

Abschlussbericht 2025

Schäfersee-Verfahren

Stützung oder Sanierung von Gewässern mit sauerstoffarmen Wasserkörpern und hochbelasteten Sedimenten durch Stimulierung eines klimaneutralen mikrobiellen Abbaus

BMBF-Fördermaßnahme *KMU-innovativ: Ressourceneffizienz und Klimaschutz*

Anwendungsbereich: Nachhaltiges Wassermanagement

Förderkennzeichen: 02WQ1548A-B

Teil II – Gemeinsamer Ergebnisbericht

Büro Wassmann & Technische Universität Berlin, FG Umweltmikrobiologie

Laufzeit: 01.05.2021–30.04.2025

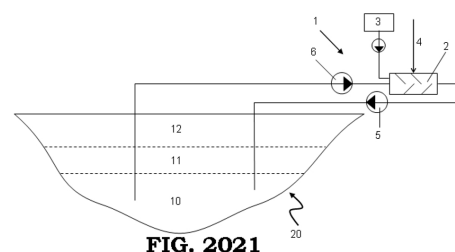
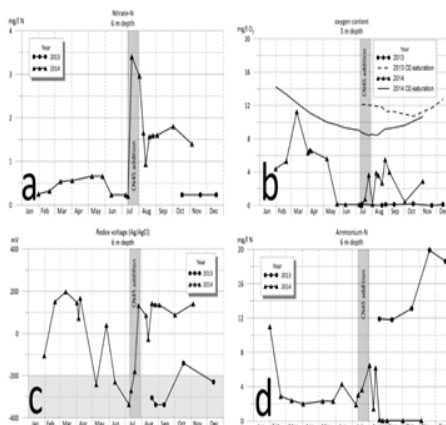


FIG. 2021



Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	5
2	Thema und Zielsetzung des Vorhabens	6
2.1	Problemstellung	6
2.2	Lösungsansatz des Schäfersee-Verfahrens	7
2.3	Zielsetzung des Projektes	8
2.4	Geplante Demonstrationsgewässer	9
2.5	Klimarelevanz	10
2.6	Innovationskern des Schäfersee-Verfahrens	11
2.7	Patent- und Schutzrechtslage	11
3	Projektverlauf und Abweichungen	12
4	Arbeitspakete und Ergebnisse	15
4.1	AP 00 – Projektkoordination und Organisation	15
4.2	AP 01 – Mikrobiologische Analysen (Technische Universität Berlin)	16
4.3	AP 02 – Schäfersee (Berlin) – geschichtetes Gewässer, Prototyp Pontons	17
4.4	AP 03 – Entwicklung kompakter stationärer Anlagen	18
4.5	AP 04a – Industriegewässer (Vorbereitung, nicht realisiert)	21
4.6	AP 04b – Fennsee (stationäre Anwendung, Flachgewässer)	21
4.7	AP 04c – Jröne Meerke (stationäre Anwendung, Hypolimnion)	22
4.8	AP 05 – Öffentlichkeitsarbeit und Transfer	24
5	Zusatzuntersuchungen	27
5.1	Sedimentanalysen Jröne Meerke (lanaplan GbR, 2025)	28
5.2	Geochemisch–mineralogische Untersuchungen (TU Berlin, 2024)	30
6	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	33
6.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten	33
6.2	Sauerstoffhaushalt und Redoxstabilisierung	35
6.3	Sauerstoffhaushalt	36
6.4	Hemmung reduktiver Prozesse und Gasbildung	37
6.5	Phosphordynamik und Sedimentprozesse	39
6.6	Mikrobiologische Befunde	40
6.7	Klimarelevante Effekte	43
6.8	Technische und prozessuale Erkenntnisse	44
7	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	47
7.1	Verwertbarkeit und Ausblick	48
8	Zusammenfassung und Fazit	49
	Literaturverzeichnis	51

Abbildungen

1	Schäfersee Pontons	17
---	------------------------------	----

2	Fennsee Übersichtskarte	20
3	Fennsee Fotos	20
4	Jröne Meerke Fotos	21
5	Jröne Meerke: Lage der Probenahmestelle und Sedimentkern	28
6	Phosphor-Rücklösungsraten Jröne Meerke	29
7	μRFA Schäfersee	31
8	XRD Schäfersee	31
9	Phosphor Sediment – Jröne Meerke	32
10	Redoxpotenzial Schäfersee	35
11	Sauerstoffgehalt Schäfersee	36
12	Gesamtposphor Schäfersee	40
13	Fennsee: Stoßdosierung nach Regenereignis	45
14	Jröne Meerke: Online-Redoxregulierung	46

1 Kurzfassung

Viele stehende Gewässer in Deutschland leiden unter Sauerstoffmangel und hoher organischer Belastung. Einträge von Nährstoffen und organischen Schadstoffen, insbesondere durch ungereinigtes Regenabwasser aus urbanen Einzugsgebieten, führen zu anoxischen Sedimentzonen, Faulschlammablagerungen und zur Bildung von Schwefelwasserstoff (H_2S) und Methan (CH_4). Diese Prozesse verursachen Geruchsbelastungen, fördern die Rücklösung von Phosphor und Metallen, beeinträchtigen benthische Lebensgemeinschaften und beschleunigen die Eutrophierung.

Das *Schäfersee-Verfahren*[®] wurde entwickelt, um diese reduktiven Prozesse gezielt zu unterbinden. Es kombiniert die Dosierung von Calciumnitrat mit sauerstoffangereichertem Wasser und koppelt sie an eine kontinuierliche Online-Erfassung steuerungsrelevanter Wasserparameter. Auf dieser Basis erfolgt eine adaptive *Prozesssteuerung*, die die Dosierung bedarfsgerecht regelt, das Redoxmilieu stabilisiert und die mikrobiellen Stoffumsätze gezielt lenkt. Dadurch werden Sulfatreduktion, H_2S - und CH_4 -Bildung weitgehend unterbunden, während Phosphor im Sediment gehalten und teilweise mineralisch gebunden wird. Das Verfahren arbeitet ressourcenschonend und klimaneutral und ermöglicht eine präzise, automatisierte Kontrolle der Gewässerprozesse.

Im Forschungsprojekt wurden an drei unterschiedlichen Gewässertypen – dem Schäfersee und Fennsee (Berlin) sowie dem Jörne Meerke (Neuss) – stationäre Anlagen entwickelt und erprobt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Stabilisierung der Redoxverhältnisse, den Rückgang der Schwefelwasserstoff- und Methanbildung sowie eine sichere Bindung von Phosphor im Sediment. Begleitende Analysen der TU Berlin belegten eine Verschiebung der mikrobiellen Gemeinschaften hin zu oxidativen und denitrifizierenden Prozessen sowie eine tendenzielle Abnahme methanbildender Organismen. Trotz vorhandener Sedimentbelastungen mit (Halb)Metallen und organischen Schadstoffen (PAK, MKW, EOX) zeigte sich keine relevante Mobilisierung bedenklicher Stoffe; unter den geschaffenen oxidativen Bedingungen nahmen die Konzentrationen organischer Verbindungen tendenziell ab.

Das Schäfersee-Verfahren[®] stellt damit ein neuartiges, datenbasiertes Instrument zur Stützung eutropher und kontaminierter Gewässer dar. Es ermöglicht die dauerhafte Aufrechterhaltung stabiler, oxidativer Bedingungen ohne den Einsatz energieintensiver Belüftung oder Entschlammung und leistet einen Beitrag zur Minderung klimarelevanter Emissionen.

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse vereinen die Beiträge beider Antragsteller – des Büro Wassmann und der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Umweltmikrobiologie. Der Berichtsteil II wurde als gemeinsamer Ergebnisbericht erstellt und fasst die feldtechnischen, chemisch-physikalischen und mikrobiologischen Ergebnisse des Gesamtvorhabens in integrierter Form zusammen.

2 Thema und Zielsetzung des Vorhabens

2.1 Problemstellung

Seen und stehende Gewässer in gemäßigten Klimazonen sind hochdynamische Ökosysteme, deren Sauerstoffhaushalt empfindlich auf Temperatur, Nährstoffeinträge und Schichtung reagiert. Zahlreiche Untersuchungen belegen in den letzten Jahrzehnten einen deutlichen Rückgang der Sauerstoffkonzentrationen sowohl in Oberflächen- als auch in Tiefenwasserschichten (Carey, 2023). Hauptursachen sind anthropogene Eutrophierung, steigende Wassertemperaturen und hydrologische Veränderungen, die zu längeren Schichtungsphasen und einer zunehmenden Ausdehnung anoxischer Zonen führen (LaBrie *et al.*, 2023; Dugener *et al.*, 2023). Besonders betroffen sind eutrophe, städtisch beeinflusste Gewässer mit hohen Einträgen aus Regen- und Straßenabflüssen sowie geringer Durchmischung. Hier begünstigen sommerliche Erwärmung und hohe Nährstofffrachten die Ausbildung stabiler Schichtungen und einen massiven Sauerstoffverbrauch im Hypolimnion.

Unter Sauerstoffmangel greifen Mikroorganismen auf alternative Elektronenakzeptoren zurück, um ihren Energiestoffwechsel aufrechtzuerhalten. Dabei wird zunächst Nitrat (NO_3^-) genutzt, das natürlicherweise nur in begrenzten Mengen vorhanden ist. Seine Reduktion verläuft über Zwischenstufen (NO_2^- , NO , N_2O) bis hin zu elementarem Stickstoff (N_2), der für das Ökosystem unbedenklich ist. Sobald dieses natürliche Nitratdepot erschöpft ist – was in eutrophen und warmen Gewässern innerhalb kurzer Zeit geschieht – übernehmen andere Elektronenakzeptoren wie Sulfat (SO_4^{2-}), Kohlendioxid (CO_2) oder Metalloxyde (Fe(III) , Mn(IV)) die Rolle im mikrobiellen Stoffwechsel. Diese reduktiven Prozesse führen zur Bildung von Schwefelwasserstoff (H_2S), Methan (CH_4), Ammonium (NH_4^+) und gelösten Metallionen.

Damit verschiebt sich das Redoxgleichgewicht im Sediment-Wasser-Übergangsbereich von einer oxidativen, stabilisierenden zu einer reduzierenden, instabilen Phase. Die Folge sind Faulschlammablagerungen, die Freisetzung von Schadstoffen und die Mobilisierung von Nährstoffen. Phosphor, der unter oxidischen Bedingungen an Eisen- oder Manganverbindungen gebunden ist, wird im reduzierenden Milieu gelöst und steht erneut als interne Nährstoffquelle zur Verfügung – ein sich selbst verstärkender Kreislauf aus Sauerstoffmangel, Stofffreisetzung und forcierter Eutrophierung entsteht.

Klassische Sanierungsmaßnahmen wie Belüftung, chemische Fällmittelgaben oder Entschlammung greifen unter diesen Bedingungen nur begrenzt. Belüftungsanlagen stoßen an physikalische Grenzen, da Sauerstoff bei höheren Temperaturen nur gering löslich ist und kaum in das Sediment diffundiert. Chemische Phosphatfällungen mit Aluminium-, Eisen- oder Lantanverbindungen (z. B. Bentophos®, Phoslock®) können Phosphor zwar binden, verändern jedoch das Redoxmilieu nicht. Selbst wenn die chemische Fixierung unter reduzierenden Bedingungen bestehen bleibt, bleiben anoxische und sulfidische Verhältnisse im Sediment bestehen. Das Milieu bleibt somit lebensfeindlich, Schwefelwasserstoff- und Methanbildung setzen sich fort, und der Faulschlamm wächst weiter an.

Eine nachhaltige Sanierung erfordert daher Verfahren, die nicht nur Stoffe binden, sondern das *bio-*

geochemische Milieu grundlegend stabilisieren und die natürlichen mikrobiellen Oxidationsprozesse im Sediment-Wasser-Kontaktbereich wiederherstellen.

2.2 Lösungsansatz des Schäfersee-Verfahrens

Das Schäfersee-Verfahren® wurde entwickelt, um den beschriebenen reduktiven Prozesskreislauf in belasteten Gewässern gezielt zu unterbrechen. Grundlage des Ansatzes ist die kontrollierte Bereitstellung von Nitrat in Kombination mit Sauerstoff, wodurch die mikrobiellen Oxidationspfade im Sediment-Wasser-Übergangsbereich reaktiviert und aufrechterhalten werden.

