

Erste Ergebnisse aus dem ZIM-Projekt „Schlamm-TEC“ als Beitrag zum besseren Verständnis von Kleingewässern

Jacqueline Rücker¹, Franziska Horn², Dominique Gampe³, Thomas Kaupper⁴, Christian Gruner², Tillmann Lüders⁴ & Brigitte Nixdorf¹

¹ BTU Cottbus-Senftenberg, FG Gewässerökologie, Seestr. 45, 15526 Bad Saarow. j.ruecker@b-tu.de, nixdorf@b-tu.de

² WERTEC GmbH, Riedstr. 10, 09117 Chemnitz. franziska.horn@wertec.com, christian.gruner@wertec.com

³ Söll GmbH, Fuhrmannstr. 6, 95030 Hof. d.gampe@soelltec.de

⁴ Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Ökologische Mikrobiologie, BayCEER, Dr.-Hans-Frisch-Str. 1-3, 95448 Bayreuth. thomas.kaupper@uni-bayreuth.de, tillmann.lueders@uni-bayreuth.de

Keywords: Seenrestaurierung, Calciumperoxid, Monitoring, Mesokosmen, Makrophyten, Wasserlinsen

Einleitung

Die Anwendung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG, 2000) bedeutet einen großen Fortschritt hinsichtlich der ökologischen Klassifikation und Bewertung von Gewässern. Die Zielvorgabe: „Mindestens guter ökologischer Zustand“ gilt für alle Gewässer unabhängig von ihrer Größe. Durch die Reduzierung der Berichtspflicht an die EG auf Standgewässer ≥ 50 ha werden in der Gewässerüberwachung kleinere Seen aber leider vernachlässigt. Das betrifft sowohl die Typisierung als Grundlage für Bewertungsstrategien, als auch Monitoringkonzepte zur Einschätzung der Belastung und zur Erfolgskontrolle von Therapiemaßnahmen für Kleinseen. In der Gewässerpraxis hat sich die Anwendung der EG-Wasserrahmenrichtlinie auf Seen unter einer Größe von 50 ha bewährt (DWA, 2024). Bei Standgewässern < 10 ha ist jedoch die Quantifizierung des Ist-Zustandes und eine vergleichbare Bewertung wie für Seen ≥ 50 ha nach EG-Wasserrahmenrichtlinie meist weder ökonomisch leistbar, noch ökologisch sinnvoll. Während ihre Morphometrie relativ einfach ermittelt werden kann, sind die hydrologischen Verhältnisse und die Belastungspfade meist nur mit großem Recherche- und Messaufwand zu erfassen. Der Trophie-Index nach LAWA (2014) ist für Seen ab einer Größe von 5 ha anwendbar. Geschichtete Kleinseen ≤ 5 ha werden als separate Gruppe ausgewiesen. Für Gewässer < 1 ha ist diese Methode jedoch nur eingeschränkt anwendbar. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass die Trophie-Einstufung keine ökologische Bewertung ist.

Je kleiner ein Gewässer ist, desto größer wird der relative Einfluss von Nährstoffeinträgen aus dem Einzugsgebiet auf die Wasserqualität, und benthische Lebensgemeinschaften und Prozesse bestimmen maßgeblich die Ausprägung des ökologischen Zustands und die Entwicklung der Gewässer (Verlandung). Verschlammung, sprich: Sedimentzuwachs ist eine Schlüsselgröße für die Belastung und auch für die Erfolgskontrolle von Therapiemaßnahmen, die auf eine Verringerung des Schlammvolumens ausgerichtet sind. Aufgrund des ungenügenden Schutzstatus für Kleingewässer und auch als Folge des Klimawandels sind zahlreiche Kleinseen zunehmend verschlammmt, verlandet oder trockengefallen. Diese Schlammaufhöhung kann nur verringert werden, wenn die externen Stoffeinträge und damit auch die interne Belastung minimiert werden. Teilweises oder vollständiges Ausbaggern kann zum Erhalt von Kleingewässern beitragen, stellt aber einen sehr kostspieligen und ökologisch gravierenden Eingriff in ein Gewässer dar. Entkrautung ist ebenfalls eine Methode zur Reduzierung einer autochthonen, durch intensives Pflanzenwachstum gebildeten, organischen

Belastung. Daneben gibt es zahlreiche technische Anwendungen zur Belüftung der an- und suboxischen Bereiche in Kleingewässern, insbesondere der Sediment-Wasser-Kontaktzone, um die Sauerstoffverfügbarkeit für die aquatische Fauna zu verbessern und die Akkumulation organischer Substanz und Schlamm- und Schlammbildung zu verringern. Diese begleitenden Maßnahmen des Gewässerschutzes behandeln lediglich die Symptome der Belastung anstatt die Ursachen zu bekämpfen (Merkblatt ATV-M 250 (DWA (2021))), können aber kurz- und mittelfristig den Gewässerzustand verbessern. In diesen Rahmen ordnet sich das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM), geförderte Projekt „Schlamm-TEC“ ein, welches auf der Ausbringung eines Calciumperoxid (CaO_2)-basierten Gewässertherapieproduktes (CGP) beruht. Dieser Beitrag befasst sich damit, welche Parameter zur Beurteilung des Ist-Zustandes und möglicher Therapieerfolge eingesetzt werden können und stellt Zielsetzung und erste Ergebnisse des Projektes vor.

