurde wahrscheinlich weder Material eingetragen noch ausgetragen. Die Fehlerbeträge waren recht gering; sie dürften auf die begrenzte Genauigkeit beim Klassiervorgang (Siebgüte) zurückgehen.
- 3 Im Bereich der Mittel- und Grobkiese und der Gerölle (fMG bis fX) waren die Materialbilanzen ebenfalls nicht signifikant von Null verschieden, allerdings waren die Varianzen erheblich größer, da die Einzelkörner bedeutend schwerer sind als in den feineren Fraktionen.

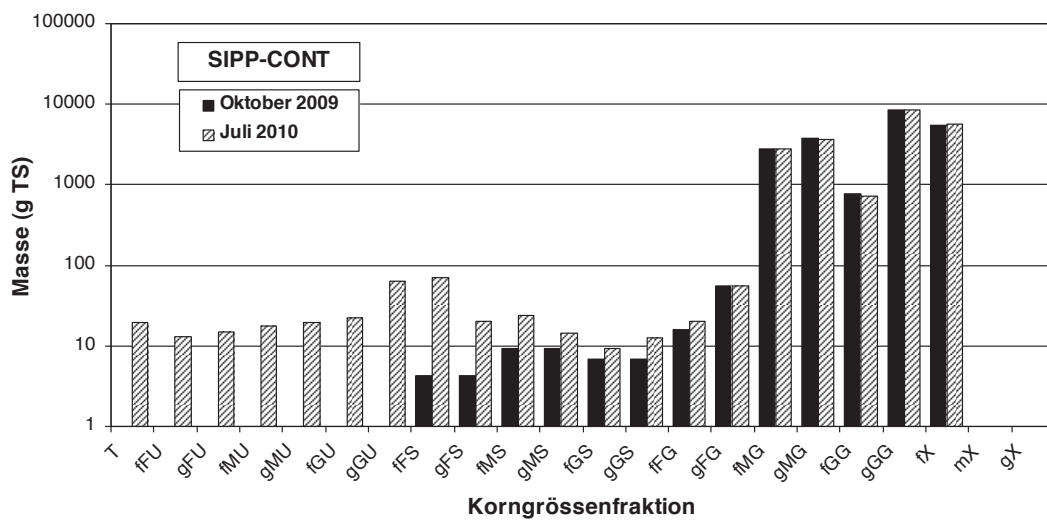
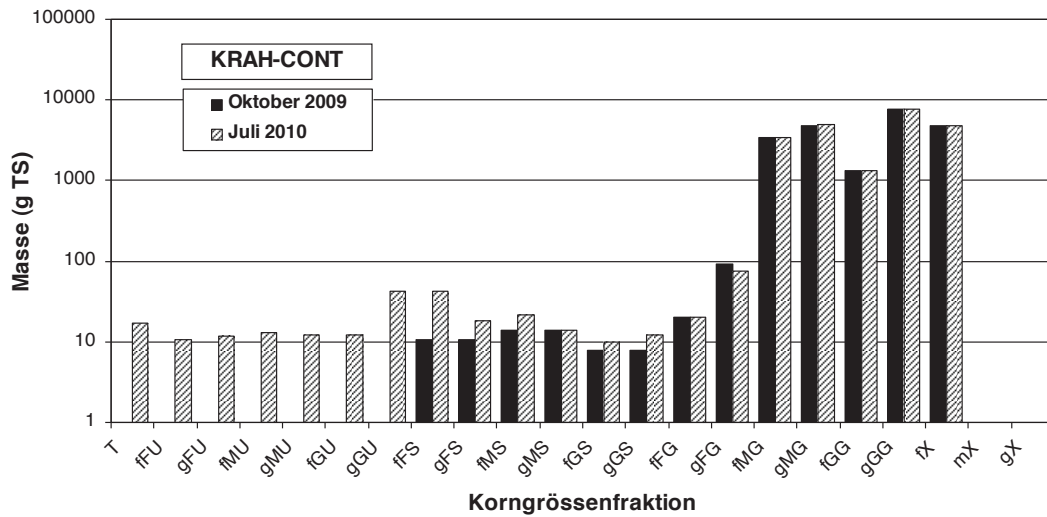


Abb. 5: Materialmengen (g TS) der einzelnen Fraktionen in den Containern der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (oben) und Sipplingen-Osthafen (unten) unmittelbar vor der Ausbringung im Oktober 2009 und nach der Bergung im Juli 2010.

