

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des
Statusseminars des BWPLUS am 28.2. und 1.3.2001 im
Forschungszentrum Karlsruhe

**Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur erfolgreichen
Anwendung einer Kalzitaufspülung für die interne Restaurierung
eutropher Baggerseen in Baden-Württemberg**

Doris Stüben¹, Thomas Neumann¹, Ute Berg¹, Karl Wurm², Ulrike Markert³

¹Institut für Petrographie und Geochemie, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-76128
Karlsruhe

²Gewässerökologisches Labor, Tulpenstraße 4, D-72181 Starzach-Felldorf

³Lehrstuhl Tierphysiologie, Abteilung Physiologische Ökologie der Tiere, Eberhard-Karls-
Universität Tübingen

Förderkennzeichen: BWC 20002

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur erfolgreichen Anwendung einer Kalzitaufspülung für die interne Restaurierung eutropher Baggerseen in Baden-Württemberg (BWC 20002)

Doris Stüben¹, Thomas Neumann¹, Ute Berg¹, Karl Wurm², Ulrike Markert³

¹Institut für Petrographie und Geochemie, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-76128 Karlsruhe

²Gewässerökologisches Labor, Tulpenstraße 4, D-72181 Starzach-Felldorf

³Lehrstuhl Tierphysiologie, Abteilung Physiologische Ökologie der Tiere, Eberhard-Karls-Universität Tübingen

Zusammenfassung

Laboruntersuchungen haben gezeigt, daß Kalzit grundsätzlich zur Phosphat-Fixierung und Phosphat-Retention in eutrophierten Seesedimenten geeignet ist. Freilanduntersuchungen im Kirchentellinsfurter Baggersee bei Tübingen (Epplesee) machten jedoch deutlich, daß die Barrierewirkung einer Kalzitschicht durch biologische und hydrodynamische Parameter drastisch herabgesetzt werden kann. Dies wurde in Ergebnissen von Laboruntersuchungen bestätigt, die zeigten, daß die Intaktheit der Schicht eine wesentliche Voraussetzung für die längerfristige Effizienz einer Kalzitbarriere zur Seenrestaurierung ist.

Hinsichtlich der Erarbeitung objektiver Bewertungskriterien zur Nachhaltigkeit des Verfahrens wurden Laborversuche durchgeführt, um die Einflußparameter Bioturbation und Resuspension auf die Stabilität der Kalzitbarriere am Beispiel des Eppleeses zu quantifizieren.

Es konnte gezeigt werden, daß in einem Fall eine Kalzitbarriere mit einer Mächtigkeit von 1 cm innerhalb von drei bis vier Monaten durch die Bioturbation der Larven von *Chironomus plumosus* bei einer Larvendichte, die den natürlichen Verhältnissen im Baggersee entspricht, fast vollständig ins Sediment eingearbeitet wird. Auch eine höhere Kalzitaufgabe von 2,5 cm wurde im anderen Fall in einer etwas größeren Zeitspanne von sechs Monaten in das Oberflächensediment eingemischt.

In flachen Seen besteht zusätzlich die Gefahr, daß die Kalzitschicht durch windinduzierte Wellen erodiert werden kann. Die kritischen Schubspannungen von drei potentiellen Barrierematerialien wie Socal® U1-R, Kalzitmehl und Quarzsand K12 betragen 0.16 N/m^2 , 0.31 N/m^2 bzw. 0.32 N/m^2 , so daß die Auflagen z. B. im durchschnittlich 4 m tiefen Epplesee nach einer Modellrechnung erst ab kritischen Windgeschwindigkeiten von ca. 15 m/s, 31 m/s bzw. 32 m/s verdriftet werden könnten. Bei entsprechender Morphometrie (Oberfläche/Tiefen-Verhältnis) und Windexposition kann jedoch eine windinduzierte Resuspension einer Kalzitbarriere in Flachseen nicht ausgeschlossen werden.

Kalzitaufspülung

Schlagworte: Seenrestaurierung, Kalzitaufspülung, Eutrophierung, Bioturbation, Resuspension, Parametrisierung, Bewertungskatalog.

The Development of Instrumental Valuation Criteria for a Successful Application of Calcite as an Internal Restoration Method for Eutrophic Gravel-pit Lakes in Baden-Württemberg (BWC 20002)

Doris Stüben¹, Thomas Neumann¹, Ute Berg¹, Karl Wurm², Ulrike Markert³

¹Institut für Petrographie und Geochemie, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, D-76128 Karlsruhe

²Gewässerökologisches Labor, Tulpenstraße 4, D-72181 Starzach-Felldorf

³Lehrstuhl Tierphysiologie, Abteilung Physiologische Ökologie der Tiere, Eberhard-Karls-Universität Tübingen

Summary

Laboratory experiments showed that calcite is in principle suitable for phosphorus fixation and phosphorus retention in eutrophic lake sediments. However, field studies in the gravel-pit lake of Kirchentellinsfurt near Tübingen (Epplesee) clearly pointed to the fact that the efficiency of a calcite barrier can be dramatically reduced by biological and hydrodynamic influences. This was confirmed in laboratory tests, which showed that the completeness of the calcite layer is essential to achieve a successful lake restoration over a longer time range.

In view of the elaboration of objective valuation criteria for the sustainability of the method, laboratory investigations were carried out to quantify the influence of bioturbation and resuspension on the stability of the calcite barrier in Lake Epplesee.