Im Zentrum steht dabei die Erkenntnis, dass Nitrat (NO_3^-) der bevorzugte Elektronenakzeptor unter anoxischen Bedingungen ist, solange es in ausreichender Menge vorhanden ist. Durch die Zugabe von Calciumnitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) wird der natürliche, aber schnell erschöpfte Nitratpuffer verlängert und damit der oxidative Stoffwechsel mikrobieller Gemeinschaften gezielt unterstützt. Die Denitrifikation führt zu elementarem Stickstoff (N_2), der ohne weitere Reaktivität in die Atmosphäre entweicht. Gleichzeitig werden Sulfatreduktion und Methanogenese effektiv unterbunden – Prozesse, die für die Bildung toxischer Gase und die Freisetzung von Nährstoffen verantwortlich sind.

Das Verfahren verändert somit nicht die natürlichen biogeochemischen Mechanismen, sondern *stabilisiert und verstärkt* bestehende oxidative Prozesse, die im System grundsätzlich angelegt, jedoch unter Belastungsbedingungen abgeschwächt oder vollständig zum Erliegen gekommen sind. Durch die kontrollierte Nitratbereitstellung wird das Redoxpotenzial im Sediment stabil positiv gehalten, Schwefelwasserstoff (H_2S) eliminiert, und der mikrobiell vermittelte Abbau organischer Substanzen gefördert.

Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal des Schäfersee-Verfahrens® liegt in der *prozessorientierten Steuerung*: Die Dosierung von Calciumnitrat erfolgt nicht konstant, sondern auf Grundlage kontinuierlicher Online-Messungen zentraler Parameter wie Sauerstoff, Redoxpotenzial und Nitratkonzentration. Die Messwerte werden in Echtzeit erfasst, bewertet und automatisch in Steuerbefehle für die Dosieranlage übersetzt. Auf diese Weise entsteht ein geschlossener Regelkreis, der die biogeochemischen Zustände im Gewässer aktiv stabilisiert.

Diese adaptive Regelstrategie unterscheidet das Verfahren grundlegend von herkömmlichen Sanierungsmaßnahmen. Während klassische Methoden reaktiv auf Störungen reagieren, erlaubt die kontinuierliche Prozesssteuerung eine *vorausschauende Regelung* des Gewässerzustands. Dadurch kann das System selbst bei wechselnden Umweltbedingungen – etwa nach Starkregen, Temperaturanstieg oder Schichtungseinbruch – dynamisch angepasst werden.

Das Schäfersee-Verfahren® stellt damit einen paradigmatischen Ansatz für die moderne Gewässertherapie dar: Es verbindet ökologische Prozesse mit ingenieurtechnischer Regelungstechnik und ermöglicht erstmals eine *aktive Steuerung* der Redoxverhältnisse in Echtzeit. Durch diese Integration von Sensorik, Datenauswertung und automatisierter Dosierung wird eine dauerhaft stabile, ressourcenschonende und ökologisch verträgliche Behandlung eutropher Gewässer erreicht.

2.3 Zielsetzung des Projektes

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung, Erprobung und wissenschaftliche Bewertung eines prozessgesteuerten Verfahrens zur Stabilisierung anoxischer Gewässerzonen. Das Schäfersee-Verfahren® sollte zeigen, dass durch die gezielte Bereitstellung von Nitrat in Kombination mit Sauerstoff eine dauerhafte Redoxstabilisierung und damit eine ökologische Regeneration auch stark belasteter Systeme möglich ist.

Im Mittelpunkt stand dabei nicht die klassische Reduktion äußerer Nährstoffeinträge, sondern die *reaktive Behandlung des Tiefenwasserkörpers und der Sediment-Wasser-Kontaktzone*. Dort sollten die mikrobiellen Oxidationsprozesse gezielt stimuliert und stabilisiert werden, um:

- die Bildung toxischer Stoffe wie Schwefelwasserstoff (H_2S) und Methan (CH_4) zu verhindern,
- den mikrobiellen Abbau organischer Substanzen zu fördern und den Faulschlammabbau zu beschleunigen,
- sowie langfristig ein oxidierendes, ökologisch stabiles Milieu im Hypolimnion zu etablieren.

Über die unmittelbare Sanierung hinaus zielte das Verfahren darauf ab, die *Resilienz der behandelten Gewässer* zu stärken – also ihre Fähigkeit, nach Belastungsereignissen wie Starkregen oder hohen organischen Einträgen in einen stabilen, oxidierenden Zustand zurückzukehren.

Die Frage nach der Bindung und Rücklösung von Phosphor war zu Projektbeginn nicht zentraler Untersuchungsgegenstand, gewann jedoch im Verlauf der Arbeiten zunehmend an Bedeutung. Erste Messungen zeigten, dass die Stabilisierung des Redoxmilieus nicht nur die Bildung reduktiver Gase verhinderte, sondern zugleich zu einer deutlichen Abnahme gelöster Phosphorfraktionen führte. Daraus ergab sich ein zusätzlicher, ursprünglich nicht erwarteter Wirkungspfad des Verfahrens, der im weiteren Projektverlauf gezielt durch ergänzende geochemische und mineralogische Untersuchungen verfolgt wurde.

Ein zentrales Ziel war zudem die *technische Umsetzung als automatisiertes, sensorgestütztes System*. Dazu sollten stationäre Anlagen mit kontinuierlicher Online-Erfassung von Sauerstoff, Redoxpotenzial, Nitrat und weiteren Kenngrößen entwickelt werden, die eine bedarfsgerechte Dosierung in Echtzeit ermöglichen. Die Entwicklung einer solchen *aktiven Prozesssteuerung* – die Messung, Bewertung und Regelung der Gewässerbehandlung in einem geschlossenen Regelkreis verbindet – stellt einen neuartigen Ansatz in der Gewässertherapie dar.

Darüber hinaus sollten die im Projekt gesammelten Daten und Erfahrungen dazu dienen,

- die biogeochemischen Wirkmechanismen der Nitratdosierung zu quantifizieren,
- die Übertragbarkeit des Verfahrens auf unterschiedliche Gewässertypen (tiefe Seen, Flachgewässer, Regenrückhaltebecken) zu bewerten,
- die ökologische Verträglichkeit und mögliche Auswirkungen auf Flora, Fauna und mikrobielle Gemeinschaften zu untersuchen,

- sowie die *Klimarelevanz* des Verfahrens durch die Unterdrückung methanogener Prozesse abzuschätzen.

Das Projekt zielte somit auf die Etablierung eines *skalierbaren, ressourceneffizienten und ökologisch verträglichen Sanierungsverfahrens*, das es erlaubt, hochbelastete urbane und industrielle Gewässer dauerhaft zu stabilisieren, ohne auf invasive oder chemisch irreversibel wirkende Maßnahmen zurückgreifen zu müssen.

2.4 Geplante Demonstrationsgewässer

Für die Demonstration und Validierung des Schäfersee-Verfahrens® sollten verschiedene Gewässertypen berücksichtigt werden, die exemplarisch für typische Belastungssituationen in urbanen und industriellen Kontexten stehen. Dabei war eine Kombination aus einem langjährig untersuchten Referenzsee, einem großmaßstäblichen Industriegewässer sowie weiteren städtischen Gewässern mit besonderen Problemstellungen vorgesehen.

- **Schäfersee (Berlin):** Der Schäfersee bildet das Referenzgewässer des Projekts. Er liegt im Zentrum Berlins und ist durch sein disproportional großes Einzugsgebiet (über 240 ha bei nur 4,5 ha Wasserfläche) besonders stark durch Regenwasserzuflüsse belastet. Über Jahrzehnte haben sich hier bis zu zwei Meter mächtige Faulschlammschichten gebildet, die eine ganzjährige Sauerstoffleere im Hypolimnion verursachten. Infolge reduktiver Prozesse kam es regelmäßig zur Bildung von Methan und Schwefelwasserstoff, verbunden mit toxischen Effekten und Rücklösungen von Phosphor aus dem Sediment. Eine partielle Entschlammung des Uferbereichs bis ca. 3,5 m Tiefe wurde bereits vor rund zehn Jahren durchgeführt; die tiefen Sedimente gelten jedoch aus Kostengründen nicht entfernbar. Seit 2013 laufen kontinuierliche Untersuchungen, seit 2017 wird der See dauerhaft durch das Schäfersee-Verfahren® gestützt. Aufgrund dieser langen Zeitreihe eignet sich der Schäfersee insbesondere als wissenschaftlich wertvolles Referenzobjekt, auch wenn hier kein klassischer „Vorher-Nachher“-Effekt mehr darstellbar ist.
- **Industriegewässer (Niedersachsen) – Voruntersuchung, nicht umgesetzt:** Als Ergänzung zum Referenzgewässer war zunächst ein weiteres, industriell beeinflusstes Vergleichsgewässer in Niedersachsen für eine Demonstration im größeren Maßstab vorgesehen. Das Gewässer weist eine ausgeprägte Sedimentbelastung mit anoxischen Zonen und Schwefelwasserstoffbildung auf und galt daher als geeigneter Modellstandort zur Übertragbarkeit des Verfahrens. In den Jahren 2021 und 2022 wurden dort umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt, einschließlich Messungen von Sauerstoff-, Redox- und Nährstoffprofilen sowie Sedimentbeprobungen. Geplant war der Aufbau einer stationären Anlage zur kontinuierlichen Dosierung und Belüftung. Aufgrund fehlender behördlicher Genehmigungen und administrativer Auflagen konnte die technische Umsetzung jedoch nicht erfolgen. Die in dieser Phase gewonnenen Messdaten und konzeptionellen Erfahrungen wurden für die Weiterentwicklung der Steuer- und Regelstrategien genutzt und bildeten

eine wesentliche Grundlage für die nachfolgenden Anlagenrealisierungen am Fennsee und am Jörne Meerke.

- **Flughafensee (Berlin) – geprüft, aber nicht umgesetzt:** Als Alternative zum ursprünglich vorgesehenen Gewässer wurde der Flughafensee in Berlin in Betracht gezogen. Dieses rund 30 ha große, bis zu 35 m tiefe Gewässer erhält über den Schwarzen Graben erhebliche Mengen an Regenwasserzuflüssen und gilt als stark belastet. Besonders das etwa 3 ha große Vorbecken im nordöstlichen Zulaufbereich, mit einer maximalen Tiefe von rund 14 m, weist regelmäßig hohe Nährstoffgehalte und ausgeprägte anoxische Bedingungen auf. Dieser Teilbereich ist durch eine sogenannte Algensperre teilweise vom Hauptsee abgetrennt und bildet damit ein hydraulisch eigenständiges Becken, das etwa ein Zehntel der Gesamtfläche des Sees umfasst. In diesem Abschnitt befindet sich auch eine seit Jahrzehnten betriebene Belüftungsanlage, deren Infrastruktur eine vergleichsweise einfache technische Einbindung des Schäfersee-Verfahrens® ermöglicht hätte. Fachlich wäre der Standort besonders geeignet gewesen, da sich hier ein klar abgegrenztes, tiefes Hypolimnion für eine gezielte Behandlung angeboten hätte. Das Vorhaben konnte jedoch nicht innerhalb des vorgesehenen Projektzeitraums umgesetzt werden.
- **Ersatzstandorte – Jörne Meerke (Neuss) und Fennsee (Berlin):** Nachdem weder das Industriegewässer noch der Flughafensee realisiert werden konnten, wurden im Zuge einer Projektverlängerung zwei neue Demonstrationsstandorte gewonnen. Das *Jörne Meerke* ist ein überwiegend flacher Baggersee (3–4 m), der jedoch eine bis zu 8 m tiefe Senke aufweist. Gerade in dieser Tiefenzone kam es regelmäßig zu reduktiven Bedingungen mit Schwefelwasserstoffbildung und signifikanter Phosphorrücklösung aus dem Sediment. Ziel war es, durch das Verfahren die giftige Tiefenzone aufzulösen und das Redoxpotenzial nachhaltig zu stabilisieren. Der *Fennsee* in Berlin ist dagegen ein nur bis 3 m tiefes Regenrückhaltebecken, das in erheblichem Maße mit Straßenabflüssen belastet wird. Aufgrund der fehlenden Schichtung traten Faulschlammprozesse hier direkt im gesamten Wasserkörper auf, sodass der Schwefelwasserstoffgeruch bis in die Umgebung wirkte. Die Behandlung konzentrierte sich deshalb auf oberflächennahe, ereignisgesteuerte Dosierungen. Mit diesen beiden Standorten konnten unterschiedliche Problemtypen (lokale Tiefenzone versus flaches Becken) adressiert und die Anwendbarkeit des Verfahrens in einer breiteren Spanne von Gewässern demonstriert werden.