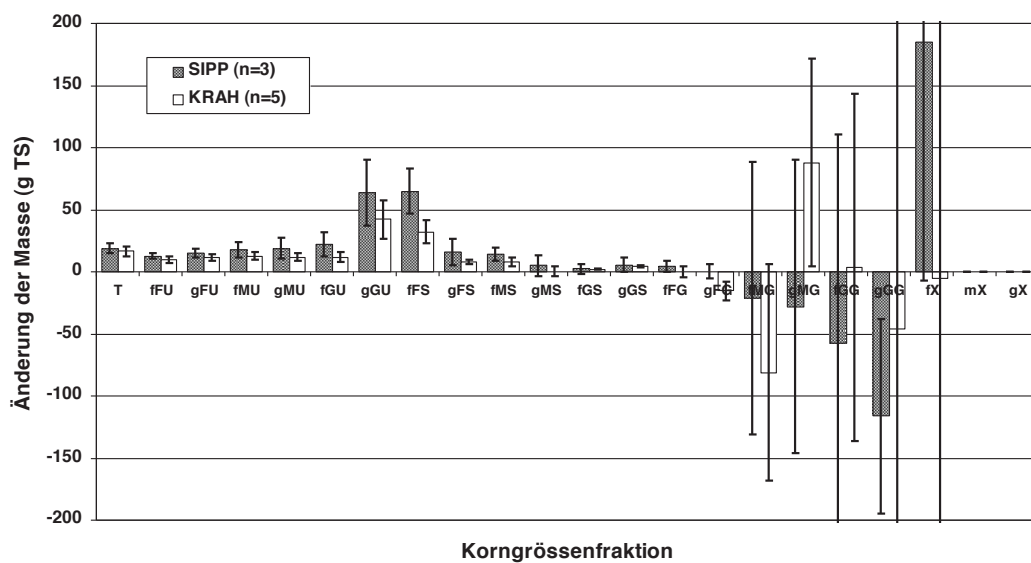


Abb. 6: Änderungen der Materialmengen (g TS) der einzelnen Fraktionen in den Containern der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH) und Sipplingen-Osthafen (SIPP); dargestellt sind die mittleren Materialzu- oder -abnahmen im Zeitraum zwischen Oktober 2009 und 22./24. Juli 2010 sowie die zugehörigen Standardabweichungen für n = 3 (SIPP) bzw. n = 5 (KRAH).

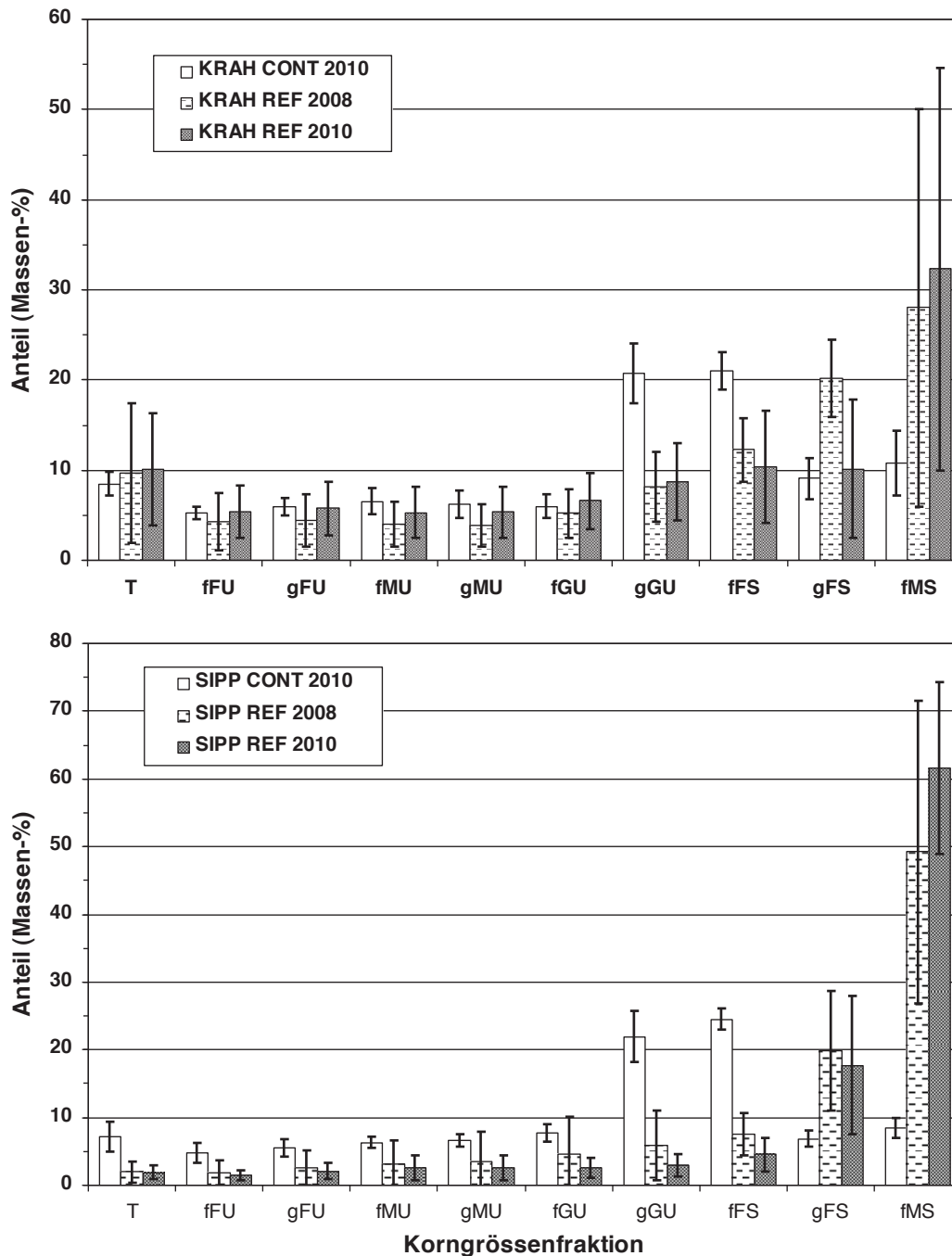


Abb. 7: Vergleich der Massenanteile der Kornfraktionen Ton (T) bis feiner Mittelsand (fMS) in den Containern (CONT) mit denen in den benachbarten Oberflächensedimenten der Referenzflächen in den Jahren 2008 und 2010 (REF) der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH, oben) und Sipplingen-Osthafen (SIPP, unten). Die Summe der Massenanteile von T bis fMS wurde auf 100 % gesetzt.