The experiments showed that a calcite barrier of 1 cm thickness in one case was almost entirely burrowed within 3 to 4 months by the bioturbation of the larvae of *Chironomus plumosus*. The number of the larvae corresponded to the natural occurrence in the gravel-pit lake. Even a thicker calcite layer of 2.5 cm in the other case was nearly completely mixed into the deeper sediment in a slightly longer time period of about 6 months.

Wind-generated waves can erode the calcite layer, especially in shallow lakes. Therefore, the critical shear stress of three potential barrier materials (Socal® U1-R, calcite powder and sand K12) was measured. In shallow lakes like Epplesee with a mean depth of 4 m, the calculated critical wind velocities by about 16 m/s, 31 m/s and 32 m/s exceed the critical shear stresses of the barrier materials (0.15 N/m², 0.31 N/m² and 0.32 N/m², respectively) and can cause erosion of these layers. According to morphometry (ratio surface/depth) and wind exposition of shallow lakes wind-induced resuspension cannot be excluded.

Key words: lake restoration, calcite application, eutrophication, bioturbation, resuspension, parameterization, evaluation criteria

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Kalzitaufspülung als internes Restaurierungsverfahren hat zum Ziel, der Eutrophierungsentwicklung stehender Gewässer vor allem durch die Reduzierung der Phosphatfreisetzung aus dem Sediment ins Freiwasser entgegenzuwirken, um bei gleichzeitiger Minimierung der externen Phosphateinträge die Verbesserung der Gewässerqualität zu beschleunigen.

Eigene Laboruntersuchungen im BW-PLUS-Projekt N 98006 machten deutlich, daß eine intakte Kalzitschicht durchaus längerfristig als Barriere effizient sein kann. Inkubationsversuche mit Baggerseesedimenten aus dem Epplesee bei Kirchentellinsfurt im Landkreis Tübingen zeigten, daß die Phosphatfreisetzung aus dem Sediment mit einer 1 cm mächtigen Kalzitbarriere um ~ 85 % geringer war gegenüber der Freisetzung aus einem Sedimentkern ohne Barriere (STÜBEN et al. 2000). In Schüttelversuchen konnten 70 - 90 % der Phosphatkonzentration mit Kalzitmehl aus der Lösung eliminiert werden (BERG 1998). Die Effizienz der Maßnahme kann jedoch unter den gegebenen Rahmenbedingungen im Gelände sehr stark durch hydrodynamische und biologische Parameter beeinträchtigt werden, wie anhand einer Versuchsfläche im Kirchentellinsfurter Baggersee bei Tübingen von STÜBEN et al. (2000) bzw. MARKERT (2000) gezeigt werden konnte.

Im Rahmen dieses Projektes sollen daher wichtige Einflußparameter auf die längerfristige Effizienz der Kalzitbarriere - Bioturbation und Resuspension - quantifiziert werden. Ferner ist eine Parametrisierung weiterer seespezifischer (Morphometrie, Sättigungszustände für Kalzit und Kalziumphosphate in Frei- und Porenwasser, Haupteintragsquelle für Phosphat) und seeunspezifischer Parameter (Eigenschaften des kalzitischen Materials hinsichtlich der P-Bindung, Aufbau und Mächtigkeit der Barriere) für eine umfassende Bewertung der Anwendbarkeit von Kalzit zur Restaurierung von Baggerseen in Baden-Württemberg angedacht. Aus einem Bewertungskatalog als Entscheidungsgrundlage für Behörden sollen notwendige Voruntersuchungen in Anbetracht einer möglichst optimalen Anwendung des Verfahrens ableitbar sein.

2 Material und Methoden

2.1 Einfluß der Bioturbation auf die Stabilität einer Kalzitbarriere

Um den Einfluß der Benthosorganismen auf die zeitliche Stabilität einer Kalzitbarriere zu ermitteln, wurden Aquarienversuche mit Sedimenten und Freiwasser aus dem Kirchentellinsfurter Baggersee mit folgenden Variablen durchgeführt:

- Art der Organismen (*Tubifex spec.*, *Chironomus plumosus*)
- Populationsdichte der Chironomidenlarven (230 Ind/m² bzw. 350 Ind/m²)
- Mächtigkeit der Kalzitüberdeckung (1 cm, 2 cm, 2.5 cm Rohrbach-Kalzit (s. 2.2))

Die Untersuchungen der Einarbeitungsgeschwindigkeit der Kalzitbarriere ins Sediment basieren auf visuellen Beobachtungen und wurden photographisch dokumentiert. Im überstehenden Wasser wurden physikalisch-chemische Parameter (pH, Temperatur, Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit (WTW)) sowie die Nährstoffe Ortho- und Gesamphosphat (DIN 38 405-D11-1 und -4), Ammonium (DIN 38406-E5-1), Nitrat (DIN 38405-D29), und Nitrit (DIN 38405-D10) bestimmt.

Die quantitative Einarbeitung des Kalzitmehls bei Versuchsende wurde mit Hilfe von Sedimentprofilen und der Bestimmung von Kalzit-Tiefengradienten ermittelt (Abb. 3.1.1.4). Der Kalzitgehalt der Sedimenttiefenprofile wurde cm-weise nach HCl-Aufschluß mit NaOH rücktitriert.