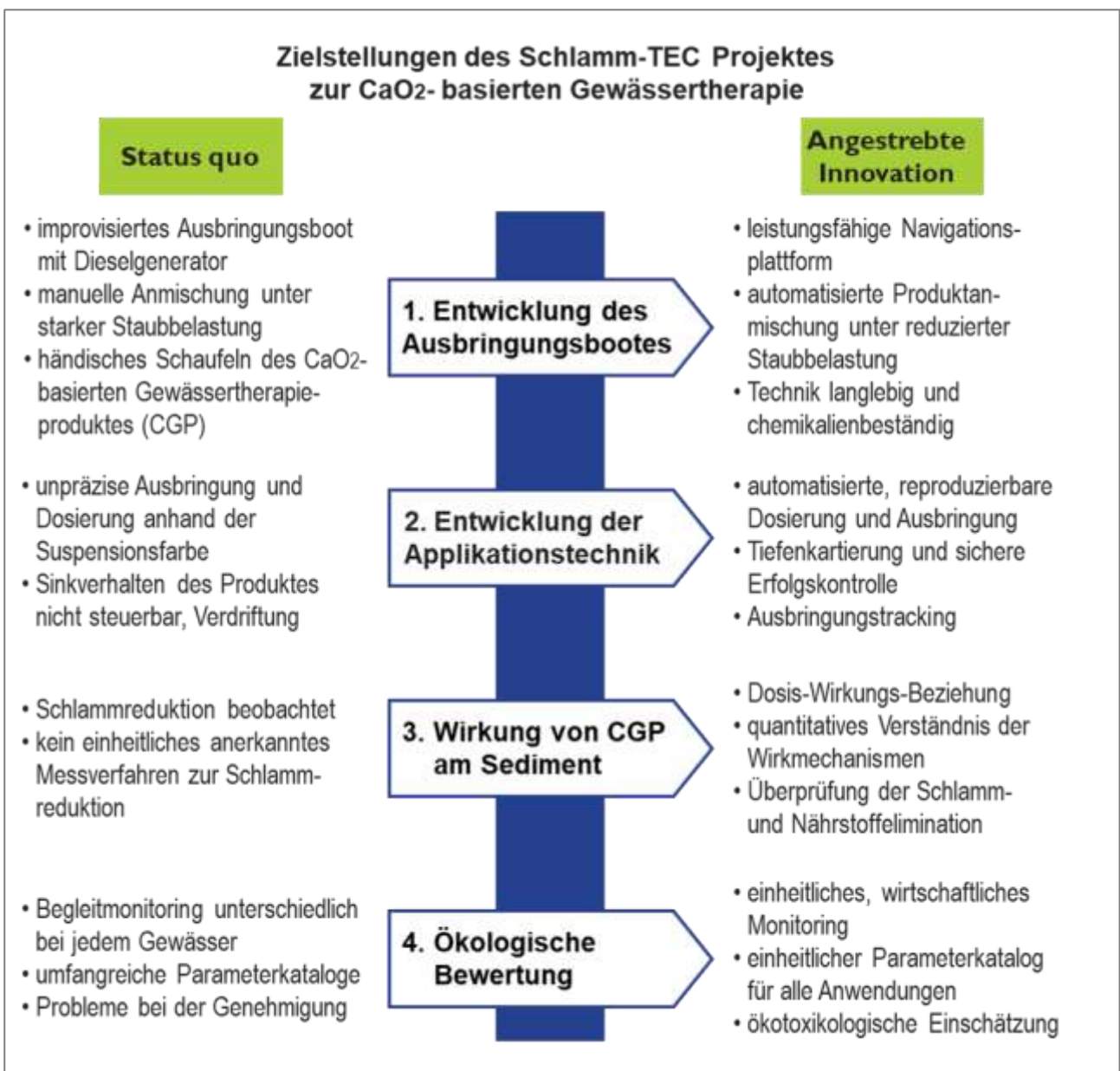


Abb. 1: Zielstellungen des ZIM-Projektes „Schlamm-TEC“. Gegenübergestellt ist der Status quo bei Anwendungen von Calciumperoxid (CaO_2)-basierten Gewässertherapieprodukten (CGP) vor Projektbeginn und die angestrebten Innovationen.

Ziele des ZIM-Projektes „Schlamm-TEC“

Das Projekt „Schlamm-TEC“ zielt auf die Etablierung eines innovativen *in-situ*-Verfahrens zur kosteneffizienten und ökotechnologischen Schlammreduktion in ungeschichteten Kleinseen. Dabei soll durch die Ausbringung eines Calciumperoxid (CaO_2)-basierten Gewässertherapieproduktes (CGP) eine verbesserte Sauerstoffversorgung an der Wasser-Sediment-Kontaktzone erreicht werden. Das Prinzip der CGP beruht auf der langsamen Freisetzung von molekularem Sauerstoff aus CaO_2 direkt an der Sedimentoberfläche. Dieser Sauerstoff soll die Aktivität aerober Mikroorganismen und damit den Abbau des akkumulierten Detritus erhöhen. Zudem soll durch die biogeochemische Wirkung des CGP Phosphor stabil im Sediment festgelegt werden.

Die technische Innovation des ZIM-Projektes besteht in der Entwicklung eines Ausbringungsbootes und der entsprechenden Applikationstechnik (Abb. 1). Da die Wirkmechanismen der CGP-Behandlungen bislang nicht vollständig verstanden sind (z. B. Ulrich et al. 2020; Ma et al. 2007), besteht der zweite Schwerpunkt des Projektes in der Aufklärung der Wirkmechanismen und der gewässerökologischen Bewertung der CGP-Anwendung. Um eine möglichst hohe Aussagekraft der Ergebnisse zu erzielen, wird dieser Schwerpunkt in einem multiskaligen Ansatz verfolgt, d.h. in einer Kombination aus A) Freilanduntersuchungen, B) Mesokosmen- und C) Laborexperimenten. Erste Ergebnisse aus diesen Ansätzen werden hier vorgestellt.