Um prüfen zu können, inwieweit die Materialdifferenzen im Grobkies- und Geröll-Bereich methodisch bedingt sind, wurden die Körner in jedem Container vor dem Einbringen und nach der Bergung händisch ausgezählt. Bei einer Gesamtzahl von 100 bis 150 Körnern ergaben sich im Allgemeinen Differenzen von -2 bis +3 Körnern je Container. Änderungen in dieser Größenordnung können methodisch bedingt sein, indem die gleichen Körner bei der Siebung vor bzw. nach der Exposition unterschiedlichen Fraktionen zugerechnet wurden (begrenzte Siebgüte). Lediglich der landseits gelegene Container SIPP_02_NW wies eine Zunahme von 40 Körnern v.a.

der Fraktion gGG (35,5–63 mm) auf. In diesem Fall wurde das Material wahrscheinlich durch Sohltransport eingetragen.

4.3. Vergleich mit den Sedimentoberschichten der Umgebung

Ein Vergleich mit den Kornklassenverteilungen der umgebenden naturbelassenen Oberflächensedimente ergab, dass in den Containern bestimmte Korngrößenklassen über- oder unterrepräsentiert waren, während andere in den Anteilen vorlagen, in denen sie auch in den Oberflächensedimenten angetroffen wurden (Abb. 7).

	SK (%)	MS (%)	DR (%)	HK (%)	DE (%)	TR (%)	BK (%)
KRAH – CONT							
fGS, 0,63–1,12 mm	29 ± 4	59 ± 5	0 ± 0	0 ± 0	12 ± 3	0 ± 0	0 ± 0
gGS, 1,12–2,0 mm	49 ± 12	25 ± 11	7 ± 4	0 ± 0	15 ± 8	4 ± 2	0 ± 0
fFG, 2,0–3,55 mm	57 ± 24	31 ± 30	4 ± 9	2 ± 3	2 ± 2	3 ± 2	0 ± 0
gFG, 3,55–6,3 mm	83 ± 12	12 ± 10	1 ± 2	3 ± 2	1 ± 2	0 ± 0	0 ± 0
fMG, 6,3–11,2 mm	99 ± 2	0 ± 0	1 ± 2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
gMG, 11,2–20 mm	100 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
fGG, 20–35,5 mm	100 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
gGG, 35,5–63 mm	100 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SIPP – CONT							
fGS, 0,63–1,12 mm	15 ± 10	8 ± 6	0 ± 0	23 ± 28	53 ± 25	0 ± 0	0 ± 0
gGS, 1,12–2,0 mm	22 ± 10	27 ± 3	2 ± 3	23 ± 13	22 ± 8	5 ± 5	0 ± 0
fFG, 2,0–3,55 mm	28 ± 26	4 ± 2	44 ± 37	10 ± 9	7 ± 7	8 ± 6	0 ± 0
gFG, 3,55–6,3 mm	50 ± 41	4 ± 1	42 ± 39	4 ± 2	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 0
fMG, 6,3–11,2 mm	92 ± 3	1 ± 1	4 ± 2	3 ± 1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
gMG 11,2–20 mm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
fGG, 20–35,5 mm	100 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
gGG, 35,5–63 mm	100 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Tab. 1: Zusammensetzung der Container-Sedimente in den Korngrößenfraktionen fGS bis gMG (0,63 bis 20 mm). Dargestellt sind die visuell geschätzten Volumenanteile in Prozent (Mittelwerte ± einf. Standardabweichung aus n = 5 [KRAH] bzw. n = 3 [SIPP] Schätzungen); SK – Steine+Kiese (silikatisch, Molasse-Zerfallsprodukte); MS – Mollusken+Molluskenschill (ohne Dreikantmuschel); DR – Dreikantmuschel-Schalen; HK – Holzkohlen, Holz, Keramik u.a. Kulturschichtreste; DE – Laub, org. Detritus, Algen-Reste, v.a. von Armelechteralgen; TR – Köcherfliegen-Larven, BK – biogene Kalkkonkretionen (Krümelkalke, Schneggli etc.).

So waren die Fraktionen grober Feinsand und feiner Mittelsand (gFS, 0,112–0,200 mm; fMS, 0,200–0,355 mm) in den Container-Sedimenten mit knapp 10 % bei Weitem unterrepräsentiert verglichen mit den Anteilen in den Umgebungssedimenten (ca. 45 % in Litzelstetten-Krähenhorn, ca. 75 % in Sipplingen-Osthafen). Dagegen waren der grobe Grobsilt (gGU) und der feine Feinsand (fFS) überrepräsentiert; hier waren die Anteile in den Containern etwa doppelt so hoch wie in den potentiellen Liefergebieten. Die feineren Kornfraktionen in den Containern entsprechen in etwa den Erwartungswerten: ihre Anteile lagen in der gleichen Größenordnung wie in den Umgebungssedimenten.

4.4. Materialklassen

Die Grob- und Mittelkies-Fraktionen der Container-Sedimente enthielten fast ausschließlich silikatisches Material, aus dem sich bereits das originale Schüttungsmaterial zusammensetzte. Weiteres Grobmaterial war während der Expositionszeit nicht hinzu gekommen (Tabelle 1).

In den Feinkies- und Grobsand-Fraktionen waren hohe Anteile an Mollusken (zumeist Gehäuse-schnecken) und Molluskenschill sowie an Schalen von Dreikantmuscheln enthalten. Die Schneckengehäuse setzten sich etwa zu gleichen Teilen aus autochthonem Material, d.h. Schnecken, die auf den Geröllen und Kiesen im Container gelebt hat-

ten, sowie aus allochthonem Material (verwitterte Gehäuse, die von außen eingetragen worden waren) zusammen. Die Schalenreste der Dreikantmuscheln stammten dagegen fast ausschließlich von lebenden Tieren, die sich zuvor auf den Geröllen und Kiesen im Container angesiedelt hatten (Abb. 3b, 4a). Da die Schalenvolumina aber im Vergleich zu den mineralischen Kiesen eine geringe Masse aufweisen, wird dieser Zugewinn in der Korngrößenverteilung der Abbildung 5 kaum sichtbar.