2.1.1 Laborversuche mit der Zuckmückenlarve *Chironomus plumosus* in Aquarien

Die Aquarienversuche mit eingesetzten Chironomidenlarven aus der Zoohandlung wurden vom 3. März 2000 bis zum 18. September 2000 durchgeführt. Am 8. März wurden nach einer kurzen Adaptionsphase der Organismen an die Versuchsbedingungen unterschiedlich mächtige Barrieren (Tabelle 2.1.1) aus Rohrbach-Kalzit auf die Seesedimente aufgebracht.

Versuchsbedingungen: Temperatur bis 1. Mai konstant bei 7 °C, danach kurzfristig Erhöhung auf 16 °C, anschließend Kühlung auf konstant 12 °C, pH-Bereich zwischen pH 7,7 und 8,8. Kontinuierliche Belüftung, Sauerstoffsättigung zwischen 90 u. 100 %; nach der Temperaturerhöhung kurzfristiges Absinken auf 60 %. Einzelne tote oder geschlüpfte Zuckmückenlarven wurden ersetzt. Aquariengrundfläche: 865 cm², Befüllung mit 5 – 8 cm mächtiger Sedimentschicht und Freiwasser aus dem Epplesee.

Tab. 2.1.1: Angaben zu Kalzitschichtmächtigkeiten [cm] und Populationsdichte [Ind/m²] in den Aquarienversuchen mit Chironomiden von März bis September 2000.

Mächtigkeit der Kalzitbarrieren [cm] in den Aquarien	0 (Kontrolle)	1	2	2,5	1
Larvenanzahl [Ind/m ²]	350	350	350	350	230

Die Populationsdichte der Chironomiden entsprach in den Versuchen mit 350 Larven/m² (bei 30 eingesetzten Individuen pro Aquarium) bzw. 230 Larven/m² (bei 20) den Besiedlungsverhältnissen im Epplesee im Sommer 2000 mit einer Dichte von *Chironomus plumosus* zwischen 230 und 370 Larven/m².

Kalzitaufspülung

2.1.2 Laborversuche mit dem Schlammröhrenwurm *Tubifex spp.* in Aquarien

Neben den Larven von *Chironomus plumosus* wurden im Sediment des Eppelsees auch Schlammröhrenwürmer der Gattung *Tubifex* in geringer Dichte festgestellt.

Parallel zu den Testansätzen mit Chironomidenlarven wurden 2 Aquarien mit Seesediment, Seewasser und Tubificiden beschickt, wovon Tub I den Kontrollansatz ohne Barriere darstellte und Tub II mit einer 1 cm mächtigen Kalzitschicht beaufschlagt wurde.

Die Populationsdichte der Tubificiden lag bei Versuchsende im Versuchsansatz mit Kalzitbarriere bei 102.000 Ind/m² und im Ansatz ohne Barriere bei 75.000 Ind/m².

2.2 Mechanische Stabilität des Barrierematerials

In Flachgewässern sind für die Resuspension von Sediment hauptsächlich windinduzierte Wellen verantwortlich (WARD 1985). Zur Abschätzung der mechanischen Stabilität einer Barriere gegenüber dieser durch Wind erzeugten Wellendynamik wurde die kritische Sohlschubspannung von folgenden drei potentiellen Barrierematerialien mit jeweils unterschiedlichen Korngrößen und spezifischen Oberflächen (SSA) in der Laborapparatur EROMES (SCHÜNEMANN & KÜHL 1991) der GKSS in Geesthacht gemessen:

	<u>Korngröße</u>	<u>SSA</u>
• Kalzitmehl, Fa. Rohrbach-Zement, Dotternhausen, Deutschland	0.2 - 0.6 µm	4.3 m ² /g
• Socal® U1-R, Fa. Solvay, Österreich (AUMANN & THIEME 1987)	0.07 µm	20 m ² /g
• Kommerziell erhältlicher Quarzsand K12	0.6 - 1.2 mm	< 1 m ² /g

Das Kalzitmehl wird von der Firma Rohrbach-Zement in Dotternhausen durch den Abbau von Malmkalken und Aufmahlen zu Korngrößen hauptsächlich im Feinschluffbereich gewonnen (0.2 - 0.6 µm) und wurde 1999 als Barrierematerial auf der Versuchsfläche im Eppelsee eingesetzt. Die spezifische Oberfläche ist mit ca. 3 - 4 m²/g wesentlich geringer als die von Socal® U1-R mit 20 m²/g. Dieser künstlich gefällte mikrokristalline Kalzit weist Korngrößen von ca. 0.07 µm auf und verspricht eine effizientere P-Bindung als der Rohrbach-Kalzit. Die Korngrößen des Quarzsands liegen um 0.6 - 1.2 mm und lassen eine höhere mechanische Stabilität als die Kalzite vermuten. Hinsichtlich einer Optimierung der Kalzitaufspülung könnte daher die Barrierestabilität durch den Einsatz von Kalzit/Sandgemischen bzw. in Sand als inaktive Komponente eingebettete Kalzitschichten (DONNERT et al. 2000) gegenüber hydrodynamischen Prozessen verbessert werden.