A) Freilanduntersuchungen

Auswahl der Modellgewässer

Über ein öffentliches Bewerbungsverfahren wurden durch Kommunen und Privatpersonen Kleingewässer für eine CGP-Behandlung vorgeschlagen. Diese wurden nach Morphometrie, Zuflüssen, möglichen Belastungen, früheren Behandlungsmaßnahmen, vorliegenden Gutachten, Zuständigkeiten und Behandlungsziel vorkategorisiert. Folgende Kriterien für die Eignung als Projektgewässer wurden festgelegt: Größe 0,1 – 2 (3) ha, Tiefe 50 cm bis maximal 3 m, Schlammmächtigkeit mindestens 30 cm, Sedimentbeschaffenheit: Trockensubstanz (TS) < 60 % der Frischmasse, organische Substanz > 10 % der TS. Diese Kriterien sowie Erreichbarkeit und Zugänglichkeit der Gewässer wurden auf Grundlage eines vom Antragsteller ausgefüllten Fragebogens und Voruntersuchungen im Frühjahr durch die Projektpartner geprüft. Nach Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis wurden 16 Kleingewässer (7 in 2023 bzw. 9 in 2024) mit ca. 75 g m^{-2} CGP im Mai / Juni 2023 oder 2024 behandelt. Die Wassertemperatur für die Behandlung soll möglichst über $10 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen. Das Produkt enthielt 10 – 20 % (w/w) CaO_2 (SchlixX[®] Plus, Oase GmbH, Hörstel, Deutschland 2024).

Maßnahmebegleitendes Monitoring

Unmittelbar vor der CGP-Behandlung begann das Monitoring verschiedener gewässerrelevanter Parameter. Dieses beinhaltete u.a. Wasseruntersuchungen durch Sondenmessungen (Temperatur, gelöster Sauerstoff, pH, Leitfähigkeit, Redoxpotential), die Bestimmung von Nährstoffkonzentrationen (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , SRP, TP, Cl^- , SO_4^{2-}), Gesamt- und Karbonathärte sowie der Sichttiefe. Zusätzlich wurden die Makrophytenbesiedlung und organoleptische Parameter dokumentiert. Im ersten Projektjahr wurden verschiedene Monitoringintensitäten getestet (14tägig, monatlich, zweimonatlich oder nur dreimalig), 2024 wurde überwiegend monatlich beprobt. Regelmäßige Chlorophyllmessungen konnten erst im zweiten Projektjahr realisiert werden. An mindestens drei Terminen, vor, ca. 6 – 8 Wochen nach und ca. 3 Monate nach der CGP-Behandlung, wurden relevante Sedimentparameter bestimmt, wie Höhe der Sedimentauflage und die Sediment-

beschaffenheit (Trockensubstanz und Anteil der organischen Substanz durch Glühverlust (GV) wie in DIN EN 15935:2021-10 beschrieben). Für ausgewählte Gewässer wurde der Gesamt-Phosphor im Sediment bestimmt und eine P-Fraktionierung nach Psenner et al. (1984 und 1988) bzw. Hupfer et al. (1995) durchgeführt.

Wassergüteparameter in CGP-behandelten Kleinseen

Ausgewählte Wassergüteparameter der sieben Kleinseen, die 2023 mit CGP behandelt wurden, sind in Abb. 2 dargestellt. In zwei Gewässern wurden verschiedene Teilbereiche als eigenständige Messstellen untersucht (B und G sowie D und E). Da die Ergebnisse noch einen vorläufigen Charakter haben, wurden die Messstellen hier anonymisiert. Auffällig sind die großen Spannbreiten und die variablen Kombinationen der Parameterausprägungen, die die Vielfalt der Kleingewässer in Chemismus und Besiedlung widerspiegeln.

Auf Grund der hohen Gesamtphosphor (TP)-Konzentrationen waren alle Seen als eutroph bis polytroph einzustufen. Zur Orientierung wurden in Abb. 2 für TP und Sichttiefe die Grenzen der Trophiegrade eutroph e1 und e2 sowie polytroph p1 für polymiktische Seen mit einer mittleren Tiefe ≤ 3 m nach LAWA (2014) eingezeichnet. Der LAWA-Trophie-Index bietet eine gute Orientierung für limnologische Untersuchungen, auch wenn er in diesem Fall nicht für alle untersuchten Gewässer angewandt werden konnte. Das lag vor allem an der Kleinheit der Gewässer, die außer D und E < 5 ha betrug, für A, B, C, H und I sogar < 1 ha. Problematisch für eine Trophie-Index-Berechnung war ebenfalls, dass nicht zuletzt wegen der geringen Tiefe der Kleingewässer die Sichttiefe häufig nicht bestimmt werden konnte, da Grundsicht herrschte. Auch bei Makrophytendominanz ist der Trophie-Index nur eingeschränkt anwendbar.

Die Gewässer C, D, E, F und I waren durch Phytoplankton dominiert (in Abb. 2 grün dargestellt). Sie wiesen meist geringe Sichttiefen und pH-Werte im leicht alkalischen Bereich auf. Die Sauerstoffsättigung lag jedoch im Mittel bei unter 100 %. In den Gewässern G und H (blau dargestellt) dominierten submerse Makrophyten. In diesen Seen waren die TP-Konzentrationen geringer und die Sichttiefen größer, die Sauerstoffsättigung und der pH-Wert (nur in G) hingegen ähnlich hoch wie in den Phytoplankton-dominierten Seen. Das wies auf eine hohe Primärproduktion durch Phytoplankton oder submerse Makrophyten hin, die leichte O₂-Untersättigung aber auch auf große Bedeutung sauerstoffzehrender Prozesse. Zum einen verbraucht die große Biomasse temporär mehr O₂ als sie produziert, und zum anderen haben O₂-zehrende Prozesse am Sediment einen unmittelbaren Einfluss auf die Wasserqualität. Auch die teilweise hohen Konzentrationen von Ammonium (NH₄⁺) und gelöstem reaktivem Phosphor (SRP) waren ein Indiz für starke Mineralisationsprozesse am Sediment.