2.5 Klimarelevanz

Die im Projekt untersuchten Gewässer gehören zu den stark belasteten, eutrophen Systemen, die regelmäßig anoxische Bedingungen im Tiefenwasser entwickeln. Unter diesen reduzierenden Milieubedingungen bilden sich in den Sedimenten große Mengen Methan (CH_4), das über Diffusion und insbesondere über Gasblasen (*Ebullition*) in die Atmosphäre entweichen kann. Solche Gewässer gelten daher als bedeutende Quellen klimarelevanter Treibhausgase, insbesondere in gemäßigten Breiten, in denen zahlreiche kleinere und flachere Seen hohe spezifische Emissionen aufweisen (Aben *et al.*, 2017).

Methan besitzt ein deutlich höheres Treibhauspotenzial als Kohlendioxid (CO₂). In der Klimaberichterstattung wird hierfür das sogenannte *Global Warming Potential* (GWP) verwendet, das die Erwärmungswirkung eines Gases über einen definierten Zeitraum mit der von CO₂ vergleicht. Üblicherweise werden ein 100-jähriger (GWP₁₀₀) und ein 20-jähriger Zeithorizont (GWP₂₀) betrachtet. Nach den Angaben des IPCC AR6 beträgt das GWP₁₀₀ für Methan (fossil) etwa 29,8 und das GWP₂₀ etwa 82,5, jeweils unter Berücksichtigung von Klima-Kohlenstoff-Rückkopplungen (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023; Howarth, 2024). Diese Werte verdeutlichen, dass Methan vor allem kurzfristig eine überproportional starke Klimawirkung entfaltet.

Ziel der im Projekt durchgeführten Maßnahmen ist daher nicht nur die ökologische Stabilisierung der Gewässer, sondern auch die Reduzierung der Treibhausgasfreisetzung durch die Unterdrückung der Methanogenese. Die Schaffung eines dauerhaft oxidierenden Milieus im Sediment-Wasser-Übergang unterbindet die Bildung und Freisetzung von Methan effektiv und trägt damit zur Klimarelevanz der Maßnahme bei.

2.6 Innovationskern des Schäfersee-Verfahrens®

Das Besondere des Schäfersee-Verfahrens® liegt in der Kombination von Calciumnitrat (CN45) mit sauerstoffangereichertem Wasser sowie der kontinuierlichen, online-gesteuerten Dosierlogik. Die Behandlung erfolgt prozessorientiert: es wird nur so viel appliziert, wie in diesem Moment aufgrund der Messdaten erforderlich ist.

Damit unterscheidet sich das Verfahren deutlich von klassischen, punktuellen Chemikaliengaben oder unspezifischen Belüftungsmaßnahmen. Die technische Umsetzung als stationäre Anlage (Container am Ufer, Tanklager, unterirdische Leitungen, automatische Steuerung) soll gewährleisten, dass eine dauerhafte und ressourcenschonende Anwendung im kommunalen Maßstab möglich ist.

Neben der Stützung ökologisch stark belasteter urbaner Gewässer bietet das Verfahren Potenzial für den industriellen Einsatz sowie für die Reduzierung klimarelevanter Emissionen aus Binnengewässern.

2.7 Patent- und Schutzrechtslage

Das Verfahren wird in Deutschland als Marke *Schäfersee-Verfahren*® geführt. Die technische Schutzrechtsbasis bildet das internationale Patent "Remediation and/or restoration of an anoxic body of water" (PCT/EP2017/057041), das von Yara International ASA angemeldet wurde. Durch vertragliche Vereinbarungen besitzt das Büro Wassmann exklusive Anwendungsrechte in mehreren europäischen Ländern.

3 Projektverlauf und Abweichungen

Projektstart und Rahmenbedingungen. Das Verbundvorhaben *Schäfersee-Verfahren*[®] startete mit dem Förderbeginn am 01. Mai 2021. Ziel war die Weiterentwicklung und wissenschaftliche Validierung eines umweltverträglichen Verfahrens zur Redoxstabilisierung urbaner Gewässer durch kontrollierte Zugabe von Calciumnitrat und Sauerstoff. Die Projektleitung und technische Entwicklung lagen beim Büro Wassmann, während die Technische Universität Berlin, Fachgebiet Umweltmikrobiologie, mikrobiologische und molekularbiologische Analysen sowie gemeinsame Felduntersuchungen durchführte. Der ursprünglich geplante Projektbeginn verzögerte sich aufgrund des späten Förderbescheids und der pandemiebedingten Rahmenbedingungen leicht. Zusätzlich führte ein IT-Sicherheitsvorfall an der TU Berlin zu vorübergehenden Einschränkungen der Datenverarbeitung. Inhaltlich konnten alle geplanten Arbeitspakete dennoch im vorgesehenen Zeitraum aufgenommen werden.

Jahr 2021 – Aufbauphase und erste Untersuchungen. Im ersten Projektjahr erfolgte der planmäßige Einstieg in die operative Umsetzung des Forschungsvorhabens. Der Schwerpunkt lag auf der Etablierung der Messmethodik, der Durchführung erster Felduntersuchungen und der Erhebung von Referenzdaten für die spätere Anlagenentwicklung. Die Arbeiten wurden gemeinsam durch das Büro Wassmann und die TU Berlin, Fachgebiet Umweltmikrobiologie, durchgeführt.

- Einrichtung und Inbetriebnahme einer mobilen Pilotanlage zur dosierten Einleitung von Calciumnitrat am Schäfersee (Berlin-Reinickendorf);
- Durchführung erster Wasserprobenahmen und Tiefenprofile zur Charakterisierung des unbehandelten Ausgangszustands;
- Installation zusätzlicher Online-Sensorik (Sauerstoff, Redox, Temperatur, Leitfähigkeit) in mehreren Wassertiefen auf einem schwimmenden Ponton;
- Aufbau eines Webservers zur Echtzeitdatenübertragung und externen Überwachung der Messwerte;
- Beginn der regelmäßigen Dosierungen ab Ende Mai 2021 im Rahmen eines Testbetriebs;
- Gemeinsame Entnahme und Aufbereitung von Sedimentkernen durch Büro Wassmann und TU Berlin zur mikrobiologischen und geochemischen Untersuchung;
- Durchführung von ergänzenden Voruntersuchungen an einem industriell genutzten Gewässerstandort in Niedersachsen zur Bewertung unterschiedlicher Belastungssituationen.

Die Arbeiten verliefen im Einklang mit dem genehmigten Arbeitsplan. Die Erhebungen bildeten die methodische und datentechnische Grundlage für die nachfolgende Entwicklung der stationären Anlagentechnik und der automatisierten Regelstrategie.

Jahr 2022 – Konsolidierung und methodische Erweiterung. Im zweiten Projektjahr wurden die im Arbeitsplan vorgesehenen Untersuchungen fortgeführt und methodisch erweitert. Schwerpunkt war die Stabilisierung des laufenden Betriebs am Schäfersee sowie die Vorbereitung der stationären

Anlagenentwicklung.

- Fortführung der chemisch-physikalischen Messreihen am Schäfersee mit Sensoren in unterschiedlichen Wassertiefen und kontinuierlicher Online-Erfassung über den eingerichteten Webserver;
- Regelmäßige Probenahmen zur Erfassung saisonaler Veränderungen von Sauerstoff, Redoxpotential und Nährstoffverteilung;
- Standardisierung der Probenaufbereitung und Datenübertragung zwischen beiden Partnern;
- Planung und technische Auslegung der stationären Anlage (Ausführungsphase gemäß Projektplan: März bis Juni 2022);
- Installation eines Messpontons am Industriegewässer in Niedersachsen (Juli 2022) mit identischer Sensorik und Webserveranbindung zur kontinuierlichen Erfassung der Tiefenprofile;
- Abstimmung mit Fachingenieuren und Elektrikern zur Vorbereitung der stationären Anlagentechnik.

Die Herstellung und Installation der stationären Anlage erfolgte in diesem Zeitraum noch nicht, da zunächst konstruktive und steuerungstechnische Details abgestimmt wurden. Die bisherigen Ergebnisse bestätigten die Eignung der eingesetzten Sensorik und lieferten die Datengrundlage für die spätere Implementierung der automatisierten Regelstrategie. Inhaltliche Abweichungen vom genehmigten Arbeitsplan traten nicht auf.

Jahr 2023 – Standortanpassung und Beginn der erweiterten Untersuchungen. Im Jahr 2023 wurde das Projekt planmäßig fortgeführt, mit dem Schwerpunkt auf der Gewinnung neuer Standorte und der Erweiterung des Messprogramms. Nach Abschluss der Standortauswahl wurden die Vorbereitungen zur Laufzeitverlängerung eingeleitet und gleichzeitig erste Vorher-Nachher-Untersuchungen am neuen Standort Fennsee begonnen.

- Fortführung der Messprogramme und Dosierungen am Schäfersee mit angepasster Sensorik und Echtzeitdatenerfassung;
- Beginn der gemeinsamen Probenahmen am Fennsee durch Büro Wassmann und TU Berlin zur Erfassung der Ausgangsbedingungen (Vorher-Nachher-Vergleich);
- Erweiterung der Untersuchungen um Gasfallenmessungen an Schäfersee und Fennsee zur Ermittlung der Methanflüsse (jeweils 24 h-Integrationszeit nach der Probenahme);
- Detaillierte Standortanalysen und technische Planung für die beiden neuen Anlagen am Fennsee (Berlin) und am Jörne Meerke (Neuss);
- Beantragung und Bewilligung der Projektverlängerung bis April 2025 zur Umsetzung und Erprobung der neuen Anlagen.

Die Untersuchungen erfolgten in enger Abstimmung zwischen Büro Wassmann und der TU Berlin und verliefen im Einklang mit dem genehmigten Arbeitsplan. Die erzielten Ergebnisse bildeten die Grundlage für die spätere Installation der stationären Anlagen und die Validierung der erweiterten Messmethodik.

Jahr 2024 – Aufbau, Inbetriebnahme und erweiterte Untersuchungen. Im Verlängerungszeitraum 2024 wurden die technischen und wissenschaftlichen Arbeiten planmäßig fortgesetzt und abgeschlossen. Schwerpunkt des Jahres war die Inbetriebnahme der beiden neuen stationären Anlagen, die Integration in das bestehende Messnetz sowie die Erweiterung der begleitenden Analysen.

- Aufbau und Inbetriebnahme einer landgestützten Anlage am Fennsee (Berlin) mit Online-Datenerfassung, Fernsteuerung und Dosierung in das Ostbecken (Referenz: Westbecken);
- Installation und Inbetriebnahme der Anlage am Jörne Meerke (Neuss) mit kombinierter Nitratdosierung sowie Sauerstoffzufuhr über Leitungswasser;
- Einrichtung eines Messpontons am Jörne Meerke mit Sensorik in verschiedenen Wassertiefen, Anbindung an Webserver und Fernübertragung sämtlicher Messdaten;
- Fortführung der Gasfallenmessungen an Schäfersee und Fennsee zur Quantifizierung der Methanflüsse (jeweils 24 h-Integrationszeit nach der Probenahme);
- Durchführung zusätzlicher Spezialuntersuchungen:
 - HPLC-Analytik zur Bestimmung von Mikrocytinen am Fennsee,
 - Untersuchungen zur geochemischen Phosphorbindung an Schäfersee und Jörne Meerke,
 - ergänzende Probenahmen und Analysen im Rahmen des Projekts *lanaplan* am Jörne Meerke.
- Integration aller neuen Systeme in das bestehende Webserver-basierte Monitoringkonzept mit Echtzeitübertragung und Fernsteuerung.

Die Messprogramme wurden an allen Standorten gemäß Arbeitsplan durchgeführt und um standortspezifische Fragestellungen erweitert. Zeitliche Verzögerungen ergaben sich ausschließlich aus witterungsbedingten Einschränkungen und logistischer Abstimmung während der Inbetriebnahmephase. Insgesamt verlief das Jahr 2024 planmäßig und bildete den Abschluss der technischen Erprobung des Schäfersee-Verfahrens® unter unterschiedlichen Gewässerbedingungen.

Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan. Die wesentlichen Abweichungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag resultierten aus externen Einflüssen und der notwendigen Standortänderung:

- pandemiebedingte Verzögerungen in Personalverfügbarkeit und Probennahmen (2021–2022),
- temporäre IT-Ausfälle an der TU Berlin mit eingeschränkter Datenbearbeitung (2021),
- Vorzeitige Beendigung des Teilprojektes am industriellen Standort (Industriegewässer Niedersachsen) und daraus folgende Standortänderung (2023),
- Laufzeitverlängerung zur Installation und Erprobung der neuen Anlagen (2024–2025).

Trotz dieser Anpassungen konnten sämtliche Arbeitspakete inhaltlich umgesetzt werden. Die Projektverlängerung ermöglichte die vollständige technische Realisierung beider Anlagen und die Überprüfung der Wirksamkeit des Verfahrens unter unterschiedlichen Gewässerbedingungen.

4 Arbeitspakete und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die im Rahmen des Projektes bearbeiteten Arbeitspakete vorgestellt und die erzielten Ergebnisse beschrieben. Die Gliederung folgt den im Förderantrag definierten Arbeitspaketen, wobei der Schwerpunkt auf den vom Büro Wassmann durchgeführten Arbeiten liegt. Dazu zählen insbesondere die technische Entwicklung und Installation der Anlagen, das Monitoring der Gewässer, die Auswertung der Messdaten sowie die Koordination des Gesamtvorhabens. Die wissenschaftlichen Untersuchungen der Projektpartner, insbesondere der TU Berlin (Umweltmikrobiologie), sowie die im Auftrag durchgeführten mineralogischen Analysen werden ergänzend berücksichtigt, soweit sie zum Verständnis der Gesamtergebnisse beitragen.

4.1 AP 00 – Projektkoordination und Organisation

Das Büro Wassmann war für die Gesamtkoordination des Verbundprojekts verantwortlich. Dies umfasste die Abstimmung aller fachlichen und organisatorischen Schritte mit dem Projektpartner Technische Universität Berlin (Fachgebiet Umweltmikrobiologie) sowie die Einbindung von Unterauftragnehmern, beispielsweise für mineralogische und geochemische Untersuchungen.

Ursprünglich war ein industrieller Anwendungspartner mit einem Brauchwassersystem als Demonstrationsstandort vorgesehen. An diesem Gewässer sollten die Verfahrenstechnik und die automatisierte Steuerung im großmaßstäblichen Betrieb erprobt werden. Nach intensiver Vorbereitungsphase mit Voruntersuchungen im unbehandelten Zustand und weit fortgeschrittener Planung einer stationären Anlage wurde die Zusammenarbeit jedoch in beiderseitigem Einvernehmen beendet, bevor es zur praktischen Umsetzung vor Ort kam. Daraufhin war es erforderlich, alternative Demonstrationsstandorte zu gewinnen.

Der **Schäfersee** in Berlin-Reinickendorf wurde von Beginn an vom Land Berlin, vertreten durch die Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, zur Verfügung gestellt. Hier lag bereits eine umfangreiche Datengrundlage aus früheren Untersuchungen und Anwendungen vor. Für den **Fennsee** in Berlin-Charlottenburg/Wilmersdorf konnte das zuständige Bezirksamt als Gewässereigentümer gewonnen werden, und für das **Jröne Meerke** in Neuss erfolgte die Zusammenarbeit mit dem dortigen Amt für Umwelt und Stadtgrün. Diese Stellen fungierten nicht als aktive Partner im Konsortium, sondern stellten die Gewässer zur Verfügung und begleiteten die Umsetzung vor Ort.

Während der Projektlaufzeit fanden regelmäßige Arbeitstreffen statt, die je nach Situation vor Ort an den Untersuchungsgewässern, in den Institutsräumen oder pandemiebedingt (COVID-19-Pandemie) auch online durchgeführt wurden.

Sie dienten der Abstimmung des Arbeitsfortschritts, der Diskussion methodischer Fragestellungen sowie der Anpassung an die geänderten Rahmenbedingungen nach Wegfall des ursprünglich vorgesehenen Industriegewässers. Ein wesentlicher Bestandteil der Koordination war zudem die Abstimmung mit den

zuständigen Wasserbehörden, insbesondere hinsichtlich der Genehmigungen für die Applikation von Calciumnitrat.

Darüber hinaus übernahm das Büro Wassmann die Erstellung der Zwischenberichte, Änderungsanträge (z. B. zur Erweiterung auf Fennsee und Jörne Meerke) sowie der Enddokumentation gegenüber dem BMBF. Auch die externe Kommunikation gehörte zu diesem Arbeitspaket: Büro Wassmann fungierte als Ansprechpartner für Fachöffentlichkeit und Medien, bereitete Informationsmaterialien für ein breiteres Publikum auf und organisierte Vor-Ort-Termine zur Demonstration der Anlagen.

Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass das Projekt trotz der inhaltlichen Anpassungen erfolgreich durchgeführt und die wissenschaftlichen wie praktischen Zielstellungen vollständig erreicht wurden.

4.2 AP 01 – Mikrobiologische Analysen (Technische Universität Berlin)

Die mikrobiologischen Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts durch die Abteilung Umweltmikrobiologie der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Ziel war es, die durch das Schäfersee-Verfahren® ausgelösten mikrobiellen Prozesse in Sediment und Wasserkörper besser zu verstehen und die Auswirkungen der Sauerstoff- und Nitratapplikation auf die mikrobielle Gemeinschaftsstruktur zu erfassen.

Hierzu wurden Sediment- und Porenwasserproben an den Standorten Schäfersee, Fennsee und in geringerem Umfang am Jörne Meerke entnommen. Der Schwerpunkt der Analysen lag auf dem Schäfersee und dem Fennsee, da dort vollständige Behandlungszyklen vorlagen.

Die Untersuchungen umfassten DNA-basierte Analysen (16S-rRNA-Sequenzierung, Metagenomanalysen, PCR und qPCR) sowie chemisch-physikalische Messungen der Poren-, Tiefen- und Oberflächenwasserparameter (Sauerstoff, Nitrat, Ammonium, Phosphat, Sulfat, gelöstes Eisen, weitere (semi)Metalle sowie organische Schadstoffe und Methan und Lachgas im Tiefenwasser). Diese Daten dienen der Beschreibung der jeweiligen Redoxmilieus und ermöglichen die Ableitung der zugrunde liegenden mikrobiellen Stoffwechselprozesse.

Im Mittelpunkt standen mikrobielle Prozesse der Denitrifikation, Sulfatreduktion und Methanogenese. Die gewonnenen Daten erlauben eine Einschätzung, in welchem Umfang die Zugabe von Nitrat und Sauerstoff diese Funktionsgruppen beeinflusst und damit zur Stabilisierung der Sediment-Wasser-Grenzschicht beiträgt.

Die Daten deuten darauf hin, dass im Schäfersee eine bereits an das Schäfersee-Verfahren angepasste mikrobielle Population vorlag, was im Einklang mit der über mehrere Jahre andauernden Sanierung ist. Im Fennsee konnten dagegen eindeutige Änderungen auf Ebene der 16S rRNA-Gen-Sequenzen sowie auf Ebene funktioneller Gene in Reaktion auf das Verfahren im Vergleich zu Populationen im Sediment

ohne Stützung durch das Schäfersee-Verfahren nachgewiesen werden. Dies zeigt, dass das Schäfersee-Verfahren biologische Prozesse stimuliert, die zu einer Oxidation von sulfidischen Verbindungen, Eisen und Ammonium sowie organischen Verbindungen beiträgt, während Denitrifikationsprozesse angestoßen werden.

Der Nachweis spezifischer Organismengruppen fokussierte sich auf potentiell toxinogene Cyanobakterien. Diese konnten zwar in den Seesedimenten mittels 16S rRNA-Genanalyse nachgewiesen werden, jedoch konnten keine Hinweise auf Risiken durch das Schäfersee-Verfahren identifiziert werden. Dies wurde durch molekulare, analytische und mikroskopische Analysen gestützt.

4.3 AP 02 – Schäfersee (Berlin) – geschichtetes Gewässer, Prototyp Pontons

Der Schäfersee in Berlin-Reinickendorf war das zentrale Referenzgewässer und Ausgangspunkt für die Entwicklung und Erprobung des Schäfersee-Verfahrens®. Das rund 4,5 ha große, geschichtete Gewässer mit einer maximalen Tiefe von etwa 7 m weist eine langjährige Belastung durch Regenwassereinleitungen aus einem stark versiegelten Einzugsgebiet von über 240 ha auf. Infolge der hohen Einträge organischer Substanzen kam es mindestens seit den 1980er-Jahren, wahrscheinlich jedoch schon deutlich früher, regelmäßig zu anoxischen Verhältnissen im Tiefenwasser und zur Ausbildung mächtiger Faulschlamm-schichten mit intensiver Schwefelwasserstoff- und Methanbildung.

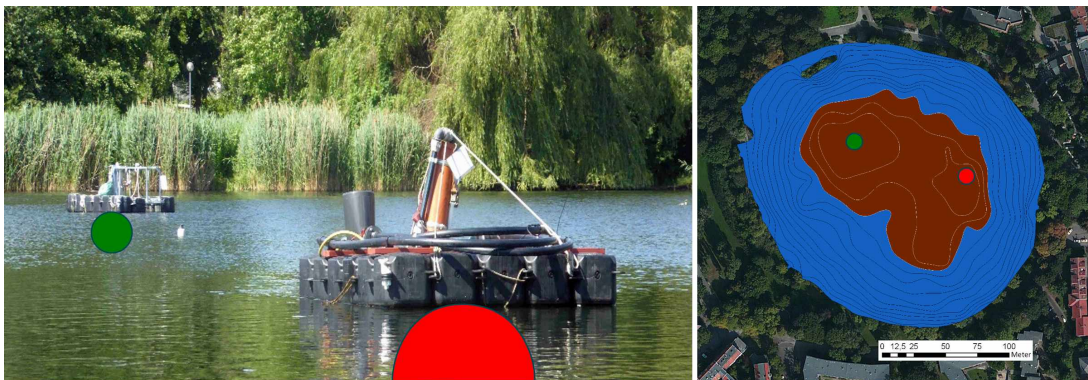


Abb. 1: Schäfersee: Prototyp der schwimmenden Anlage mit Pontons (links) und Tiefenkarte mit Positionen der eingesetzten Pontons (rechts). Grün markiert den Pumpenponton, rot den Einleitungsponton. Der braun gefärbte Bereich (Tiefe > 5 m) entspricht dem vom Verfahren behandelten Gewässerabschnitt.

Seit 2017 wird der See im Auftrag der Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin regelmäßig mit dem Schäfersee-Verfahren® behandelt. Dabei wurde eine provisorische Pontonlösung eingesetzt, die eine gezielte Dosierung von Calciumnitrat in Kombination mit sauerstoffgesättigtem Wasser ermöglichte. Die Anlage besteht aus einem Pumpen- und einem Einleitungsponton. Beide sind über flexible Leitungen miteinander verbunden. Das Wasser wird aus der Tiefenzone angesaugt, mit Sauerstoff angereichert, mit Calciumnitrat versetzt und anschließend gezielt in die anoxischen Schichten unterhalb von etwa 5 m Tiefe zurückgeführt. Die Tiefenkarte (Abb.1) zeigt die Lage der beiden Pontons;

der blaue Bereich markiert den bis etwa 5 m tiefen Wasserkörper, die darunterliegende braune Zone kennzeichnet den behandelten, vormals dauerhaft anoxischen Bereich.

Die Anlage wird mehrfach jährlich für Dosierphasen von etwa zwei Wochen installiert. Während dieser Zeit erfolgt eine kontinuierliche, kontrollierte Einbringung von Calciumnitrat, wobei die Dosiermenge an die gemessenen Sauerstoff- und Redoxverhältnisse angepasst wird. Die Behandlung konzentriert sich ausschließlich auf das Hypolimnion, um gezielt die dort ablaufenden reduktiven Prozesse zu beeinflussen, ohne die natürliche Schichtung des Sees zu stören.

Begleitend zu den Behandlungsphasen wurden umfangreiche Messungen durchgeführt. Dazu zählten kontinuierliche Aufzeichnungen von Sauerstoff, Redoxpotenzial, Temperatur, Nitrat und Ammonium in verschiedenen Tiefen, ergänzt durch punktuelle Wasser- und Sedimentproben. Diese Datengrundlage ermöglichte es, die Entwicklung des Redoxmilieus und die Wirksamkeit der Nitratapplikation detailliert zu erfassen.