Außerdem waren in den feineren Fraktionen erhebliche Mengen an organischem Grobdetritus, z.B. Blatt- und Astreste von Gehölzen, vor allem aber Bruchstücke von Armelechteralgen enthalten. Die Container in Sipplingen enthielten darüber hinaus Kulturschichtreste, z.B. Holzkohlen, verwitterte Holzreste und Keramik-Bruchstücke. Letztere waren aber nicht sicher von Molasse-Zerfallsprodukten zu unterscheiden, so dass der Kulturschichtmaterial-Anteil wahrscheinlich überschätzt wurde. Biogene Krümelkalke, z.B. größere Aggregate von Calcit-Plaques oder Armelechteralgen-Krusten, konnten in den untersuchten Fraktionen nicht identifiziert werden, waren aber möglicherweise in den Mittel- und Feinsand-Fraktionen enthalten. Onkolithische Krümelkalke (»Schneggli«) sind in den Untersuchungsgebieten nicht verbreitet und wurden auch in den Proben nicht gefunden.

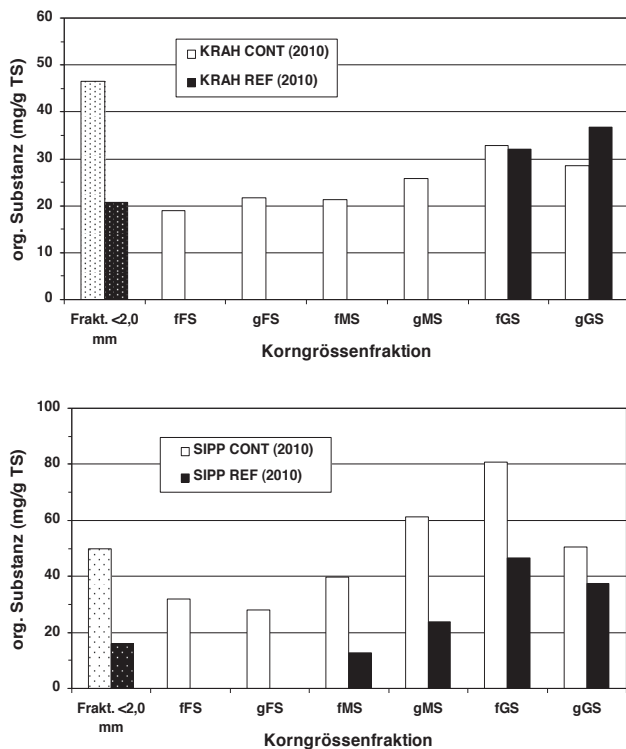


Abb. 8: Gehalte an organischer Substanz in der Trockensubstanz der Kornfraktionen fFS (0,063–0,112 mm) bis gGS (1,12–2,0 mm) der Container-Proben (CONT) und der Oberflächensedimente der Referenzflächen (REF) der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH, oben) und Sipplingen-Osthafen (SIPP, unten). Die Daten stammen aus vereinigten Materialproben von $n = 5$ (KRAH, SIPP-REF) bzw. $n = 3$ (SIPP-CONT) Einzelproben; linke Säulengruppe: Ergebnisse des vereinigten Gesamtmaterials <2,0 mm.

4.5. Massenanteile an organischer Substanz (OS) und Gesamt-Carbonat (GC)

In Abbildung 8 werden die Massenanteile an organischer Substanz (OS) in den Kornfraktionen fFS (0,063–0,112 mm) bis gGS (1,12–2,0 mm) in den Container-Proben mit den entsprechenden Werten der Umgebungssedimente verglichen. Für Sipplingen-Osthafen zeigte sich zunächst, dass die OS-Massenanteile der Container-Proben in allen Fraktionen größer waren als in denen der Umgebungssedimente. Das deutet darauf hin, dass in den Containern überproportional viel organischer Grobdetritus zur Ablagerung gekommen war. Die hohen Anteile an Armelechteralgen-Detritus (Materialklasse DE, Tab. 5) gerade in der fGS-Kornfraktion legen den Schluss nahe, dass die Überreste von Armelechteralgen wesentlich zum partikulären OS-Eintrag beitragen. Noch lebende Armelechteralgen-Rasen wiesen OS-Massenanteile von 240 ± 3 (Litzelstetten-Krähenhorn-REF) bzw. 258 ± 10 mg g⁻¹ TS (Sipplingen-Osthafen-REF) auf.

Die Massenanteile an OS wurden in den Container-Proben mit abnehmender Korngröße geringer, vermutlich, weil sich die Armelechteralgen-Reste noch nicht weit genug zersetzt und zerkleinert hatten. Auch in den Umgebungssedimenten nahmen die OS-Massenanteile in den feineren Sedimentfraktionen ab.

Für die Container-Proben der Station Litzelstetten-Krähenhorn zeichnete sich ein ähnliches Bild ab; allerdings

konnten hier aus technischen Gründen die entsprechenden Feinfraktionen der Umgebungssedimente nicht untersucht werden. Auffällig war die sehr hohe OS-Konzentration im Gesamtsediment (Ton+Silt+Sand-Fractionen), was darauf hindeutet, dass es im Silt- und Ton-Bereich Fraktionen mit vergleichsweise hohen OS-Massenanteilen geben muss.

Die Abbildung 9 stellt vergleichend die Gesamt-Carbonat-Massenanteile (GC) in den einzelnen Fraktionen der Container-Proben sowie der Oberflächensedimente der zugehörigen Referenzflächen dar. Bei einer durchschnittlichen Zusammensetzung der Seekreide von $(Ca_{0,96}Mg_{0,04})CO_3$ entspricht 1 mol CO₃²⁻ 99,46 g Ges.-Carbonat, so dass die in mmol g⁻¹ Asche angegebenen Konzentrationen mit 100 multipliziert die ungefähre Gesamt-Carbonat-Konzentration in mg g⁻¹ Asche ergeben.