Eine besondere Stellung nahmen die Seen A und B ein. Auf See A hatte sich im Laufe des Sommers eine geschlossene Decke aus Wasserlinsen (*Lemnoidae*) gebildet. Unter der Wasserlinsendecke gab es kaum Licht, sodass Phytoplankton nicht wachsen und O₂ produzieren konnte. Die heterotrophen Prozesse überwogen. So erklären sich auch die hohen Konzentrationen von SRP und NH₄⁺. See B war von hohen Laubbäumen umgeben, also stark beschattet. Auch dort überwogen die sauerstoffzehrenden Prozesse und die Mineralisation, sodass im See an fast allen Terminen, trotz fehlender thermischer Schichtung, ein ausgeprägter Sauerstoffgradient festzustellen war.

Die Parameter Karbonathärte, Leitfähigkeit, Sulfat- und Chlorid-Konzentration zeigten ein ähnliches Muster. Die Gewässer D, E, F, H und I waren nach Kabus (2018) als mäßig karbonatarmer Gewässer einzustufen, was in der Mittelgebirgsregion, in der die Gewässer liegen, relativ häufig ist. Die teilweise sehr hohen Konzentrationen von Chlorid und Sulfat deuten auf anthropogene Belastung hin.

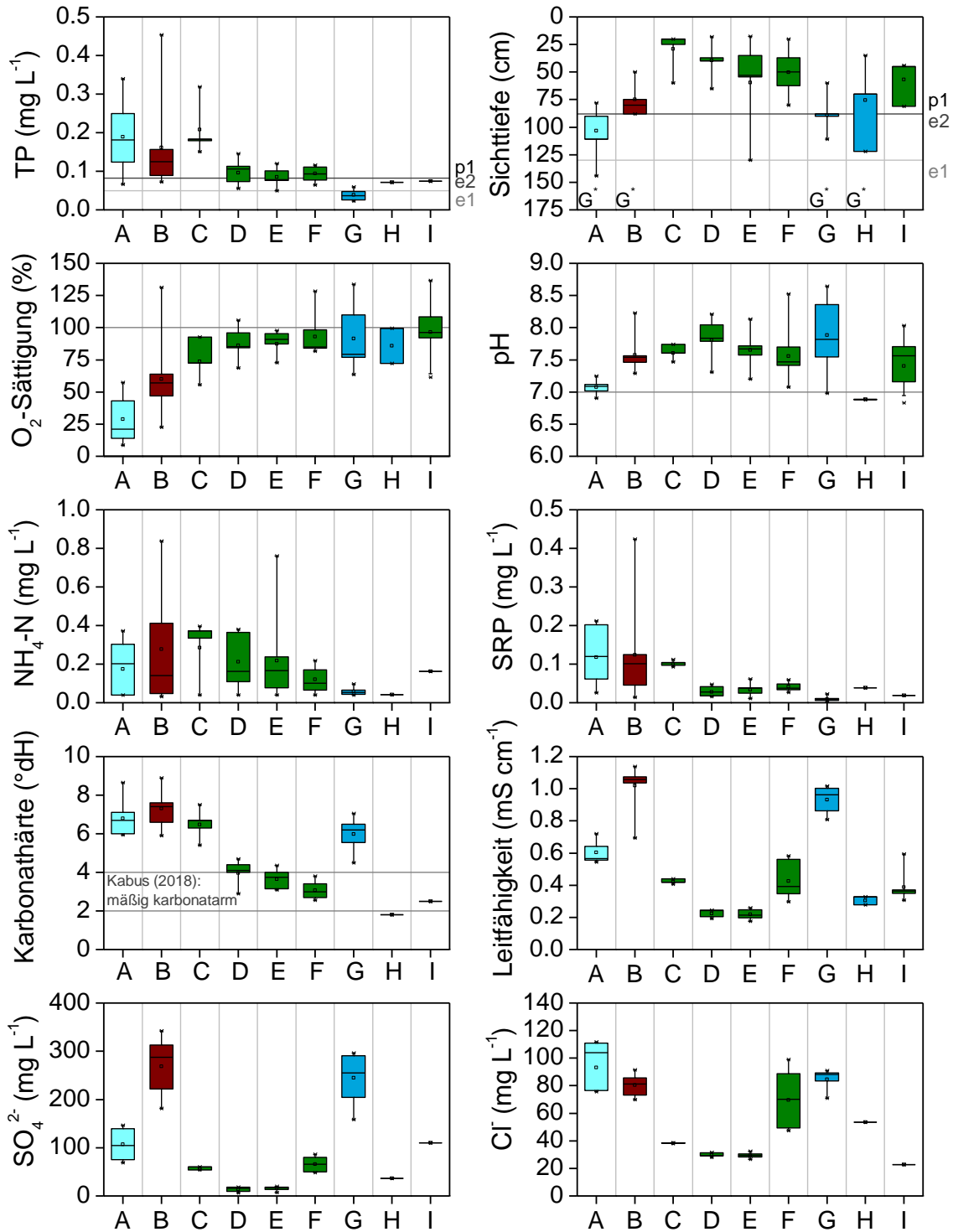


Abb. 2: Boxplots ausgewählter Wasserparameter von sieben Gewässern (zwei davon mit zwei Messstellen), die 2023 mit einem CaO₂-basierten Gewässertherapieprodukt behandelt wurden. Je nach Monitoringintensität wurden die Gewässer an 3 bis 9 Terminen beprobt. Grün steht für Phytoplankton-, blau für Makrophyten-dominierte Gewässer, braun: meist stark O₂-untersättigt. G*: teilweise Grundsicht bei der Sichttiefenmessung. e1, e2, p1: Trophie-Stufen nach LAWA (2014). Bereich mäßig karbonatarmer Gewässer nach Kabus (2018).

Die Jahrgänge der Phytoplanktonentwicklung zeigten typische Verläufe für polymiktische Flachseen mit hoher Phytoplankton-Abundanz, häufig einem größeren Anteil der Cyanobakterien sowie hohen TP-Konzentrationen und Sichttiefen vor allem im Spätsommer (Fellenberg, 2024). Da jedoch kein vollständiger Jahrgang vor der CGP-Behandlung untersucht werden konnte, wird auf eine vergleichende Betrachtung der Trophie vor und nach der Behandlung an dieser Stelle verzichtet.