Für die Messung der kritischen Sohlschubspannung wurden neun Plexiglasrohre (Durchmesser: 10 cm, Länge: 40 cm) mit Leitungswasser befüllt (30 cm Wassersäule) und je drei Rohre mit den jeweiligen Barrierematerialien beaufschlagt. Durch einen Propeller der EROMES-Apparatur ca. 3 cm über der Probe und seitlich angebrachten Strömungsbrechern wird eine Turbulenz an der Sohle erzeugt, deren Wirkungskraft typisch für Wellen in flachen Gewässerbereichen ist

(TOLHURST et al. 2000). Die erzeugte Sohlschubspannung ist eine Funktion der Propellerdrehzahl und wurde mit Quarzsanden bekannter kritischer Sohlschubspannung kalibriert (SCHÜNEMANN & KÜHL 1991). Die Propellerdrehzahl wurde alle 5 Minuten (Quarzsand alle 2 Minuten) stufenweise gemäß 0.05 N/m^2 -Schritten der Schubspannung erhöht. Übersteigt die angelegte Schubspannung die kritische Schubspannung, beginnt der Transport von Material, der mit einer Trübung des überstehenden Wassers durch Resuspension verbunden ist. So konnte über Trübungsmessungen zusätzlich die Erosionsrate berechnet werden. Der Schwellenwert für die kritische Erosionsrate liegt bei $0.01 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$ (TOLHURST et al. 2000).

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Einfluß der Bioturbation auf die Stabilität der Kalzitbarriere

Im Bereich der Versuchsfläche zeigte sich, daß die Kalzitbarriere binnen weniger Monate nicht mehr als kompakte Schicht zu erkennen war. Eine Kalzitmassenbilanz machte jedoch deutlich, daß das Material noch weitestgehend vorhanden ist, aber von Makrozoobenthos ins Oberflächensediment eingearbeitet wurde. Die Zerstörung der Kalzitschicht setzte die Barrierefunktion hinsichtlich der Phosphatretention drastisch herab (STÜBEN et al. 2000). Aquarienversuche mit typischen Sedimentbewohnern des Eppelsees wie Chironomidenlarven und Tubificiden sollten Aufschluß über die Wechselwirkung von Kalzitschicht und Benthos sowie die Einarbeitungsgeschwindigkeit geben.

3.1.1 Einfluß der Zuckmückenlarve *Chironomus plumosus* auf die Stabilität der Barriere

Die zeitliche Abfolge der Kalziteinarbeitung in das darunter befindliche Seesediment ist in den Abbildungen 3.1.1a bis 3.1.1c exemplarisch und in Tabelle 3.1.1 für alle Versuchsansätze in den Aquarien vergleichend dargestellt.



Abb. 3.1.1a: 1 cm hohe Barriere 1 Monat nach Aufbringung (Aufsicht).

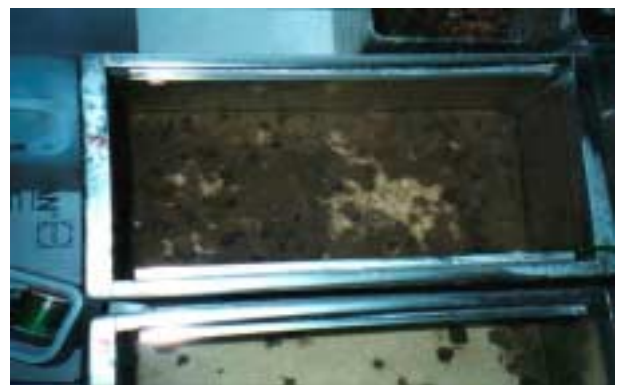


Abb. 3.1.1b: 1 cm hohe Barriere 3 Monate nach Aufbringung (Aufsicht).

Kalzitauflösung

Die Einarbeitungsgeschwindigkeit der Kalzitbarriere war bei der geringsten Schichtdicke (1 cm) erwartungsgemäß am höchsten (Tab. 3.1.1). Nach drei Monaten war die Kalzitschicht fast vollständig durch die Bioturbation von dem darunterliegenden Sediment überdeckt bei einer Chironomidendichte im Versuchsansatz, die den Verhältnissen im Eppelsee entspricht.



Abb. 3.1.1c: Vergleich der Intensität der Bioturbation in den Aquarien mit 1 cm (links), 2 cm (Mitte) und 2.5 cm (rechts) hohen Kalzitbarrieren vier Monate nach Aufbringung.

Die Intensität der Zerstörung der Kalzitbarriere folgte jedoch nicht zwingend den Erwartungen. So wurde die 2,5 cm mächtige Schicht wesentlich schneller eingearbeitet als die nur 2 cm dicke Schicht. Auch war die Dichte der Chironomiden nicht in jedem Fall der geschwindigkeitsbestimmende Faktor. Im Testansatz (Barriere 1 cm) mit 230 Larven/m² war die Einarbeitungsgeschwindigkeit annähernd gleich hoch wie im Ansatz mit 350 Larven/m². Vielmehr wurde die Intensität der Zerstörung der Kalzitbarriere sehr wahrscheinlich in erster Linie durch die Vitalität der Chironomidenlarven bestimmt.

Tab. 3.1.1: Abschätzung des Überdeckungs- bzw. Zerstörungsgrades [%] der Kalzitbarriere in den Aquarien durch Chironomidenlarven (Aufbringen der Barriere am 8.03.2000).