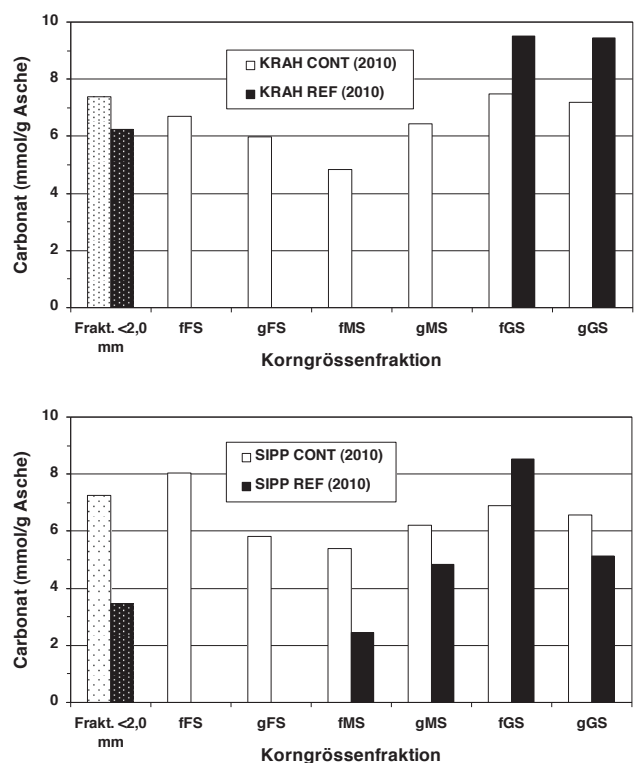


Abb. 9: Gehalte an Gesamt-Carbonat in der Asche der Kornfraktionen fFS (0,063–0,112 mm) bis gGS (1,12–2,0 mm) der Container-Proben (CONT) und der Oberflächensedimente der Referenzflächen (REF) der Stationen Litzelstetten-Krähenhorn (KRAH, oben) und Sipplingen-Osthafen (SIPP, unten). Die Daten stammen aus vereinigten Materialproben von $n = 5$ (KRAH, SIPP REF) bzw. $n = 3$ (SIPP CONT) Einzelproben; linke Säulengruppe: Ergebnisse des vereinigten Gesamtmaterials <2,0 mm.

Die Carbonat-Komponente stellte einen sehr großen Anteil des sedimentierten Materials und der Oberflächensedimente. In der Station Litzelstetten-Krähenhorn, die auf breiten Seekreidebänken liegt, betrug der Anteil rd. 60 bis 80 %. In der Station Sipplingen-Osthafen waren die Anteile im sedimentierten Material ähnlich hoch, in den natürlichen Oberflächensedimenten dagegen mit rd. 20 bis 40 % bedeutend geringer. Die Station liegt im Unterschied zu Litzelstetten-Krähenhorn auf einer Brandungsplattform der vergleichsweise kalkarmen Unteren Süßwassermolasse.

Die GC-Massenanteile des sedimentierten Materials zeigen eine für beide Stationen gleichlaufende Abhängigkeit von der Korngröße: Hohe GC-Werte wurden sowohl in der Grobsand-Fraktion (fGS, gGS) als auch in der feinen Feinsand-Fraktion (fFS) erreicht, während die dazwischen liegenden Kornfraktionen deutlich geringere GC-Massenanteile aufwiesen. In den Grobsand-Fraktionen war das Carbonat in den Container-Proben im Vergleich zu den Oberflächensediment-Proben leicht unterrepräsentiert, in den feineren Fraktionen dagegen deutlich überrepräsentiert (Sipplingen-Osthafen).

Typische carbonathaltige Komponenten waren die Mollusken und der Molluskenschill, die Dreikantmuschel-Schalen sowie die Armleuchteralgen-Rasen, deren Fragmente in den Fallensedimenten in großer Menge gefunden wurden (Tab. 1). Die GC-Massenanteile intakter Armleuchteralgenrasen betragen $9,58 \pm 0,10$ (Litzelstetten-Krähenhorn-REF) bzw. $9,50 \pm 0,13$ mmol g⁻¹ Asche (Sipplingen-Osthafen-REF); die in den Rasen enthaltene GC-Menge lag im Mittel bei $0,36$ (Litzelstetten-Krähenhorn-REF) bzw. $1,76 \pm 0,97$ mol m⁻² (Sipplingen-Osthafen-REF). In den nicht aufgeschütteten Innenflächen der Wabenschüttung (Sipplingen-Osthafen-TEST) war die makrophytische Biomasse-Produktion noch höher, so dass die GC-Menge im Mittel bei $3,20 \pm 0,81$ mol m⁻² (entspr. etwa 0,32 kg m⁻²) lag.

5. Diskussion

Die Flächenerosion in der Flachwasserzone des Bodensees ist durch zahlreiche Beobachtungen und Indizien, meist im Zusammenhang mit Unterwasserdenkmälern, dokumentiert (Bürgi/Schlichtherle 1986; Königer 2006; Schlichtherle/Müller 1998; Schlichtherle/Mainberger 2006). An anderen Uferabschnitten hingegen scheint die Flächenerosion kein äußerlich wahrnehmbares Phänomen zu sein. Man kann davon ausgehen, dass neben hydrodynamischen, ufermorphologischen und (mikro-)topographischen Variablen auch die Korngrößenverteilung der unkonsolidierten Oberflächensedimente über das Ergebnis entscheidet. Hierbei können grundsätzlich Sohlltransport und Suspensionstransport unterschieden werden, wobei die Übergänge, d.h. die Häufigkeit der Bodenberührung der transportierten Partikel, fließend sind. Im Fall des Suspensionstransports wird feinkörniges Material in die Wassersäule aufgenommen, im turbulenten Wasserkörper transportiert und bei nachlassender Turbulenz sedimentiert.