Bestimmung der Schlammreduktion nach CGP-Behandlung

Da für eine Bestimmung der Sedimentmächtigkeit keine DIN-Vorschriften existieren, wurden unterschiedliche Verfahren angewandt und vergleichend analysiert:

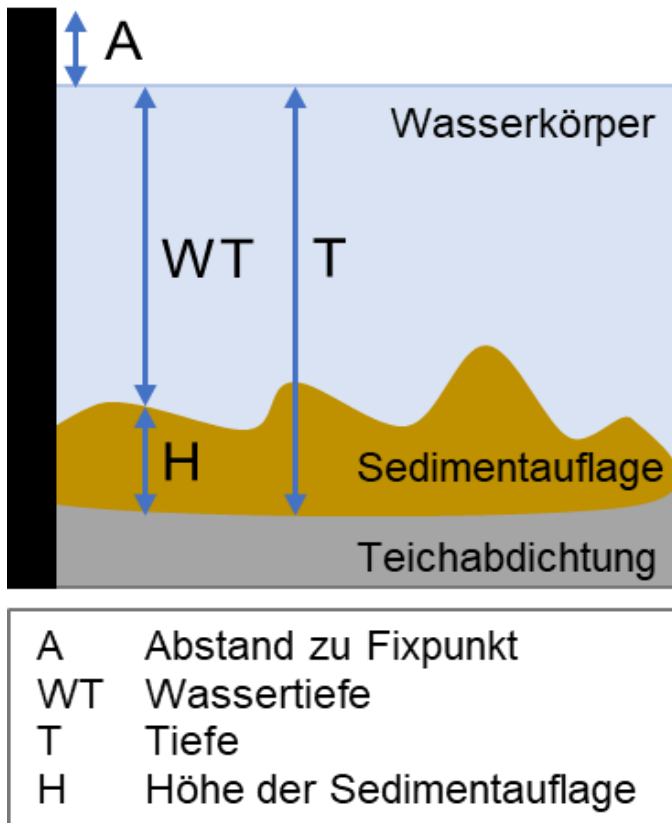


Abb. 3: Bestimmung der Sedimentmächtigkeit nach Ansatz 1 und 2.

Ansatz 1: Eine Messlatte wird kraftvoll in das Sediment bis zur Grenze der Teichabdichtung gedrückt (Tiefe T, Abb. 3). Die Höhe der Wasseroberfläche wird notiert. Anschließend wird eine Scheibe mit Maßband langsam in das Wasser herabgelassen bis sie auf der Sedimentoberfläche aufliegt und die Wassertiefe bestimmt (Wert WT). Aus der Differenz der Tiefe T und der Wassertiefe WT ergibt sich die Sedimenthöhe H. Zusätzlich wurde die Verwendung eines Schlammspiegelmessgeräts zur Bestimmung der Veränderung der Sedimentmächtigkeit getestet.

Ansatz 2: Es wird der Abstand A der Wasseroberfläche zu einem Fixpunkt am Ufer oder im Wasser (z. B. Mönch oder Pegellatte) notiert. Anschließend wird die Wassertiefe wie in Methode 1 durch das Auflegen der Scheibe ermittelt. Über einen Zeitraum kann mittels der Summe des Abstandes A und der Wassertiefe WT die Veränderung der Sedimentauflage anhand der Höhenänderung des freien Wasserkörpers ermittelt werden.

Ansatz 3: Ein Sedimentstecher (UWITEC GmbH, Mondsee, Österreich) wird in das Sediment gedrückt. Anhand der Sedimenthöhe im Stechrohr kann die Sedimentauflage über der Teichabdichtung, die meist aus Ton besteht und sich in Farbe und Konsistenz vom organisch geprägten Sediment unterscheidet, ermittelt werden.

Abbildung 4 zeigt die mit den verschiedenen Ansätzen bestimmten Veränderungen der Sedimenthöhen vor und nach der Behandlung mit CGP in einem Beispielgewässer. Dort zeigte sich eine Reduzierung der Sedimenthöhe an fünf von sechs Messpunkten, die jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt war. So wurde z. B. an Messpunkt 6 nur eine geringfügige Veränderung detektiert, da dort sandhaltiges Sediment vorherrschte. An den anderen Messpunkten wurde eine Verringerung der Sedimenthöhe um ca. ~10 cm detektiert, mit der stärksten Verringerung an Messpunkt 3 mit ca. ~40 cm. Ansatz 1 und 2 zeigten dabei ähnliche Ergebnisse, wohingegen Ansatz 3 meist geringere

Veränderungen ergab. Dies kann evtl. auf eine Kompaktierung des Sedimentes durch das Einstechen des Stechrohrs zurückzuführen sein. Grundsätzlich ergaben sich bei den Messtechniken zur Sedimentmächtigkeitsbestimmung diverse Probleme. Die Sedimente waren hinsichtlich Konsistenz und Mächtigkeit meist inhomogen verteilt, wobei unbekannt war, ob die Inhomogenitäten über die Zeit stabil blieben oder in welchem Ausmaß z. B. Wind und Wellenschlag temporäre Umlagerungen von Sediment verursachten. Zusätzlich wurde die Bestimmung der Sedimentobergrenze durch weiches, fluffiges Sediment erschwert. Weitere Störfaktoren waren z. B. Makrophyten oder Äste, die ein Aufliegen der Scheibe auf der Sedimentoberfläche verhinderten, insbesondere wenn bei geringer Sichttiefe die Messinstrumente nicht kontrolliert werden konnten. Im Zuge des Projektes wurden zusätzlich zu den präsentierten Methoden verschiedene Echolotvermessungen getestet. Die Ergebnisse befinden sich noch in der Auswertung.