Kalzitbarriere [cm]	1	2	2.5	1
Populationsdichte [Ind/m ²]	350	350	350	230
09.03.2000	~25 Löcher	~10 Löcher	~5 Löcher	~15 Löcher
13.03.2000	~30 Löcher	~20 Löcher	~40 Löcher	~60 Löcher
17.03.2000	~100 Löcher	~30 Löcher	~80 Löcher	~120 Löcher
13.04.2000 (~1 Monat später)	50 %	5 %	35 %	67 %
08.05.2000	75 %	5 %	40 %	75 %
22.05.2000	80 %	5 %	50 %	80 %
13.06.2000 (~3 Monate später)	90 %	10 %	80 %	90 %

Die mit Kalzit überdeckten Chironomiden durchbrachen die Barrierschicht fast permanent, um sich wieder an einer anderen Stelle erneut einzugraben, d. h. eine Larve perforiert die Kalzitschicht mehrmals. Auf diese Weise wurde in kurzer Zeit fast die gesamte Kalzitschicht komplett zerstört mit der Konsequenz einer zunehmenden Phosphatfreisetzung (s. 3.1.4).

3.1.2 Einfluß des Schlammröhrenwurms *Tubifex spp.* auf die Stabilität der Barriere

Der zeitliche Verlauf der Überdeckung der Kalzitschicht mit Sediment ist der Tabelle 3.1.2 zu entnehmen. Nach nur einem Monat war die Kalzitschicht durch die Bioturbationsaktivität der Tubificiden vollständig ins Sediment eingemischt.

Tab. 3.1.2: Zeitlicher Verlauf der Einarbeitung einer 1 cm dicken Kalzitschicht in das Sediment durch Tubificiden im Aquarium Tub II*.

Zeit	08.03.00	11.03.00	13.03.00	17.03.00	20.03.00	22.03.00	27.03.00	03.04.00
Einarbeitung in %	0	10	33	80	85	90	95	100

3.1.3 Vergleich der Zerstörungsweise der Barriere durch Chironomiden und Tubificiden

Ein deutlicher Unterschied zwischen den Ansätzen mit Chironomidenlarven und Tubificiden zeigte sich darin, daß die in sehr hoher Dichte eingesetzten Tubificiden für eine gleichmäßige Verteilung des Kalzits im Sediment sorgten. Chironomiden überlagern die Kalzitschicht eher mit Sediment, wie dem Sedimenttiefenprofil von Kalzit (Abb. 3.1.3) zu entnehmen ist.

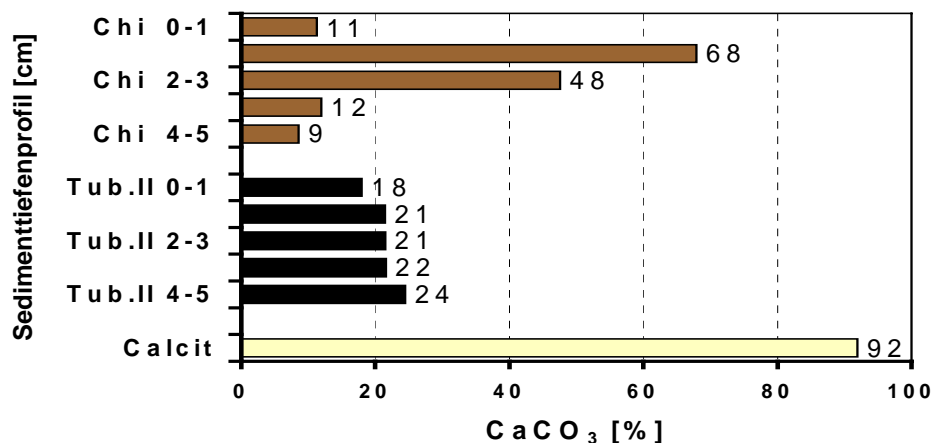


Abb. 3.1.3: Kalzitanteil [%] im Sedimenttiefenprofil nach Versuchsende; exemplarisch dargestellt an den Versuchsansätzen mit Chironomidenlarven (Chi) und Tubificiden (Tub II) bei einer ursprünglich 1 cm hohen Kalzitbarriere.

3.1.4 Auswirkungen der Bioturbation auf die Nährstofffreisetzung aus dem Sediment

Nach Aufbringen der Kalzitbarrieren von 1 - 2.5 cm Mächtigkeit ging der Orthophosphatgehalt im Vergleich zum Kontrollbecken ohne Barriere auf Werte unterhalb der Nachweisgrenze (~ 4 µg/L) zurück (Abb. 3.1.4a). Parallel zur bioturbaten Zerstörung der Kalzitbarriere durch Chironomiden kam es zu einem Phosphatfluß vom Sediment ins Freiwasser. Im Ansatz ohne Kalzitbarriere stiegen die Phosphat(P-)konzentrationen im überstehenden Wasser rasch auf ~ doppelte Gehalte im Vergleich zur Ausgangskonzentration an. Die allmähliche Konzentrationsabnahme beruht vermutlich auf mikrobieller P-Assimilation. Während die P-Freisetzung in den Versuchsbecken mit zunehmender Zerstörung der 1 cm dicken Kalzitbarriere

Kalzitaufspülung

am stärksten war, wurde im Becken mit der am längsten intakt bleibenden 2 cm mächtigen Kalzitschicht auch der Phosphorfluß weitestgehend unterbunden.