Analysen der Sedimentation aus der Wassersäule von Seen werden üblicherweise mit Hilfe von Sedimentationsfallen vorgenommen. Nach methodisch-kritischen Untersuchungen von Bloesch/Burns (1980) und Bloesch (1994; 1996) haben sich einfache Kunststoffröhren von mindestens 5 cm Durchmesser (d) und einer Länge (L) zwischen etwa 0,5 und 2 m und mit $L/d > 5$ als Standard-Messtechnik durchgesetzt. Die Röhren werden in der Wassersäule des Seebeckens verankert und messen vornehmlich die Sedimentation von Seeton in einer verglichen mit dem Litoral

wenig turbulenten Umgebung. Die Resuspension von profundalen Oberflächensedimenten kann, wenn sie simultan stattfindet, nur unzureichend abgebildet werden.

In Hochenergiemilieus wie sie für die Flachwasserzone großer Seen typisch sind, ist der Einsatz von Zylinderfallen schwierig. Sie müssten, um das in den Fallen sedimentierte Material gegen Ausspülung zu schützen, eine Länge von deutlich mehr als einem Meter aufweisen, so dass sie angesichts der begrenzten Mächtigkeit der Wassersäule nicht obertägig aufgestellt werden könnten. Um dieses Problem zu lösen, wurden Tellerfallen entwickelt (Kozerski/Leuschner 1999; 2000) und beispielsweise in den Bühnenfeldern der Elbe erfolgreich getestet. Allerdings können die einmal abgelagerten Partikel bei geänderten Strömungsverhältnissen restlos erodiert werden, so dass sich die Fallen nicht für Langzeitmessungen eignen. Vermutlich sind sie deswegen auch für Messungen in der Bodensee-Flachwasserzone ungeeignet.

In der vorliegenden Arbeit wurde stattdessen ein realitätsnaher Ansatz gewählt, der unmittelbare Aussagen über das Akkumulationsverhalten in den Kies-/Geröllschüttungen der archäologischen Erosionssicherungsmaßnahmen zulässt (Abb. 3a, b). Die mit diesem Ansatz durchgeführten Messungen gehören soweit bekannt zu den ersten Sedimentationsmessungen in der Flachwasserzone von Seen überhaupt (vgl. auch Hofmann et al. 2011). Aufgrund der realitätsnahen Versuchsanordnung kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse repräsentativ für die Kies-/Geröllschüttungen sind, während die Übertragbarkeit auf benachbarte naturbelassene Sedimentoberflächen einstweilen offenbleiben muss.

Die Ergebnisse dieser Sedimentfallen-Versuche haben zunächst zeigen können, welche Sedimentfraktionen vornehmlich akkumuliert werden: Es sind die Fraktionen grober Grobsilt (gGU, 0,035 bis 0,063 mm) und feiner Feinsand (fFS, 0,063 bis 0,112 mm). Auch Hofmann et al. (2011) fanden in Sedimentfallen am Südufer des Überlinger Sees in 1,9 m Wassertiefe vorwiegend Partikel zwischen 0,01 und 0,1 mm Äquivalentdurchmesser. Die genannten Fraktionen kommen mit hohen Anteilen auch in den naturbelassenen Oberflächensedimenten der Umgebung vor, sind aber in den Fallensedimenten deutlich überrepräsentiert (Abb. 7). Dagegen sind alle gröberen Fraktionen weitaus unterrepräsentiert. Die feineren Fraktionen treten in etwa den gleichen Mengenverhältnissen auf wie in den Umgebungssedimenten. Dieses Ergebnis entspricht weitgehend den Prognosen des Hjulström-Sundborg-Diagramms, das für Körner zwischen etwa 0,1 und 0,3 mm Durchmesser ein Minimum der kritischen Schergeschwindigkeit von rd. $0,2 \text{ m s}^{-1}$ ausweist (U.S. Department of the Interior 2006; Leeder 2011). Oberhalb dieser Korngröße steigt die Schergeschwindigkeit an, die zur Initiierung der Kornbewegung mindestens nötig ist. Unterhalb dieses Korngrößenbereichs sind ebenfalls höhere Schergeschwindigkeiten notwendig, da hier zusätzlich zur Schwere der Körner noch Kohäsivkräfte zu überwinden sind.

Die beiden Korngrößenfraktionen, für die in den vorliegenden Versuchen maximale Akkumulationsraten ermittelt wurden, liegen allerdings geringfügig unter dem vorhergesagten »optimal« erosionsinstabilen Korngrößenbereich, was vorläufig damit erklärt wird, dass das Diagramm von idealisierten Voraussetzungen ausgeht, die am Bodenseeufer sicher nicht gegeben sind. Das Hjulström-Sundborg-Diagramm sagt weiterhin voraus, dass Körner oberhalb 0,1 mm Durchmesser rasch sedimentieren, sobald die Schergeschwindigkeit auf etwa 10 bis 20 % des »kritischen« Ereignisses absinkt. Dies lässt erwarten, dass Sedimentfraktionen um 0,1 mm Äquivalentdurchmesser bedeutend häufiger den Zyklus von Resuspension und Sedimentation durchlaufen als feineres Material, das auch bei sehr geringen Schergeschwindigkeiten noch in der Wassersäule suspendiert bleibt, und als gröberes Material, das erst bei vergleichsweise seltenen Starkwindereignissen mobilisiert wird.