Mit Beginn des BMBF-Projektes wurde der Schäfersee in ein systematisches Forschungsdesign einbezogen, um die bereits vorhandenen Praxiserfahrungen wissenschaftlich zu vertiefen. Schwerpunkte lagen dabei auf der Quantifizierung der Effekte auf Schwefelwasserstoffbildung, Methanfreisetzung, Phosphorrücklösung und Redoxstabilisierung. Die Ergebnisse aus diesen Messungen bildeten eine wichtige Grundlage für die Konzeption der später entwickelten stationären Anlagen an anderen Standorten.

Ursprünglich war vorgesehen, auch am Schäfersee eine dauerhafte, stationäre Anlage zu errichten. Dieses Vorhaben konnte im Projektzeitraum aus organisatorischen und verwaltungstechnischen Gründen noch nicht umgesetzt werden, befindet sich aber weiterhin in Planung. Ziel ist es, die Dosierung künftig automatisiert und ferngesteuert aus einer Uferstation heraus zu betreiben. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Pontonbetrieb flossen direkt in diese technische Weiterentwicklung ein und bestätigten die grundsätzliche Wirksamkeit des Verfahrens zur dauerhaften Stabilisierung tief geschichteter, urban belasteter Gewässer.

4.4 AP 03 – Entwicklung kompakter stationärer Anlagen

Ein zentrales Ziel des Projekts war die Entwicklung und Erprobung kompakter, stationärer Anlagen zur automatisierten Durchführung des Schäfersee-Verfahrens®. Diese sollten den bislang am Schäfersee verwendeten provisorischen Pontonprototyp ersetzen und eine kontinuierliche, wartungsarme sowie ferngesteuerte Dosierung ermöglichen. Die konzeptionelle Entwicklung wurde vom Büro Wassmann durchgeführt und an verschiedenen Standorten praktisch umgesetzt.

Ursprüngliche Planung am Industriegewässer (Niedersachsen) Im ursprünglichen Antrag war vorgesehen, die erste stationäre Demonstrationsanlage an einem industriell genutzten Gewässer in Niedersachsen zu errichten. Das Gewässersystem besteht aus mehreren künstlich angelegten, miteinander verbundenen Becken, die Teil eines werkseigenen Brauchwassersystems sind. Das Wasser durchläuft

dabei mehrere Aufbereitungsstufen, bevor es erneut in technische Prozesse eingespeist wird. Die Becken weisen infolge langjähriger Nutzung und stofflicher Belastung eine deutliche Akkumulation von organischem und anorganischem Material im Sediment auf. Insbesondere das ursprünglich vorgesehene Hauptbecken war durch anoxische Bedingungen in der Tiefe und ausgeprägte Reduktionszonen gekennzeichnet. Hier sollte im Rahmen des Projekts die Wirkung des Schäfersee-Verfahrens® auf ein industriell geprägtes, geschichtetes Gewässersystem demonstriert werden.

Im Jahr 2021 wurden vom Büro Wassmann umfangreiche Voruntersuchungen im unbehandelten Zustand durchgeführt. Diese umfassten Tiefenprofile zu Sauerstoff, Redoxpotenzial, Leitfähigkeit und Temperatur sowie Wasseranalysen. Sedimentproben wurden im Zuge der Arbeiten in Kooperation mit der Technischen Universität Berlin gewonnen, die die mikrobiologischen und geochemischen Untersuchungen übernahm. Die Ergebnisse zeigten deutliche Hinweise auf eine hohe interne Belastung der Sedimente mit organischen und metallischen Verbindungen, wie sie typischerweise in industriellen Kreislaufsystemen vorkommen.

Darauf basierend wurde ein detailliertes Konzept für die Integration einer stationären Anlage in Becken P4 erarbeitet, die sowohl der gezielten Nitratzugabe als auch der Sauerstoffanreicherung dienen sollte. Die Standortwahl, technische Planung und hydraulische Einbindung erfolgten in enger Abstimmung mit der Umweltabteilung des Industriepartners. Bevor es jedoch zur praktischen Umsetzung kam, wurde die Kooperation aus organisatorischen und vertraglichen Gründen in beiderseitigem Einvernehmen beendet. Die während dieser Planungsphase gewonnenen Erfahrungen und technischen Erkenntnisse flossen unmittelbar in die nachfolgenden Entwicklungen an den Standorten Fennsee und Jörne Meerke ein.

Weiterentwicklung des Anlagenkonzepts Nach dem Wegfall des Industriegewässers als Demonstrationsstandort wurde die Entwicklung der stationären Anlagen im Projektverlauf fortgeführt und an zwei unterschiedlichen urbanen Gewässertypen umgesetzt: dem flachen Regenrückhaltebecken **Fennsee (Berlin)** und dem geschichteten Baggersee **Jörne Meerke (Neuss)**. Beide Standorte boten ideale Bedingungen, um die technische Flexibilität und Übertragbarkeit des Verfahrens unter unterschiedlichen morphologischen und chemischen Voraussetzungen zu testen.

Das zentrale Ziel bestand darin, eine kompakte, modulare Technik zu entwickeln, die

- die Dosierung von Calciumnitrat automatisiert und ferngesteuert ermöglicht,
- die Sauerstoffversorgung gezielt und energieeffizient sicherstellt,
- die Einleitung ortsspezifisch an Tiefen- und Schichtungsverhältnisse anpasst,
- den Wartungsaufwand minimiert und eine kontinuierliche Datenerfassung erlaubt.

Fennsee (Berlin) Am Fennsee wurde erstmals eine vollständig stationäre Anlage errichtet. Sie besteht aus einem am Ufer installierten Technikcontainer mit Vorratstank, Steuerungseinheit und Dosiertechnik. Über unterirdische Leitungen gelangt die Calciumnitratlösung zu mehreren im Gewässer positionierten

Turbojets, die das sauerstoffangereicherte Wasser gleichmäßig im gesamten Wasserkörper verteilen.

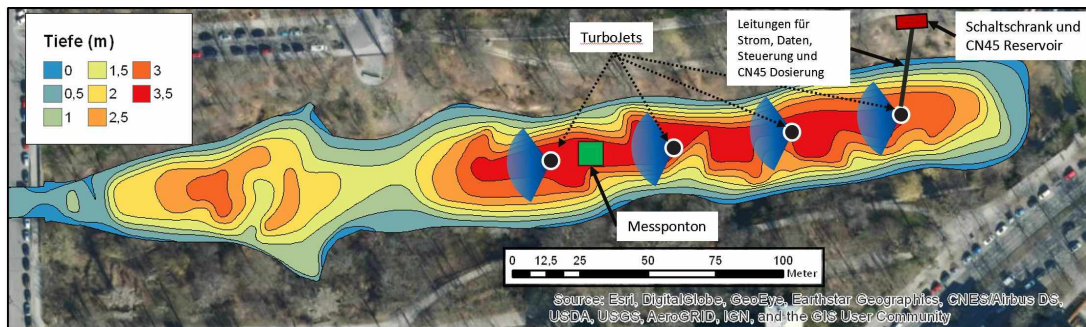


Abb. 2: Fennsee: Übersichtskarte mit Tiefenangaben, Positionen der Turbojets, des Containers, der Zuleitung sowie des Messpontons.

Die Dosierung erfolgt automatisiert und kann über eine Online-Schnittstelle bedarfsgerecht gesteuert werden. Ein Messponton mit Sonden in verschiedenen Tiefen übermittelt kontinuierlich Messwerte zu Sauerstoff, Redoxpotenzial, Nitrat und Ammonium, wodurch die Dosierintervalle präzise angepasst werden können. Das System reagiert damit flexibel auf kurzfristige Belastungsspitzen, insbesondere nach Starkregenereignissen, die in urbanen Einzugsgebieten häufig auftreten.



Abb. 3: Fennsee: Ansicht des Gewässers (links). Steuerungs- und Vorratscontainer mit Dosiertechnik (rechts).

Jröne Meerke (Neuss) Das Jröne Meerke stellt den zweiten stationären Anwendungsfall dar, bei dem die technische Umsetzung gezielt an ein geschichtetes System angepasst wurde. Die Besonderheit liegt in der Nutzung des Trinkwassernetzes als Sauerstoffquelle in Kombination mit einer separaten Dosierleitung für Calciumnitrat. Beide Komponenten werden über unabhängige Leitungen zur im See installierten Rohrpumpe geführt. Der durch die Pumpe erzeugte Volumenstrom bewirkt eine intensive Durchmischung beider Ströme und verteilt das so entstehende, sauerstoff- und nitratangereicherte Wasser gezielt in der Tiefenzone unterhalb von etwa 5–6 m. Auf diese Weise wird die reduktive Schicht im Hypolimnion mit Elektronenakzeptoren versorgt, ohne die natürliche Schichtung des Sees zu stören oder umzuwälzen. Die Anlage wird über einen am Ufer befindlichen Technikraum mit Steuerungs- und Vorratseinheit betrieben und war dabei vollständig automatisiert sowie ferngesteuert.

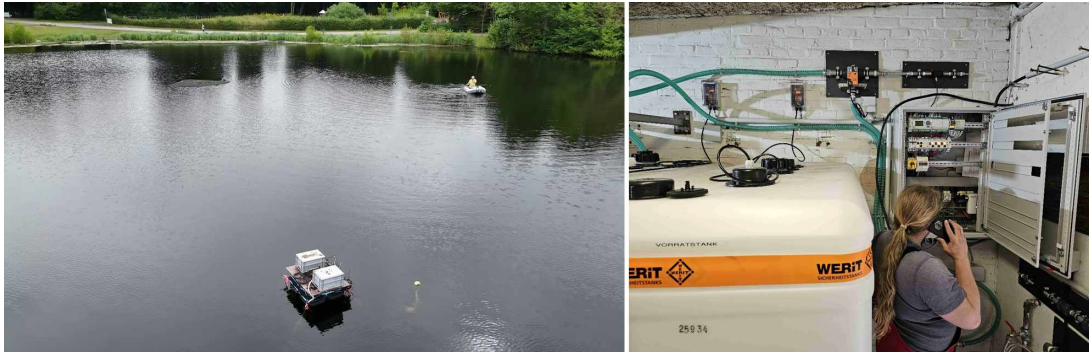


Abb. 4: Jröne Meerke: Ansicht des Gewässers mit Messpontoon (links). Technikraum mit Steuerungs- und Vorratseinheit (rechts).

Auch hier wurde ein Messpontoon mit mehrstufigen Sensoren installiert, um die Wirksamkeit der Behandlung in Echtzeit zu überwachen. Die Messergebnisse zeigten, dass die Redoxstabilisierung und Phosphorrückhaltung auch in geschichteten Systemen zuverlässig erreicht werden können, wenn die Dosierung exakt kontrolliert erfolgt.

Fazit Mit den am Fennsee und am Jröne Meerke entwickelten Anlagen konnte die im Projekt angestrebte technische Weiterentwicklung erfolgreich umgesetzt werden. Die Systeme erlauben eine langfristige, ferngesteuerte und energieeffiziente Anwendung des Schäfersee-Verfahrens®. Am Schäfersee selbst befindet sich der Aufbau einer vergleichbaren stationären Anlage weiterhin in Planung; die dort gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für die nächste Umsetzungsstufe.

4.5 AP 4a – Industriegewässer (Vorbereitung, nicht realisiert)

Im ursprünglichen Projektkonzept war vorgesehen, das Schäfersee-Verfahren® an einem industriell geprägten Kreislaufgewässer in Niedersachsen zu demonstrieren. Büro Wassmann führte hierzu im Jahr 2021 umfangreiche Voruntersuchungen und Planungen durch, auf deren Grundlage ein detailliertes Konzept für den Aufbau einer stationären Anlage innerhalb des Brauchwassersystems des Standorts entstand. Aufgrund organisatorischer und behördlicher Rahmenbedingungen konnte die technische Umsetzung jedoch nicht realisiert werden. Die im Zuge der Planung und Konzeptentwicklung gewonnenen Erkenntnisse flossen unmittelbar in die anschließenden Realisierungen am Fennsee und am Jröne Meerke ein.