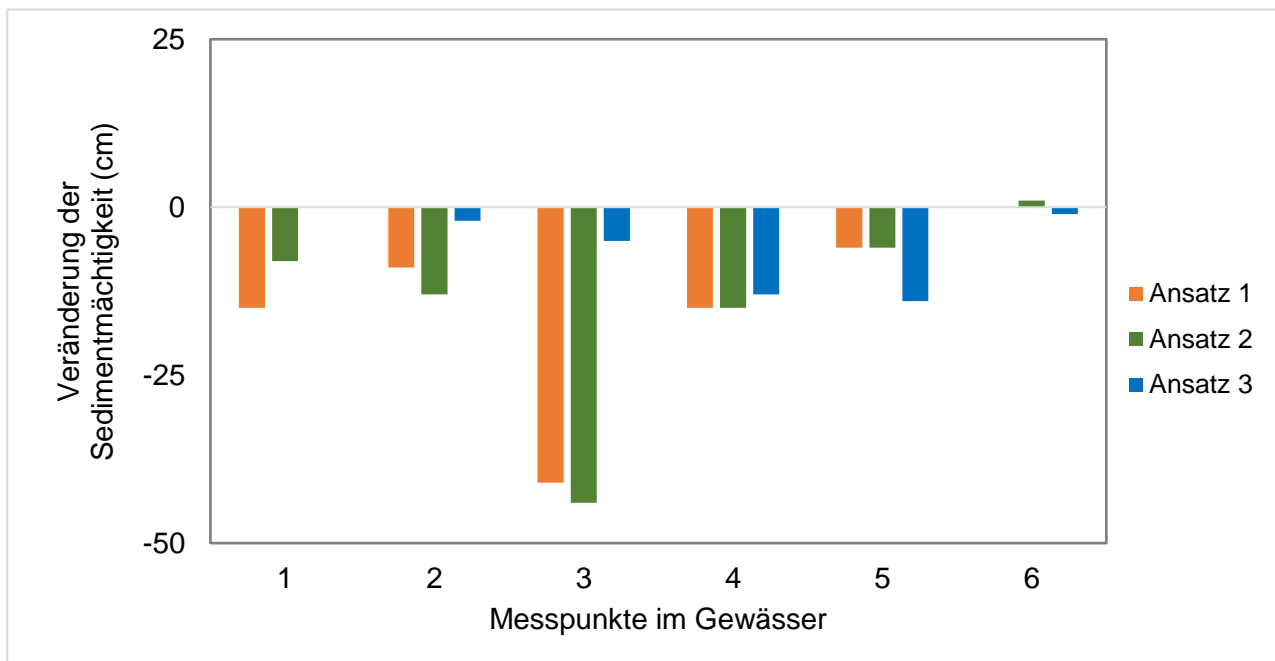


Abb. 4: Veränderung der Höhe der Sedimentauflage an 6 Messpunkten in einem eutrophen Kleingewässer nach der Behandlung mit CGP. Die Bestimmung der Sedimentmächtigkeit erfolgte mittels der im Text erläuterten Ansätze. Eine negative Veränderung der Sedimentmächtigkeit impliziert eine Verringerung der Sedimentauflage, während eine positive Veränderung eine Sedimentzuwachs anzeigt.

B) Mesokosmenversuche zur CGP-Behandlung

Zur vergleichenden Untersuchung der Wirkung des CGP unter realitätsnahen Bedingungen wurden in der Vegetationsperiode 2024 Mesokosmen-Versuche angesetzt. Hierfür wurde homogenisiertes Sediment aus einem Fischteich zu je 100 L in sechs kommerziell erhältliche Teichschalen (Fassungsvermögen 1000 L) mit Leitungswasser überschichtet, das in der Wasserhärte durch Zugabe von Calciumchlorid und Natriumhydrogencarbonat an das Originalwasser angepasst wurde. Nach einer zweiwöchigen Vorinkubation wurde die Hälfte der Mesokosmen mit 100 g m^{-2} CGP behandelt, die andere Hälfte diente als unbehandelte Kontrollinkubation.

Das Monitoring umfasste Sondenmessungen (gelöster Sauerstoff, Redoxpotential, pH, Leitfähigkeit, Chlorophyll- und Phycocyaninkonzentration) sowie Untersuchungen zur Wasser- und Sedimentbeschaffenheit an drei Zeitpunkten (1 x vor, 2 x nach Behandlung).

Das hydrologische Regime in den Mesokosmen erwies sich in der regenreichen Experimentalperiode 2024 als Störfaktor für den Untersuchungsansatz. Die Wasserparameter wiesen während des Beobachtungszeitraumes keinen signifikanten Unterschied zwischen den behandelten und unbehandelten Teichen auf. Es entwickelten sich Fadenalgen und Teichschnecken sowie Frösche und Molche unspezifisch zur Behandlung.

Die Veränderung der Sedimentparameter, inklusive der Ergebnisse der P-Extraktion ließen jedoch signifikante Unterschiede erkennen. Mittels der Behandlung konnte der Glühverlust im Durchschnitt um 2 % gegenüber den unbehandelten Teichen gesenkt werden (behandelt $33,32 \pm 0,25$ %; unbehandelt $35,42 \pm 0,55$ %; $p < 0,001$), was einen stimulierten Abbau organischer Substanz implizierte. Ebenfalls konnte bei gleichbleibenden TP-Gehalten der Sedimente (behandelt $1,211 \pm 0,095$ g/kg; unbehandelt $1,109 \pm 0,075$ g/kg), eine signifikante Erhöhung der stabilen Phosphor-Fraktionen HCl-P (behandelt $133,95 \pm 61,35$ mg/kg; unbehandelt $76,41 \pm 23,44$ mg/kg; $p < 0,05$) und Rest-P (behandelt $239,72 \pm 50,07$ mg/kg; unbehandelt $150,83 \pm 20,24$ mg/kg; $p < 0,05$) ermittelt werden. Diese Veränderung in den P-Bindungsformen deutet auf eine durch CGP erhöhte Transformation von bio-verfügbarem P in rekalcitrante P-Verbindungen hin (z. B. Apatit), welche kaum mehr bioverfügbar waren.