Diese Befunde werden vorläufig wie folgt interpretiert: Die erosionsinstabilen Sedimentfraktionen umfassen den Bereich zwischen Ton- und feiner Feinsand-Fraktion, während die gröberen Fraktionen in den Stationen Litzelstetten-Krähenhorn und Sipplingen-Osthafen nicht resuspendiert und in der Suspensionsfracht bewegt werden. Ein Materialeintrag über den Sohltransport ist angesichts des Mikroreliefs und des großporigen Interstitials des Schüttungsmaterials in der Umgebung der Sedimentfallen ausgeschlossen. An den Positionen der Sedimentfallen werden unter den gegebenen Bedingungen bevorzugt die Fraktionen gGU und fFS sedimentiert. Über die bevorzugten Ablagerungsorte der feineren Fraktionen kann keine Aussage gemacht werden; möglicherweise kommen sie erst an der Halde und im Becken zum Absatz und wären damit dem Feststoffhaushalt der Flachwasserzone entzogen.

Der Wirkungsgrad der Fallen (*trapping efficiency*) dürfte in der Nähe von hundert Prozent liegen, da entsprechend dem Konzept eines realitätsnahen Designs darauf geachtet wurde, die umgebenden Schüttungssedimente möglichst gut nachzubilden. Insgesamt wurden in der Station Sipplingen-Osthafen innerhalb der Expositionszeit von neun Monaten im Mittel 264 ± 87 g TS ($n=3$) eingetragen, in der Station Litzelstetten-Krähenhorn 164 ± 45 g TS ($n=5$). Bei einer Öffnungsweite der Container von $0,0882$ m² entspricht dies einem mittleren Eintrag von $2,99$ bzw. $1,86$ kg TS m⁻². Das Material der naturbelassenen Umgebungssedimente besitzt eine Trockensubstanz-Dichte von 1091 ± 166 kg m⁻³ (Litzelstetten-Krähenhorn) bzw. 1059 ± 88 kg m⁻³ (Sipplingen-Osthafen). Die eingetragenen Mengen entsprechen folglich einem Sedimentprofilzuwachs von $1,7$ mm (Litzelstetten-Krähenhorn) bzw. $2,8$ mm (Sipplingen-Osthafen) innerhalb von neun Monaten.

Der rechnerischen Profilzuwachsrate in den Containern steht eine Profilschwundrate in der weiteren Umgebung gegenüber. Da aber die Größe der Fläche, aus der das Material ausgebracht wurde, vorläufig nicht bekannt ist, kann diese Rate nicht geschätzt werden. Auch über die Transportwege können keine Aussagen gemacht werden.

Die nach Korngrößenklassen differenzierten Massenanteile der Fallensedimente an organischer Substanz (OS) und Gesamt-Carbonat (GC) liefern erste Hinweise auf die Herkunft des Materials. Die OS-Massenanteile in den Fein- und Mittelsand-Fraktionen sind teilweise mehr als doppelt so hoch wie die entsprechenden Konzentrationen in den naturbelassenen Oberflächensedimenten (Abb. 8). Auch die GC-Massenanteile sind deutlich höher (Abb. 9). Offensichtlich stammt das sedimentierte Material nicht nur aus Komponenten der umliegenden Sedimentoberschichten. Eine grobe Schätzung der Volumenanteile zeigt, dass sich in den Grobsand- und Feinkiesfraktionen Mollusken, Molluskenschill, Dreikantmuschelschalen und die kalkreichen Überreste von Armleuchteralgen anreichern (Tab. 1). Diese biogenen Reste unterliegen wahrscheinlich einem fortwährenden Zerfall, so dass sie sich in den Fein- und Mittelsandfraktionen anreichern und dort für eine Erhöhung der OS- und GC-Massenanteile sorgen. Die Carbonatproduktion der Armleuchteralgen auf den Umgebungssedimenten vor allem der Station Sipplingen-Osthafen liegt in der Größenordnung von $0,2$ bis $0,3$ kg GC m⁻² (vgl. Kap. 4.5), so dass von dieser Quelle ein signifikanter Beitrag zu den Carbonaten in den Fallensedimenten erwartet werden kann.

Ein Teil der Schneckenschalen, v.a. aber der Großteil der Dreikantmuschel-Schalen wird jedoch nicht durch Erosion und Sedimentation in die Fallen eingetragen. Vielmehr haben die Tiere in und auf den Kiesen und Geröllen der Fallen gelebt, bevor sie abgestorben sind und die Schalenreste in das Fallensediment eingebettet wurden. Auch die Carbonatkrusten der Armleuchteralgen-Reste waren wohl keine dauerhaften Bestandteile der Oberfläche der Umgebungssedimente. Wahrscheinlich ist dieses Material direkt, d.h. nach mechanischer Fragmentierung der Pflanzen in die Fallen geraten, wobei es durchaus zu einer kurzfristigen Zwischendeposition auf den Umgebungssedimenten gekommen sein mag. Insgesamt zeigen diese Befunde, dass die Bioproduktion (Makrophyten, Mollusken) einen erheblichen Anteil an der Sedimentbildung und am Feststoffhaushalt der Flachwasserzone des westlichen Bodensees haben kann.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass

- sich der Sedimentfallentyp, der diese Untersuchungen ermöglichte, als geeigneter Ausgangspunkt für die Entwicklung universell in der Flachwasserzone einsetzbarer Fallen erwiesen hat,
- anhand einer Langzeitexposition gezeigt werden konnte, welche Kornfraktionen der Umgebungssedimente erosionsinstabil sind, im Wasserkörper als Suspensionsfracht transportiert und unter geeigneten Bedingungen abgelagert werden,
- biogene Komponenten, insbesondere die Carbonatproduktion der Armleuchteralgen einen erheblichen Anteil an dem sedimentierten Material haben.