4.6 AP 4b – Fennsee (stationäre Anwendung, Flachgewässer)

Der Fennsee in Berlin-Charlottenburg/Wilmersdorf stellt ein typisches urbanes Flachgewässer dar, das in besonderem Maße durch Regenwassereinträge aus einem großen Einzugsgebiet belastet ist. Das Gewässer besteht aus zwei miteinander verbundenen Teilbecken – einem West- und einem Ostbecken –, die ähnliche morphologische und chemische Charakteristika aufweisen. Im Rahmen des Projekts wurde

ausschließlich das etwa 300 m lange und 50 m breite Ostbecken behandelt, während das Westbecken als unbeeinflusste Vergleichsfläche diente.

Vor Beginn der Maßnahmen (2023) zeigten sich im Ostbecken ausgeprägte Belastungserscheinungen: Hohe organische Stofffrachten aus dem Regenwassereintrag führten regelmäßig zu Sauerstoffzehrung, niedrigen Redoxpotenzialen, erhöhter Ammoniumbildung und deutlicher Geruchsbelästigung durch Schwefelwasserstoff. Die Situation im unbehandelten Westbecken blieb während der Projektlaufzeit ein anschauliches Referenzbeispiel für die typischen Prozesse solcher urbanen Rückhaltebecken.

Nach Abschluss der Voruntersuchungen wurde im Winter 2023/2024 eine fest installierte, stationäre Anlage errichtet. Sie umfasst einen Ufercontainer mit Vorratstank, Steuerungseinheit und unterirdischen Leitungen, die zu mehreren im Gewässer verankerten Turbojets führen. Diese erzeugen eine gleichmäßige hydraulische Durchmischung und ermöglichen die gezielte Verteilung von Calciumnitrat und Sauerstoff im gesamten Wasserkörper. Im April 2024 wurde die Anlage in Betrieb genommen und über das gesamte Jahr betrieben.

Das Dosierprinzip am Fennsee basiert auf ereignisgesteuerten Stoßdosierungen, die bedarfsgerecht in kurzen Intervallen durchgeführt werden. Die Sensorik erfasst in Echtzeit Parameter wie Sauerstoff, Nitrat, Ammonium und Redoxpotenzial. Die Reaktionen auf Dosierungen erfolgen meist innerhalb von Minuten bis wenigen Stunden: Das Nitrat verteilt sich innerhalb von ein bis zwei Stunden homogen im Wasserkörper und erreicht die vorgesehenen Zielkonzentrationen. Durch gezielte Nachdosierungen kann der Nitratanteil im Sediment stabil gehalten werden, um dort die reduktiven Prozesse zuverlässig zu unterbinden.

Im Projektjahr 2024 wurden über 40 einzelne Dosierzyklen durchgeführt, die halbautomatisch über das Steuerungssystem ausgelöst wurden. Die Dosiermengen lagen je nach Bedarf zwischen 50 und 200 Litern pro Vorgang. Dieses adaptive Vorgehen ermöglichte eine kontinuierliche Kontrolle der Systemreaktionen und zeigt das Potenzial, die Dosierung zukünftig vollständig automatisiert über Steueralgorithmen zu regeln.

Die Ergebnisse belegen, dass sich das Verfahren auch in flachen, stark belasteten Stadtgewässern erfolgreich anwenden lässt. Während das behandelte Ostbecken dauerhaft geruchsfrei blieb, stabile Redoxverhältnisse und deutlich verringerte Ammonium- und Phosphorkonzentrationen zeigte, traten im unbehandelten Westbecken weiterhin die typischen reduktiven Prozesse auf. Damit konnte das Konzept erstmals auch für polymiktische Flachgewässer erfolgreich demonstriert werden.

4.7 AP 4c – Jörne Meerke (stationäre Anwendung, Hypolimnion)

Das Jörne Meerke in Neuss ist ein ehemaliger Baggersee, der überwiegend flach ausgebildet ist, jedoch im zentralen Bereich eine Senke mit Tiefen bis zu acht Metern aufweist. Diese Zone war vor Projektbeginn regelmäßig durch starke Sauerstoffzehrung, hohe Reduktionsintensität und die Bildung von Schwefelwasserstoff geprägt. Das Volumen des betroffenen Tiefenwassers beträgt nur wenige tausend Kubikmeter,

besitzt jedoch ein außerordentlich hohes Rücklösungspotenzial. Während der Herbstzirkulation führte dies regelmäßig dazu, dass trotz des geringen Volumens erhebliche Phosphor- und Nährstofffrachten in den gesamten Wasserkörper gelangten. Das Iröne Meerke weist keinen natürlichen Zu- oder Ablauf auf; sämtliche Stoffeinträge erfolgen über atmosphärische Deposition und über die Wasservögel, insbesondere eine große Gänsepopulation, die sich auf der im See gelegenen Insel dauerhaft etabliert hat. Der kontinuierliche Nährstoffeintrag über Gänsekot führte zusammen mit den internen Rücklösungsprozessen zu einer ausgeprägten Eutrophierung und wiederkehrenden Massenentwicklungen von Algen und Cyanobakterien. Damit stellt das Gewässer ein typisches Beispiel für urbane Überdüngung *ohne* nährstoffreichen Abwasserzufluss dar.

Ziel des Arbeitspakets war es, das Schäfersee-Verfahren® an einem geschichteten Gewässer mit stark belastetem Hypolimnion zu demonstrieren und ein wirksames, fein steuerbares Behandlungskonzept zu entwickeln. Dazu wurde im Frühjahr 2024 eine stationäre Anlage errichtet, die an das Trinkwassernetz angebunden ist. Das Trinkwasser dient als Sauerstoffquelle und wird über eine separate Leitung zu einer Rohrpumpe geführt, während das Calciumnitrat über eine zweite Leitung dosiert wird. In der Rohrpumpe erfolgt die intensive Vermischung beider Komponenten, bevor die nitrat- und sauerstoffangereicherte Lösung in etwa 5–6 m Tiefe direkt in das Hypolimnion eingetragen wird. Die Steuerung und Überwachung der Anlage erfolgen über eine am Ufer installierte Technikstation mit automatischer Datenerfassung und Fernzugriff.

Bereits im Jahr 2023 wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt, darunter Tiefenprofile von Sauerstoff, Redoxpotenzial, Nitrat, Ammonium und Temperatur sowie Wasserproben zur chemischen Analyse. Das Messsystem wurde um einen zentralen Ponton ergänzt, der in mehreren Tiefen kontinuierlich misst: Sauerstoffsonden in 1, 3, 6 und 7.5 m Tiefe, Nitratsonden in 1, 6 und 7.5 m sowie Redoxsensoren im Tiefenbereich bei 7.5 m. Alle installierten Sonden erfassen gleichzeitig die Wassertemperatur, sodass sich das thermische Schichtungsverhalten des Sees präzise nachvollziehen lässt. Damit war es möglich, den Verlauf und die Intensität der Sommerstagnation ebenso wie den Zeitpunkt und die Dauer der Herbstzirkulation kontinuierlich zu dokumentieren.

Die eigentliche Dosierung begann Mitte April 2024. Zu Projektbeginn wurde aufgrund der hohen Zehrungsraten eine initiale Stoßdosierung mit erhöhter Nitratkonzentration vorgenommen, um die starke Reduktionskraft des Sediments zu neutralisieren. Bereits nach wenigen Tagen konnte ein deutlicher Anstieg des Redoxpotenzials und die vollständige Unterbindung der Schwefelwasserstoffbildung beobachtet werden. Im weiteren Verlauf wurde ein fein abgestimmtes Steuerungskonzept entwickelt, bei dem täglich oder zweitäglich minimale Dosiermengen von etwa 10 Litern eingesetzt wurden. Diese mikrozyklische Dosierstrategie ermöglichte eine sehr gleichmäßige, stabile Versorgung des Hypolimnions mit Nitrat und führte zu dauerhaft positiven Redoxbedingungen, ohne die Schichtung des Gewässers zu beeinflussen.

Zur Ergänzung der Wassermessungen wurden gezielte Sedimentuntersuchungen durchgeführt. Hierzu entnahm Büro Wassmann im Sommer 2024 Schichtproben aus Sedimentkernen, die zentimeterweise

separiert, eingefroren und anschließend an die Technische Universität Berlin übergeben wurden. Parallel dazu wurden durch das Büro **lanaplan** (NRW) ergänzende Untersuchungen zur Phosphorrücklösung und zu den Bindungsformen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass das Sediment vor Beginn der Maßnahme als deutliche Phosphorquelle fungierte, während es nach der Nitratbehandlung eine signifikante Umkehr zum Phosphorsenkenverhalten aufwies. Diese Veränderungen belegen die erfolgreiche Stabilisierung der Redoxbedingungen und die Etablierung dauerhafter mineralischer Bindungsformen.

Die Maßnahme führte insgesamt zu einer nachhaltigen Stabilisierung des Tiefenwassers und zu einer deutlichen ökologischen Verbesserung. Im ehemals lebensfeindlichen Tiefenbereich wurden wieder Zooplankton und sogar Libellenlarven in Tiefen von sechs Metern nachgewiesen – ein klarer Hinweis auf die Wiederbesiedlung der zuvor anoxischen Zone. Damit konnte gezeigt werden, dass das Schäfersee-Verfahren® auch unter veränderten technischen Randbedingungen erfolgreich angewendet werden kann. Die Anpassung der Applikationstechnik – die Nutzung von Trinkwasser als Sauerstoffträger in Kombination mit gezielter Einleitung über eine Rohrpumpe – erwies sich als ebenso effektiv wie die klassische Belüftungsvariante mit Pontons. Auf diese Weise wurde nachgewiesen, dass das Verfahren flexibel an unterschiedliche Gewässertypen und technische Rahmenbedingungen angepasst werden kann, ohne an Wirksamkeit zu verlieren. Die Behandlung des Jörne Meerke belegt somit die Übertragbarkeit des Konzepts auf kleinere, geschichtete Seen mit lokal begrenzten, stark reduktiven Tiefenzonen.

4.8 AP 05 – Öffentlichkeitsarbeit und Transfer

Ein wesentliches Ziel des Projekts war neben der technischen und wissenschaftlichen Entwicklung auch die gezielte Kommunikation der Ergebnisse und die Förderung des Wissenstransfers in Praxis und Öffentlichkeit. Büro Wassmann übernahm die inhaltliche und organisatorische Verantwortung für diese Aktivitäten.

Bereits zu Beginn des Projekts wurde das Vorhaben durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) medial begleitet. Die Kommunikationsabteilung des BMBF produzierte in Abstimmung mit dem Projektteam ein Kurzvideo, das auf verschiedenen Social-Media-Kanälen (Instagram, TikTok, YouTube) veröffentlicht wurde und die Grundidee des Schäfersee-Verfahrens® sowie die Ziele des Verbundprojekts anschaulich darstellt.

Parallel dazu wurde in Kooperation mit einer professionellen Medienagentur ein umfangreicher Dokumentarfilm über das Projekt erstellt. Dieser Film dokumentiert die Entwicklung und Umsetzung an den Standorten Schäfersee, Fennsee und Jörne Meerke, enthält Interviews mit Fachleuten und Projektbeteiligten und verdeutlicht die Bedeutung des Verfahrens für den nachhaltigen Gewässerschutz. Das Filmmaterial wurde sowohl für Fachveranstaltungen als auch für die allgemeine Öffentlichkeitsarbeit aufbereitet.

Ein weiterer Meilenstein der medialen Präsenz war ein Beitrag der *Deutschen Welle*, die einen etwa zehnminütigen Film über das Projekt produzierte und international ausstrahlte. Dieser Beitrag erreichte

ein weltweites Publikum und trug wesentlich dazu bei, das Verfahren auch im internationalen Kontext bekannt zu machen.

Darüber hinaus fanden mehrere Fachvorträge und wissenschaftliche Präsentationen auf nationalen und internationalen Tagungen statt, bei denen Ergebnisse des Projekts vorgestellt und diskutiert wurden:

- *2nd International Congress on Microbial Ecotoxicology (EcotoxicoMic 2021, Montpellier, Frankreich)* – Posterpräsentation: *Impact of a nitrate-dependent remediation procedure on sediment pollutants in a contaminated urban lake.*
- *36th Congress of the International Society of Limnology (SIL 100, Berlin, Deutschland / online, 07.–10. 08. 2022)* – Posterpräsentation: *Influence of the addition of calcium nitrate and oxygen enriched water on the hypolimnion of a contaminated urban lake.*
- *2nd International Conference on Urban Water Interfaces (UWI 24, Berlin, Deutschland, 22.–24. 04. 2024)* – Posterpräsentation: *Benefits and risks of a calcium nitrate and oxygen-dependent treatment method for contaminated urban lakes.*
- *39. DGL-Jahrestagung 2024 (Dresden, Deutschland, 16.–22. 09. 2024)* – Posterpräsentation: *A nitrate and oxygen-based treatment strategy to improve water quality in contaminated urban lakes.*
- *ASLO 2025 Aquatic Sciences Meeting (Charlotte, NC, USA, 26.–31. 03. 2025)* – Vortrag: *Treatment with nitrate and oxygen improves water quality of contaminated urban lakes.*

Darüber hinaus wurde das Schäfersee-Verfahren® im Rahmen eines Online-Seminars des *Bundes der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK)* einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Weitere Präsentationen und Gespräche mit Fachbehörden, Ingenieurbüros und kommunalen Vertretern trugen zur Verbreitung und Diskussion des Verfahrens bei.