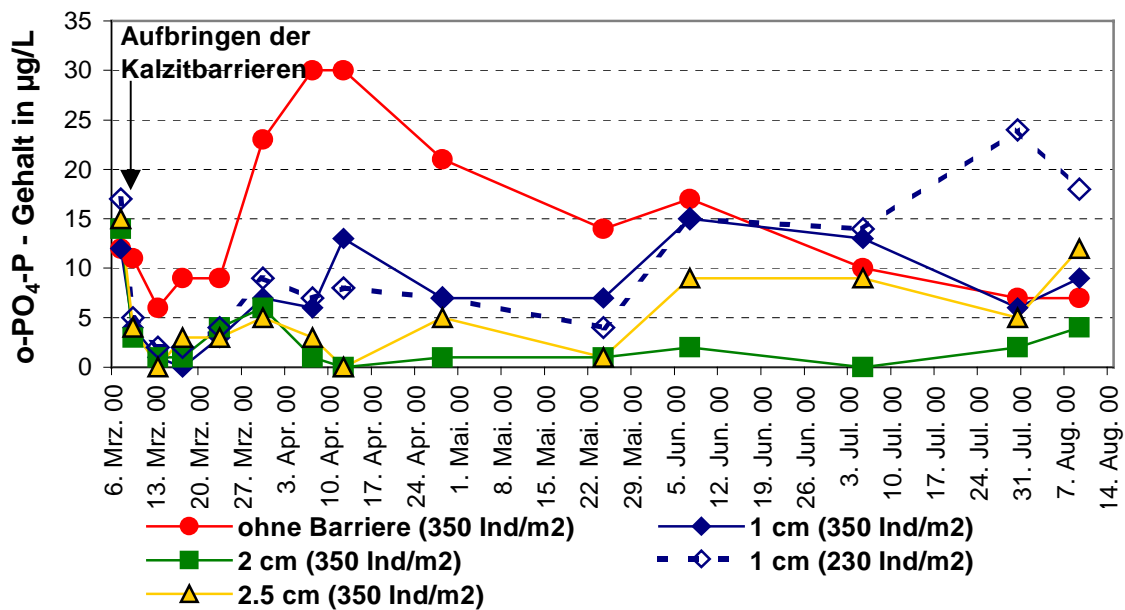


Abb. 3.1.4a: Zeitlicher Verlauf der Orthophosphatgehalte in den Testbecken mit unterschiedlich mächtigen Kalzitbarrieren unter dem Einfluß von Chironomiden.

Die Gesamtposphatkonzentrationen in den Versuchsbecken zeigen einen sehr ähnlichen zeitlichen Verlauf wie die Orthophosphatgehalte. Infolge der Kalziteinbringung fielen die Werte in den Versuchsbecken von 50 – 60 µg P/L auf ein Niveau zwischen 10 (~ Nachweisgrenze) und 20 µg P/L ab. Der von TÁTRAI (1988) festgestellte Zusammenhang zwischen der Larvendichte und der aeroben P-Freisetzung konnte hier aufgrund der geringen Variationsbreite nicht bestätigt werden.

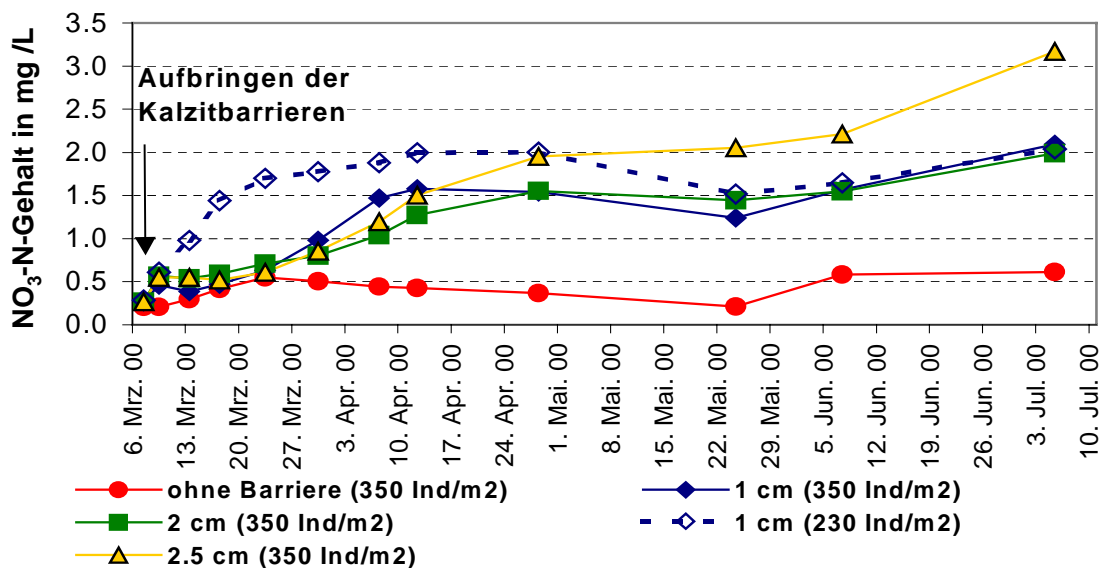


Abb. 3.1.4b: Zeitlicher Verlauf des Nitratstickstoffgehaltes in den Testbecken mit unterschiedlich mächtigen Kalzitbarrieren unter dem Einfluß von Chironomiden.

Nur eine intakte Kalzitbarriere kann demzufolge der Phosphatfreisetzung aus dem Sediment entgegenwirken. Dies konnte von BERG (1998) bzw. STÜBEN et al. (2000) bereits in Laborversuchen ohne den Einfluß der Bioturbation gezeigt werden.