Die dargestellten Ergebnisse liefern damit wichtige methodische Hinweise für die weitere Entwicklung von litoralen Sedimentfallen und für die Herkunftsanalyse der Fallensedimente.

Danksagung

Die archäologischen Forschungstaucher Dr. J. Köninger (terramare, Freiburg) und Dr. M. Mainberger (UWARC, Stauffen) und ihre Teams besorgten in bewährter Weise die Ausbringung und Bergung der Container. Die Korngrößenanalysen im Bereich <0,63 mm wurden am Institut für Seenforschung unter der Leitung von Dr. T. Wessels durchgeführt. Weitere Aufbereitungsschritte und Laborarbeiten lagen in den Händen von Frau K. Schmidt und Herrn C. Schmidt. Ihnen allen sei für ihre Einsatzbereitschaft und sorgfältige Arbeit gedankt. Teile der Untersuchungen wurden vom Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart finanziell gefördert. Die Arbeiten wurden im Rahmen des Interreg IV-Programms »Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein«, Projekt 55 »Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee«, durchgeführt.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Bloesch 1994:
J. Bloesch, A review of methods used to measure sediment resuspension. *Hydrobiologia* 284, 1994, 13–18.
- Bloesch 1996:
J. Bloesch, Towards a new generation of sediment traps and a better measurement/understanding of settling particle flux in lakes and oceans: A hydrodynamical protocol. *Aquatic Sciences* 58, 1996, 283–296.
- Bloesch/Burns 1980:
J. Bloesch/N. M. Burns, A critical review of sediment trap technique. *Schweizerische Zeitschrift der Hydrologie* 42, 1980, 15–56.
- Brem et al. 2013:
H. Brem/B. Eberschweiler/G. Grabher/H. Schlichtherle/G. Schröder (Hrsg.), Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Ein internationales Projekt im Rahmen des Interreg IV-Programms »Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein« zur Entwicklung von Handlungsoptionen zum Schutz des Kulturgutes unter Wasser. Vorarlberg Museum Schriften 1 (Bregenz 2013).
- Bürgi/Schlichtherle 1986:
J. Bürgi/H. Schlichtherle, Gefährdete Ufersiedlungen am Bodensee. *Archäologie der Schweiz* 9, 1986, 34–41.
- Carter 1988:
R. W. G. Carter, *Coastal Environments. An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines* (London 1988).
- Hofmann et al. 2011:
H. Hofmann/A. Lorke/F. Peeters, Wind and ship wave-induced resuspension in the littoral zone of a large lake. *Water Resources Research* 47, 2011.
- Königer 2006:
J. Königer, Unterwasserarchäologie am Überlinger See im Zeichen extremer Niedrigwasserstände. *Nachrichtenblatt Arbeitskreis Unterwasserarchäologie (NAU)* 13, 2006, 64–73.
- Königer 2009:
J. Königer, Taucharchäologische Wasserbauarbeiten in den Pfahlbaustationen Sipplinger-Osthafen (Bodenseekreis) und Litzelstetten-Krähenhorn (Kreis Konstanz). Bericht zur Durchführung der Maßnahme und zum erreichten Zustand des Seebodens [Bericht für das LAD BW beim Reg.-Präs. Stuttgart 2009] 6 S.
- Kozerski/Leuschner 1999:
H. P. Kozerski/K. Leuschner, Plate sediment traps for slowly moving waters. *Water Research* 33, 1999, 2913–2922.
- Kozerski/Leuschner 2000:
H. P. Kozerski/K. Leuschner, A new plate sediment trap: Design and first experiences. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für angewandte und theoretische Limnologie* 27, 2000, 242–245.
- Leeder 2011:
M. R. Leeder, *Sedimentology and Sedimentary Basins – from Turbulence to Tectonics* (Chichester 2011²).
- Merritt et al. 2003:
W. S. Merritt/R. A. Letcher/A. J. Jakeman, A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software* 18, 2003, 761–799.
- Ostendorp/Härter 2013:
W. Ostendorp/C. Härter, Sohltransport in der Flachwasserzone des Bodensees: Methodenentwicklung und erste Ergebnisse. In: Brem et al. 2013, 79–93.
- Ostendorp/Blum 1998:
W. Ostendorp/H. Blum, Hemmenhofener Methoden – Sedimentologische und paläolimnologische Methoden in der Siedlungsarchäologie. *Siedlungsarchäologie im Alpenvorland VI. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 68 (Stuttgart 1998) 243–299.
- Parker/Klingeman 1982:
G. Parker/P. C. Klingeman, On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research* 18, 1409–1423.
- Schlichtherle/Mainberger 2006:
H. Schlichtherle/M. Mainberger, Klimawandel. Probleme für das archäologische Kulturgut unter Wasser in den Seen und Mooren des Alpenvorlandes. *Nachrichtenblatt Arbeitskreis Unterwasserarchäologie (NAU)* 13, 2006, 59–63.
- Schlichtherle/Müller 1998:
H. Schlichtherle/A. Müller, Erosion und Erosionsschutzmaßnahmen in der Sipplinger Bucht. *Nachrichtenblatt Arbeitskreis Unterwasserarchäologie (NAU)* 4, 1998, 36–38.
- UNESCO 2011:
UNESCO World Heritage Convention, Prehistoric Pile dwellings around the Alps. <http://whc.unesco.org/en/list/1363> [Juli 2011].
- U.S. Department of the Interior 2006:
U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Erosion and Sedimentation Manual* (Denver 2006) <http://www.usbr.gov/pmts/sediment/kb/ErosionAndSedimentation/> [Juli 2011].