Der Projekterfolg führte zu einer Reihe praktischer Folgeanwendungen und Kooperationsanfragen. Zu nennen sind die Gewässer *Kahnteich* und *Judenteiche* in Goslar (UNESCO-Weltkulturerbe Rammelsberg), der *Waldsee Hermsdorf* in Berlin sowie ein Gewässer in Panketal, an denen das Verfahren erfolgreich zur Geruchs- und Rücklösungsstabilisierung eingesetzt wird. Auch kurzfristige Anwendungen zur akuten Gewässerstabilisierung wurden in Berlin erprobt.

Zur weiteren Dissemination wurde eine eigenständige Website speziell für das BMBF-Projekt eingerichtet. Diese Projektseite stellt die Ziele, den Verlauf und die Ergebnisse des Forschungsvorhabens dar und bietet anschauliche Einblicke in die Anwendung des Schäfersee-Verfahrens® an den verschiedenen Demonstrationsgewässern. Eine Verlinkung mit der Hauptseite des Büros Wassmann ist vorgesehen, um den Zugang für Fachöffentlichkeit und interessierte Kommunen weiter zu erleichtern.

Im internationalen Kontext wurden erste Kontakte für potenzielle Anwendungen im Ausland aufgebaut. Unter anderem erfolgte eine gemeinsame Projektbewerbung für eine kombinierte Anwendung am stark eutrophierten *Lough Neagh* in Nordirland, dem größten See des Vereinigten Königreichs. Darüber hinaus werden derzeit Konzepte entwickelt, das Verfahren für den Einsatz in Talsperren-Systemen anzupassen, in denen zunehmend Probleme mit Schwefelwasserstoff und Redox-Instabilitäten auftreten – insbesondere

in Trinkwasserreservoirs, bei denen klassische Belüftungssysteme an ihre Grenzen stoßen.

Damit leistete das Arbeitspaket 5 einen entscheidenden Beitrag, die Projektergebnisse über den engeren Forschungskontext hinaus zu verbreiten, Akzeptanz bei Behörden und Fachöffentlichkeit zu fördern und den Transfer in praktische Anwendungsfelder national wie international vorzubereiten.

5 Zusatzuntersuchungen

Im Verlauf des Projekts ergaben sich auf Grundlage der laufenden Beobachtungen und Messergebnisse neue Fragestellungen, die über die ursprünglich geplanten Arbeitspakete hinausgingen. Diese wurden in Form zusätzlicher Untersuchungen bearbeitet, die im letzten Projektjahr in das Forschungsprogramm integriert wurden.

Auslöser waren insbesondere die während der Anwendung des Schäfersee-Verfahrens[®] beobachteten Veränderungen der Nährstoffverhältnisse. Nachweislich verringerte sich in mehreren Gewässern der Phosphorgehalt des Wassers deutlich stärker als zu Projektbeginn erwartet. Damit verbunden war die Frage nach den Prozessen, die zur Bindung des Phosphors im Sediment führen, sowie nach möglichen geochemischen Veränderungen im Redoxsystem.

Parallel erschien in der Fachliteratur eine Studie, die auf mögliche Zusammenhänge zwischen der Zugabe von Nitrat und der Bildung bestimmter Cyanotoxine hinweist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass veränderte Stickstoff-Phosphor-Verhältnisse das Auftreten von Cyanobakterien sowie deren Mikrocystinproduktion beeinflussen könnten. Um diese Fragestellung im Kontext des Schäfersee-Verfahrens[®] eindeutig bewerten zu können, wurden ergänzende Untersuchungen zu Cyanobakterien und Cyanotoxinen in das Arbeitsprogramm aufgenommen.

Die Zusatzuntersuchungen umfassten daher vier Schwerpunkte:

- geochemische und mineralogische Analysen der Sedimente (TU Berlin),
- quantitative Untersuchungen zur Phosphorbindung und Sedimentstabilität (lanaplan GbR, Nettetal),
- Etablierung und Anwendung einer HPLC-Methode zur Identifikation und Quantifizierung von Mikrozystinen sowie mikrobiologische Analysen der Cyanobakterienpopulationen (TU Berlin, Umweltmikrobiologie),
- Grundwasseruntersuchungen am Schäfersee zur Erfassung möglicher Nitratmigration und zur Überprüfung eines eventuellen Einflusses des Verfahrens auf das umgebende Grundwasser (TU Berlin, Umweltmikrobiologie).

Die Grundwasserproben wurden an mehreren Pegeln im Uferbereich des Schäfersees entnommen und chemisch analysiert. In keinem der untersuchten Pegel konnten erhöhte Nitratgehalte oder Hinweise auf eine Beeinflussung durch die Anwendung des Schäfersee-Verfahrens[®] festgestellt werden. Die Ergebnisse stützen damit die Annahme, dass die Prozesssteuerung im Oberflächenwasser verbleibt und keine relevante vertikale Nährstoffverlagerung in das Grundwasser erfolgt.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst und dienen der wissenschaftlichen Vertiefung der mit dem Schäfersee-Verfahren[®] erzielten Wirkungen.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst und dienen der wissenschaftlichen Vertiefung der mit dem Schäfersee-Verfahren[®] erzielten Wirkungen.

5.1 Sedimentanalysen Jröne Meerke (lanaplan GbR, 2025)

Zur ergänzenden Bewertung der Wirkung des Schäfersee-Verfahrens® im Gewässer Jröne Meerke wurden im Auftrag des Büro Wassmann durch die Lanaplan GbR (Nettetal) detaillierte Sedimentuntersuchungen durchgeführt. Ziel war die experimentelle Bestimmung der Phosphor-Rücklösungsraten sowie die Analyse der Phosphor-Bindungsformen im Sediment. Die Arbeiten erfolgten im Zeitraum Februar bis Oktober 2024, das heißt während der Einführungs- und Betriebsphase der Calciumnitratdosierung.

Methodisches Vorgehen Die Probenahme erfolgte an einer fixen Probenahmestelle in 8,7 m Wassertiefe. Zu sechs Terminen wurden intakte Sedimentkerne entnommen und unter definierten Bedingungen im Labor untersucht. Die Phosphor-Rücklösungsraten wurden in 48-stündigen Inkubationsexperimenten unter anaeroben Bedingungen im Dunkeln bestimmt, um die maximale Freisetzung von Phosphor aus dem Sediment zu simulieren. Parallel wurde der Sauerstoffgehalt unmittelbar über dem Sediment vor Ort gemessen.

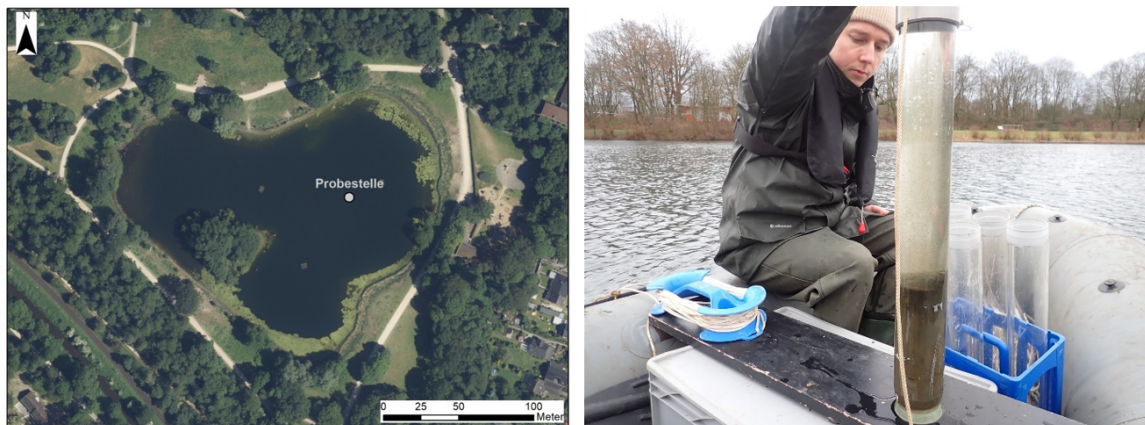


Abb. 5: Jröne Meerke: Links Luftbild mit markierter Probenahmestelle; rechts Entnahme eines Sedimentkerns während der Beprobung (lanaplan GbR, 2024).

Zur Bestimmung der Phosphor-Bindungsformen kam das etablierte sequentielle Extraktionsverfahren nach Psenner *et al.*, 1988 mit Modifikationen nach Hupfer *et al.*, 1995; Hupfer und Lewandowski, 2008 zur Anwendung. Dadurch konnten die Fraktionen „labiler P“, „reduktiv-löslicher P“, „metalloxid-gebundener P“, „organischer P“, „säurelöslicher P“ und „refraktärer P“ differenziert und die Summe der mobilisierbaren Phosphoranteile abgeschätzt werden. Die Analysen erfolgten durch ein akkreditiertes Labor (SEWA GmbH, Essen).

Ergebnisse Vor Beginn der Calciumnitratdosierung (Februar bis Mai 2024) lagen die experimentell bestimmten Phosphor-Rücklösungsraten zwischen $0,005 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ und $0,009 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Das Sediment fungierte in dieser Phase als Phosphorquelle, das heißt, es erfolgte ein geringer Nettoeintrag aus dem Sediment in die Wassersäule.

Nach Beginn der Calciumnitratapplikation Ende Mai 2024 traten durchgehend negative Rücklösungsraten auf (Juni–September 2024: $-0,007$ – $-0,019 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), was eine Umkehr der Flussrichtung dokumentiert:

Phosphor wurde aus der Wassersäule entnommen und im Sediment gebunden. Im Oktober 2024 lag die Rücklösungsrate bei $0,002 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, was als praktisch keine Freisetzung einzustufen ist (Nürnberg, 1984; Sondergaard *et al.*, 2003). Damit wurde der in der Fachliteratur empfohlene Managementzielwert von kleiner $0,01 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ dauerhaft eingehalten.

Der Gesamtphosphorgehalt des Sediments lag zwischen $1,4 \text{ gP/kg}$ und $2,1 \text{ gP/kg}$ und ist damit als hoch einzustufen. Die dominierende Fraktion bildete der organisch gebundene Phosphor, gefolgt von säurelöslichem P (carbonatisch gebunden) und refraktärem P. Der Anteil des potentiell mobilisierbaren Phosphors (Summe aus labil, reduktiv-löslich und organisch gebunden) lag zwischen 38 % – 64 % des Gesamtphosphors, mit einem Maximum im Juli 2024 (ca. $1,3 \text{ gP/kg}$). Nach Beginn der Nitratdosierung zeigte sich im Juni 2024 eine temporäre Zunahme der reduktiv-löslichen und metalloid-gebundenen Phosphorfractionen. Diese Veränderung war jedoch nur vorübergehend und im weiteren Untersuchungszeitraum nicht mehr erkennbar. Signifikante oder dauerhafte Trends in den einzelnen Fraktionen wurden nicht festgestellt.