C) Sedimentmikrobiologische Untersuchungen

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Experimente durchgeführt, um Parameter zu identifizieren, die die Effizienz der CGP-Behandlung beeinflussen. Der Fokus lag dabei auf den biogeochemischen und mikrobiologischen Veränderungen im Sediment. Zur Untersuchung dieser Parameter wurden sowohl die Veränderung der mikrobiellen Lebensgemeinschaft *in situ* verfolgt, als auch Inkubationen in Mikrokosmen durchgeführt.

Zur Identifizierung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung wurden Sedimentkerne eines ausgewählten Kleingewässers mit unterschiedlichen Konzentrationen des CGP für die Wirkzeit des Produktes (ca. 8 Wochen) inkubiert. Während dieser Inkubationszeit wurden mittels Mikrosensoren Tiefenprofile der Sauerstoffsättigung, des Redoxpotentials und des pH-Wertes wiederholt gemessen. Vorläufige Ergebnisse zeigten einen Anstieg der Sauerstoffeindringtiefe im Millimeterbereich, was auf eine erhöhte Sauerstoffverfügbarkeit im Sediment hinwies. Zudem wurde eine Zunahme der Abundanz typischer aerober Mikroorganismen im Sediment bei hoher CGP-Dosierung nachgewiesen, darunter Spezies aus den bakteriellen Phyla der *Pseudomonadota*, *Bacteriodota* und *Bacillota*. All diese umfassten typische Abbauer von organischem Material (Detritus). Die Stärke dieser Veränderungen war Dosis-abhängig. Somit ergaben sich Hinweise auf eine Aktivierung der Sediment-Mikrobiota durch die CGP-Behandlung. Gleichzeitig haben wir keine Hinweise auf eine hemmende oder gar toxische Wirkung auf die im Sediment lebenden Mikroorganismen, selbst bei stark erhöhter, hier vierfacher, Dosierung gefunden.

Spätere Inkubationen mit einer erweiterten Auswahl an Sedimenten aus den im Projekt behandelten Kleingewässern zeigten jedoch unterschiedliche oder auch keine messbaren Effekte bei vergleichbarer Dosierung. In einigen Ansätzen wurde nach CGP-Zugabe eine erhöhte CO₂-Produktion beobachtet, was auf einen gesteigerten Abbau organischer Materie hindeutet, während in anderen Ansätzen eine verringerte CO₂-Produktion festgestellt wurde. Es scheint also, dass die individuelle Zusammensetzung und Struktur des Sediments einen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Behandlung ausübten. In einigen Sedimenten wurde bei Laborinkubation eine starke abiotische Turbation durch Gasbildung beobachtet, während in anderen eine starke Bioturbation durch benthische Fauna zu beobachten war. Diese Faktoren erschweren bislang einige generelle

Konklusionen zur Wirkung von CaO₂ auf die Biogeochemie und Mikrobiologie der Sedimente. Bis zum Ende dieses Projektes sollen robuste Parameter für die Prognose einer erfolgsversprechenden Behandlung mit CGP identifiziert werden.

Zusammenfassung

Ziele des „Schlamm-TEC“-Projektes sind neben der technischen Entwicklung eines Applikationsverfahrens die Aufklärung der Wirkmechanismen und die gewässerökologische Bewertung einer CGP-Anwendung sowie die Identifizierung von gewässer- und sedimentspezifischen Parametern, die den Effekt einer Behandlung mit CGP dokumentieren und möglichst quantifizieren.

1. Die Mehrzahl der untersuchten polymiktischen Kleinseen war dem eu- bis polytrophen Trophiebereich zuzuordnen und zeigte einen typischen saisonalen Verlauf mit sommerlichen Phytoplanktonmaxima. Da die Saisonalität vor der Behandlung nicht genau bekannt war, konnte ein Effekt der CGP-Behandlung auf Wassergüteparameter nicht eindeutig nachgewiesen werden. Gewässer mit Dominanz submerser Makrophyten wiesen vergleichsweise hohe Sichttiefen und geringe TP-Konzentrationen auf. Bei Dominanz von Wasserlinsen waren jedoch die TP- und SRP-Konzentrationen hoch. Die in diesem Falle starke O₂-Untersättigung führte zu einer Nährstoffakkumulation im Wasserkörper.
2. Obwohl die Auswahl der Modellgewässer auf ungeschichtete Seen mit einer Fläche zwischen 0,1 und 2 ha eingeschränkt war, dokumentieren die Projektergebnisse eine große Vielfalt der Ausprägungen und Kombinationen von chemischen und biologischen Parametern. Die Typisierungs- und Bewertungsansätze nach EG-WRRL und LAWA (2014) sind nur sehr eingeschränkt auf diese Kleingewässer anwendbar.
3. Trotz der Heterogenität, einem unbekanntem Einfluss allochthoner Einträge und der hohen Umsatzdynamik der Sedimente konnten in Einzelfällen eindeutige Ergebnisse bezüglich der Abnahme der Sedimentmächtigkeit beobachtet werden, was durch einen Methodenvergleich untermauert wurde.
4. Erste Ergebnisse aus Mikro- und Mesokosmenversuchen zeigten positive Effekte durch die CGP-Behandlung besonders im Sediment. So konnte eine erhöhte Sauerstoffeindringtiefe einhergehend mit einer erhöhten CO₂-Produktion und einer Anreicherung aerober Mikroorganismen für einige Sedimente detektiert werden.