In den Versuchsbecken mit Kalzitbarriere lief die Nitrifikation stark verzögert ab, da sich die Population der Nitrifikanten erst wieder in entsprechender Dichte aufbauen mußte. Nitritstickstoff akkumulierte daher kurzfristig im überstehenden Wasser. Dann erfolgte ein kontinuierlicher Anstieg des Nitratstickstoffs im Gegensatz zum Kontrollansatz ohne Barriere (Abb. 3.1.4b), d. h. in den Aquarien lief aufgrund der veränderten Redoxbedingungen an der Wasser/Sedimentgrenzschicht weder eine Denitrifikation noch eine Ammoniumassimilation ab. Diese fehlende Nitratreduktion könnte sich bei einer intakten Barriere positiv auf das N/P-Verhältnis im See auswirken.

3.2 Mechanische Stabilität verschiedener Barrieren

Mit der Laborapparatur EROMES wurden folgende kritischen Schubspannungen für die unterschiedlichen Barrierematerialien gemessen (Abb. 3.2.1):

Quarzsand K12	0.32 N/m ²
Rohrbach-Kalzit	0.31 N/m ²
Socal® U1-R	0.15 N/m ²

Beachtet werden muß, daß bei gewaschenem Quarzsand nur eine Umlagerung von Partikeln ("bedload") ohne Trübungszunahme auftritt, da EROMES nur Schubspannungen von maximal 3 N/m² erzeugen kann, die nicht ausreichen, um Sand K12 für Trübungsmessungen in Schwebelage zu bringen. Die kritische Schubspannung beruht hier nur auf visueller Beobachtung. Erosionsraten konnten deshalb für Sand nicht bestimmt werden.

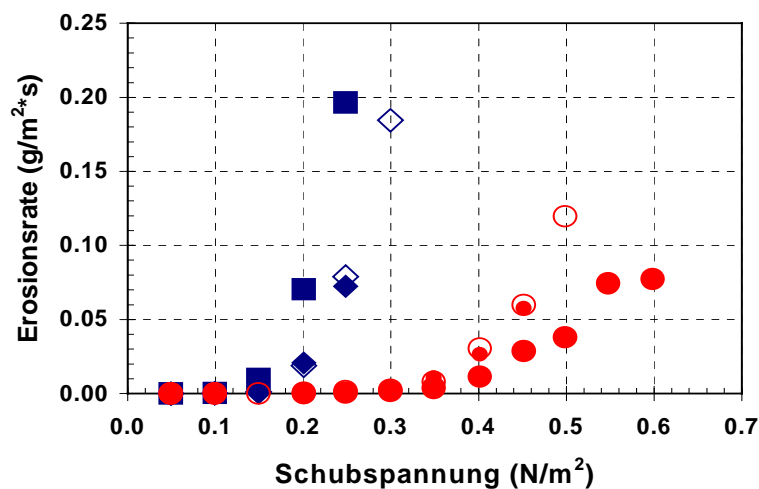


Abb. 3.2.1: Zusammenhang zwischen gemessener Schubspannung und berechneter Erosionsrate für Socal® U1-R (eckige Symbole) und Rohrbach-Kalzit (runde Symbole).

Kalzitaufspülung

Aufgrund relativ ähnlicher kritischer Sohlschubspannungen für Rohrbach-Kalzit und Quarzsand erscheint eine Stabilisierung der Kalzitschicht durch Kalzit/Sand-Mischungen oder durch Einbettung einer Kalzitbarriere in Sandschichten eher fragwürdig.

Mit der gemessenen kritischen Schubspannung kann über eine Modellrechnung die kritische Windgeschwindigkeit abgeschätzt werden, die zur Resuspension von Barrierematerial durch windinduzierte Wellen in flachen Seen führen kann. Für den Kirchentellinsfurter Baggersee bei Tübingen, der eine durchschnittliche Tiefe von 4 m aufweist und mit der Längserstreckung in der Hauptwindrichtung des Neckartals liegt, wurden für die einzelnen Barrierematerialien nach der "Shallow water wave forecasting" - SMB-Methode - (CERC 1984) iterativ folgende kritische Windgeschwindigkeiten berechnet:

Quarzsand K 12	32 m/s
Rohrbach-Kalzit	31 m/s
Socal® U1-R	16 m/s

Im Neckartal betragen die Tageswindspitzen in den Jahren 1998 bis 2000 durchschnittlich 10 m/s und maximal 20 bis 29 m/s. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit lag bei ca. 2 Bft (1.3 - 3.3 m/s). Die Barrieren könnten daher im Eppelsee nur durch Orkane wie z. B. Lothar 1999 (40 m/s) resuspendiert bzw. verdriftet werden. Je nach Morphometrie und Exposition eines Flachsees ist jedoch eine Erosion der Gewässersohle durch windinduzierte Wellen nicht vollkommen auszuschließen.