Ausblick

Nach aktuellem Projektstand kann noch keine Aussage darüber getroffen werden, welche Monitoringparameter am besten für einen effizienten Nachweis eines Behandlungseffektes von CGP geeignet sind. Insbesondere erschweren messtechnische Unklarheiten eine valide Bestimmung der Höhe der Sedimentauflage. Um die horizontalen Inhomogenitäten besser zu erfassen, wurde im November 2024 in verschiedenen Modellgewässern eine noch größere Anzahl an Messpunkten als 2023 gesetzt. An diesen Messpunkten wurde die Höhe der Sedimentauflage nach allen drei vorgestellten methodischen Ansätzen bestimmt. Außerdem ist geplant, mit einem kleinen, echolotbestückten Vermessungsboot hochaufgelöste Tiefenkarten einiger Modellgewässer zu erstellen und mit den händischen Messungen abzugleichen. An einem Gewässer wurden zweimalig Echolotvermessungen mit Hilfe einer Drohne durchgeführt. Auch die Ergebnisse der Drohnenbefliegungen werden mit den *in-situ*-Messungen abgeglichen.

Des Weiteren wurden die Untersuchungen der 2024 CGP-behandelten Modellgewässer dahingehend intensiviert, dass sie durchgängig etwa monatlich untersucht wurden. Die Chlorophyllbestimmung wurde fest in das Monitoringprogramm aufgenommen. In drei Gewässern wurden nur Teilbereiche mit CGP behandelt, um mögliche Unterschiede zwischen Referenz- und behandeltem Bereich, vor allem bezüglich der Sedimentbeschaffenheit inklusive der Sedimentmikrobiologie, unter Freilandbedingungen nachweisen zu können. Für die 2023er Modellgewässer wurde teilweise das Monitoring bis in 2024 fortgesetzt, um einen vollständigen Jahresgang zu erfassen. Ein Gewässer wurde 2024 nochmals mit CGP behandelt. Bestandsdaten der Projektpartner fließen ebenfalls in die finale Datenauswertung des Projektes ein. Auf Grundlage dieser umfangreichen Datenbasis sollen neben Empfehlungen zu einem kosteneffizienten Monitoring auch Ansätze und Empfehlungen zur Typisierung und zur Setzung von realistischen Zielen für die Restaurierung von Kleinseen gegeben werden.

Danksagung

Für die verlässliche Unterstützung bei der CGP-Ausbringung und den Untersuchungen im Freiland danken wir Michael Neumann (WERTEC GmbH) und Ingo Henschke (BTU). Für die fleißige Arbeit im Labor bedanken wir uns bei Iris Roth und Max Ehlig (Söll GmbH) sowie Nisan Ege Kaymakçı (BTU). Unser Dank gilt außerdem Studierenden, die mit ihren Abschlussarbeiten wesentliche Projektergebnisse beigetragen haben: UBT: Kim Ziebis (Bachelorarbeit) sowie Felix Pfaff und David Krappmann (Masterarbeit), BTU: Lilly Luisa Fellenberg (Bachelorarbeit). Für die Entwicklung des Ausbringungsbootes und die technische Unterstützung des Projektes bedanken wir uns bei der Oase GmbH.

Das FuE-Kooperationsprojekt „Schlamm-TEC“ (16KN091022) „Entwicklung eines innovativen in-situ-Verfahrens zur kosteneffizienten und ökotechnologischen Schlammreduktion in ungeschichteten Kleinseen“ im ZIM-Netzwerk „Water4All – Schutz der Süßwasserressourcen“ Laufzeit: 01.09.2022 – 28.02.2025 wurde vom BMWK gefördert. <https://schlamm-tec.de>

Literatur

- DIN EN 15935:2021-10 (2012): Boden, Abfall, behandelter Bioabfall und Schlamm – Bestimmung des Glühverlusts; Deutsche Fassung EN 15935:2021.
- DWA (2021): Merkblatt ATV-M 250 „Maßnahmen zur Sauerstoffanreicherung von Oberflächengewässern“ zurückgezogen. Zurückziehung: <https://de.dwa.de/de/regelwerk-news-volltext/merkblatt-atv-m-250-ma%C3%9Fnahmen-zur-sauerstoffanreicherung-von-oberfl%C3%A4chengew%C3%A4ssern-zur%C3%BCckgezogen.html>
- DWA (2024): Merkblatt DWA-M 606: „Grundlagen und Maßnahmen der Seentherapie“, August 2024, 155 Seiten.
- EG (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. ABl. L 327 vom 22.12.2000, S. 1-73.
- Fellenberg, L. L. (2024): Wirkung eines kalziumperoxidhaltigen Präparates zur Seentherapie: Untersuchung des Phytoplanktons und der Trophie von sieben Kleinseen, Bachelor Thesis BTU Cottbus-Senftenberg.
- Hupfer, M., Gächter, R., Giovanoli, R. (1995): Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquatic Science*. 57/4: 305-324.
- Kabus, T. A. (2018): Weichwasserseen im brandenburgischen Jungmoränenland. Hydrochemie und Makrophytenbesiedelung, Dissertation BTU Cottbus-Senftenberg. ISBN-13: 978-3746799773.

- LAWA (2014): Trophieklassifikation von Seen. Richtlinie zur Ermittlung des Trophie-Index nach LAWA für natürliche Seen, Baggerseen, Talsperren und Speicherseen. Empfehlungen Oberirdische Gewässer. Hrsg. LAWA – Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser. 34 S. zzgl. Access-Auswertetool.
- Ma, Y., Zhang, B.-T., Zhao, L., Guo, G., Lin, J.-M. (2007): Study on the generation mechanism of reactive oxygen species on calcium peroxide by chemiluminescence and UV-visible spectra. *Luminescence the journal of biological and chemical luminescence* 22(6): 575-80.
- Psenner, R., Boström, B., Dinka, M., Pettersson, K., Pucsko, R., Sager, M. (1988): Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 30: 99-103.
- Psenner, R., Pucsko, R., Sager, M. (1984): Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten: Versuch einer Definition ökologisch wichtiger Fraktionen. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 70: 115-155.
- Ulrich, K.-U., Rau, A., Willuweit, T. (2020): Biochemisch stimulierter Schlammabbau in Flachseen: Machbarkeitsstudie. *Wasserwirtschaft* 6/2020: 23-28.