4 Schlußfolgerungen

Aus den Laborversuchen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Kalzit ist grundsätzlich zur Eliminierung von Phosphat aus dem Freiwasser sowie als Barrierematerial zur P-Retention im Sediment geeignet.
- Eine Zerstörung der Barriere ist mit einem drastischen Verlust der Barrierefunktion verbunden und kann z. B. erfolgen durch

a) Bioturbationsprozesse:

- Kalzitbarrieren werden in der Anwesenheit von Chironomidenlarven innerhalb weniger Monate vollständig ins Sediment eingemischt. Dabei ist die Vitalität der Larven eher ausschlaggebend als die Larvenanzahl und die Mächtigkeit der Kalzitschicht.
- Die bioturbate Zerstörung der Kalzitschicht führt zu einer P-Freisetzung aus dem Sediment, während intakte Kalzitschichten die P-Retention im Sediment erhöhen.
- Eine Änderung des Redoxpotentials nach Kalzitapplikation führt zum Ausbleiben sowohl der Denitrifikation als auch der Ammoniumassimilation. Durch die allmähliche Zunahme

von Nitratstickstoff im überstehenden Wasser oberhalb der Kalzitbarriere könnte ein günstigeres N/P-Verhältnis das Aufkommen von Blaualgen verhindern.

b) Resuspension

- In flachen Seen besteht die Gefahr, daß eine Kalzitaufspülung durch windinduzierte Wellen resuspendiert bzw. erodiert werden kann. Mit zunehmender Seetiefe und abnehmenden Windgeschwindigkeiten wird der Einfluß der Wellen auf die Gewässersohle geringer, bis ab einer gewissen Wassertiefe die durch Wind erzeugte Wellenenergie nicht mehr ausreicht, die kritische Schubspannung des Barrierematerials zu überschreiten.

5 Ausblick

Mit den bislang quantifizierten Parametern aus den Untersuchungen am Eppelsee soll durch weitere Überlegungen und Berechnungen eine prognostische Bewertung der Kalzitaufspülung für eine möglichst erfolgreiche Anwendung in eutrophierten Standgewässern erfolgen. Darin einfließen sollten quantifizierte seespezifische (Bioturbation, windinduzierte Turbulenzen, Wasserchemismus, Haupteintragsquelle des Phosphors) und seeunspezifische Parameter (Qualität und Eigenschaft des Kalzits hinsichtlich der P-Bindung, Barriereaufbau und -mächtigkeit) sowie Möglichkeiten zur Optimierung des Verfahrens als Hilfestellung für potentielle Anwender. Notwendig sind daher weitere Untersuchungen vor allem zu Aufbau und Mächtigkeit der Barriere sowie zu den Eigenschaften des Barrierematerials bezüglich der Phosphatfixierung unter Berücksichtigung des Wasserchemismus, um eine nachhaltige Stabilität und Effizienz der Kalzitschicht im Falle eines großtechnischen Einsatzes in einem eutrophierten See gewährleisten zu können.

6 Danksagung

Ganz herzlich danken möchten wir Herrn Dr. Riethmüller und Herrn Stille für die Betreuung der EROMES-Messungen bei der GKSS in Geesthacht und Herrn Lanuru für die Unterstützung bei der Datenauswertung und -interpretation.

Dem Deutschen Wetterdienst danken wir für die Bereitstellung zahlreicher Daten zu Windgeschwindigkeiten und Windspitzen in den Jahren 1998 bis 2000.

7 Literatur

AUMANN, G.; C. THIEME (1987): Gefälltes Calciumcarbonat - dargestellt am Beispiel von Socal®. Tonindustrie-Zeitung 6/87, Sonderdruck.

Kalzitaufspülung

- BERG, U. (1998): Effektivität von Calcitauflagen auf die Nährstoffrücklösung aus Sedimenten eutrophierter Baggerseen. Diplomarbeit am Institut für Petrographie und Geochemie, Universität Karlsruhe, unveröffentlicht.
- CERC (1984): (COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER) Shore Protection Manual, Vol. I, U.S. Army Corps of Engineers, Fort Belvoir, VA.
- DONNERT, D.; T. JAKOB; M. SALECKER (2000): Einsatz von CaCO_3 als Barriere - Material zur Rückhaltung von Phosphat und Schwermetallen in Sedimenten. Wasserchemische Gesellschaft, GDCh, Jahrestagung, 29.-31. Mai 2000, Weimar.
- MARKERT, U. (2000): Wechselwirkungen zwischen der Calcitabdeckung des Sediments und der Biozönose eines Stillgewässers. Diplomarbeit an der Fakultät für Biologie, Universität Tübingen, unveröffentlicht.
- SCHÜNEMANN, M.; H. KÜHL (1991): A device for erosion-measurements on naturally formed, muddy sediments: the EROMES-System. GKSS 91/E/18, Geesthacht, 1991.
- STÜBEN, D.; T. NEUMANN; U. BERG (2000): Effizienz und ökologische Auswirkungen einer Calcitauflage als interne Restaurierungsmaßnahme für eutrophierte Standgewässer (N 98 006). Berichtsreihe FZKA-BWPLUS, F. HORSCH et al. [Hrsg.]: Abschlußbericht Dezember 2000.
- TÁTRAI, I. (1988): Experiments on nitrogen and phosphorus release by *Chironomus ex gr. plumosus* from the sediments of Lake Balaton, Hungary. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 73 (6): 627-640.
- TOLHURST, T.J.; R. RIETHMÜLLER; D.M. PATERSON (2000): In situ versus laboratory analysis of sediment stability from intertidal mudflats. *Continental Shelf Research* 20: 1317-1334.
- WARD, L.G. (1985): The influence of wind waves and tidal currents on sediment resuspension in Middle Chesapeake Bay. *Geo-Marine Letters* 5: 71-75.