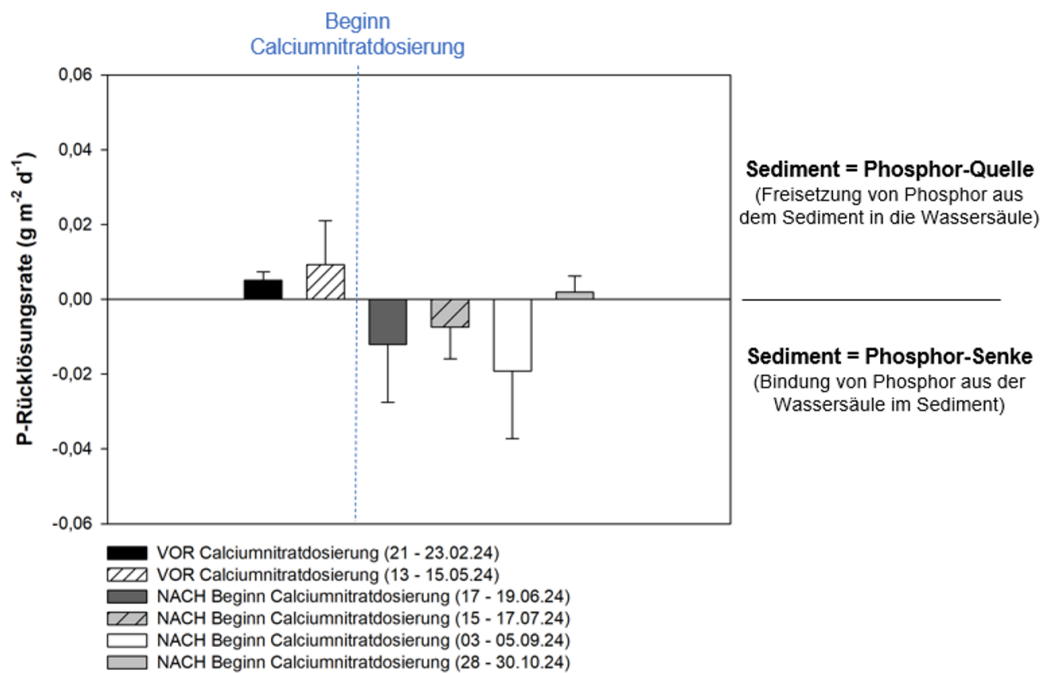


Abb. 6: Jörne Meerke: Veränderung der Phosphor-Rücklösungsraten vor und nach Beginn der Calciumnitratdosierung. Negative Werte zeigen die Bindung von Phosphor im Sediment (Phosphor-Senke).

Bewertung Die Untersuchungen belegen, dass die beim Jörne Meerke angewandte Behandlung nach dem Schäfersee-Verfahren® eine klare Umkehr der Phosphordynamik bewirkte. Aus einem Sediment, das vor Beginn der Maßnahme als Nettoquelle für Phosphor fungierte, wurde innerhalb weniger Wochen eine stabile Phosphorsenke. Die Rücklösungsraten sanken unter die Relevanzgrenze und blieben über mehrere Monate hinweg negativ, was eine anhaltende Bindung von Phosphor im Sediment zeigt. Die Ergebnisse verdeutlichen die Wirksamkeit des Verfahrens: Die kombinierte, zielgerichtete Zugabe von Calciumnitrat

und Sauerstoff stabilisierte das Redoxmilieu im Hypolimnion und verhinderte eine Remobilisierung von Phosphor aus dem Sediment. Damit wurde am Jröne Meerke nachweislich eine nachhaltige Verbesserung der Gewässerqualität erreicht.

5.2 Geochemisch–mineralogische Untersuchungen (TU Berlin, 2024)

Ziel und Ansatz Die geochemisch–mineralogischen Begleituntersuchungen wurden vom Fachgebiet Angewandte Geochemie der Technischen Universität Berlin im Rahmen des Projekts durchgeführt. Ziel war es, die Prozesse der Phosphor-Eliminierung während der Anwendung des Schäfersee-Verfahrens® besser zu verstehen und zu prüfen, ob durch die Zugabe von Calciumnitrat eine mineralische Bindung des Phosphats im Sediment erfolgt. Hierzu sollten sowohl die Verteilung und Konzentration des Phosphors im Sediment als auch die mineralischen Phasen, in denen Phosphor vorkommt, untersucht werden. Parallel wurde geprüft, in welcher Form diese Bindung in verschiedenen Gewässertypen auftritt – am Schäfersee (Berlin) und am Jröne Meerke (NRW).

Probenahme und Analytik Am Schäfersee erfolgte die Probenahme vor und nach der Calciumnitrat-Applikation mit einem Mondseecorer in unmittelbarer Nähe der Einleitungsstelle. Es konnten intakte Sedimentkerne mit einer Länge von etwa 25 cm und erhaltener Sedimentoberfläche gewonnen werden. Ein Teil der Proben wurde schichtweise (1 cm) für chemische und mineralogische Analysen aufgearbeitet, ein anderer Teil im gefrorenen Zustand halbiert, gefriergetrocknet und in Harz eingebettet, um orts aufgelöste Elementverteilungen mit der Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse (μ RFA) darzustellen. Die Analysen erfolgten im MAGMA-Labor der TU Berlin mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Röntgendiffraktometrie (XRD) und μ RFA. Am Jröne Meerke standen vergleichbare Sedimentkerne vor und nach der ersten Calciumnitrat-Applikation zur Verfügung; hier wurde aufgrund logistischer Bedingungen ausschließlich mit 1 cm-Schichten gearbeitet.

Ergebnisse Schäfersee Die geochemischen Analysen zeigen keine signifikanten Unterschiede in der Hauptelementzusammensetzung der Sedimente vor und nach der Calciumnitratzugabe. Der mittlere Phosphorgehalt liegt bei etwa 1 Gew.-% P_2O_5 . In den oberen 12 cm des Sediments ist eine deutliche Anreicherung von Phosphor zu erkennen. Die μ RFA-Analysen zeigen, dass Phosphor sowohl mit Calcium in feinen Calcitlaminaten als auch mit Eisen in kleinräumigen Aggregaten assoziiert ist.

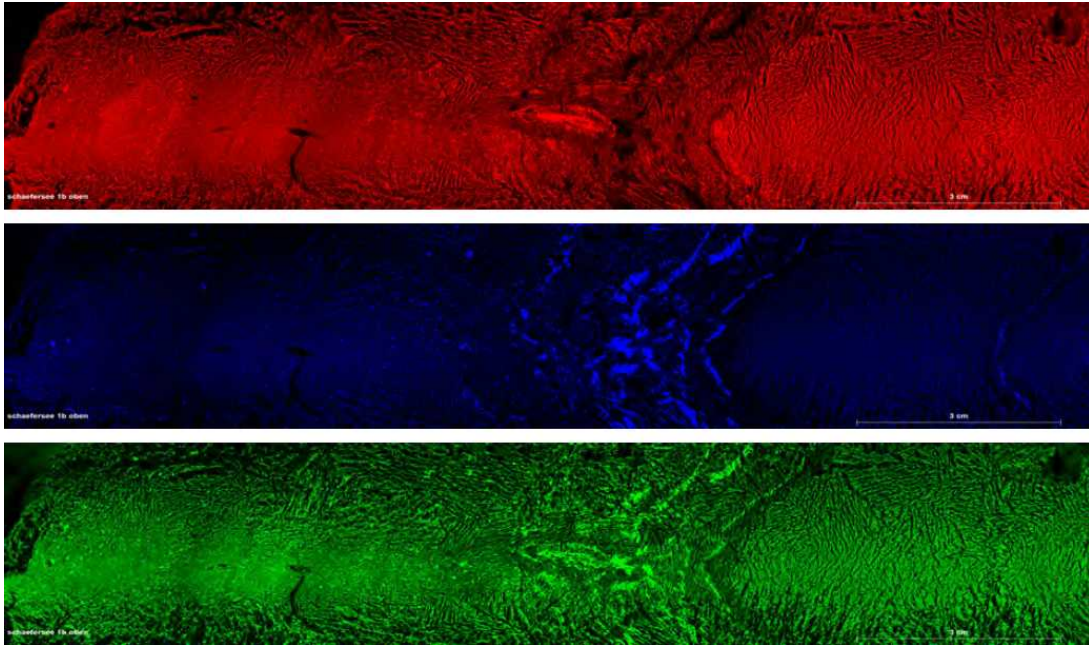


Abb. 7: Schäfersee: μ RFA-Elementverteilung mit Phosphor (grün) an Fe-reichen Aggregaten (rot); Ca-reiche Laminate treten in tieferen Schichten auf.

Diese Eisen-Phosphor-Aggregate treten überwiegend im oberen Teil der Sedimentkerne auf, während calciumreiche Lagen eher in tieferen Bereichen vorkommen. In den Röntgendiffraktogrammen wurden die Hauptmineralphasen Quarz, Glimmer, Tonminerale, Calcit und Pyrit identifiziert. Zusätzlich konnte das Eisen(II)-Phosphatmineral Vivianit eindeutig nachgewiesen werden, und zwar ausschließlich in den obersten etwa 15 cm der Sedimentsäule. Unterhalb dieser Zone dominiert die Bindung von Phosphor an Calcit. Weitere Phosphatminerale wie Apatit konnten nicht nachgewiesen werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Phosphat nahe der Sedimentoberfläche in Form von Vivianit gebunden ist, während in tieferen Bereichen eine Kopräzipitation mit Calcit erfolgt. Das Eindringen der Calciumnitratlösung in das oberflächennahe Sediment wird als entscheidend für diesen Prozess bewertet, da hierdurch Schwefelwasserstoff eliminiert und eine Bindung an Fe-Oxidhydroxide ermöglicht wird, die sich später zu Vivianit umwandeln können.

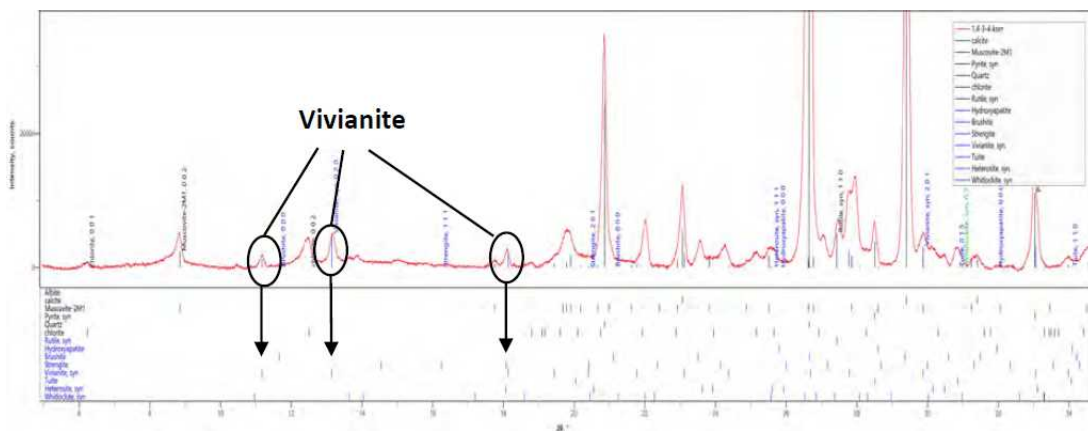


Abb. 8: Röntgendiffraktogramm Schäfersee: Nachweis der Mineralphasen Chlorit, Muskovit, Quarz, Calcit, Pyrit und Vivianit in den obersten 15 cm.

Ergebnisse Jörne Meerke Die Phosphorgehalte im Sediment des Jörne Meerke liegen insgesamt niedriger als im Schäfersee (ca. 0,5 Gew.-% P_2O_5). Nach der ersten Calciumnitratzugabe (Kern JM2) wurden höhere Phosphorgehalte als vor der Maßnahme (Kern JM1) festgestellt, sowohl absolut als auch nach Normierung auf den Glühverlust. Dies weist auf eine zusätzliche Bindung von Phosphor im Sediment hin. In den XRD-Analysen wurde hier kein Vivianit nachgewiesen, was auf den deutlich geringeren Eisengehalt der Sedimente zurückgeführt wird. Als mögliche Phosphatmineralphase wird Brushit ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$) genannt, der nur im behandelten Kern JM2 vorkam, allerdings aufgrund der schwachen Signale nicht eindeutig identifiziert werden konnte.

Bewertung Die Untersuchungen zeigen, dass das Schäfersee-Verfahren® zu einer Entfernung von Phosphat aus dem Wasserkörper führt und dass Phosphor – abhängig vom Seetyp – unterschiedlich im Sediment fixiert wird. Im Schäfersee wird Phosphor nahe der Sedimentoberfläche in Form von Vivianit gebunden, während im Jörne Meerke auf Grund der geringeren Eisenverfügbarkeit eine Bindung über calciumhaltige Phasen wahrscheinlicher ist. Der Nachweis von Vivianit im Schäfersee gilt als Hinweis auf eine mineralische Phosphatbindung unter sulfidfreien Bedingungen.

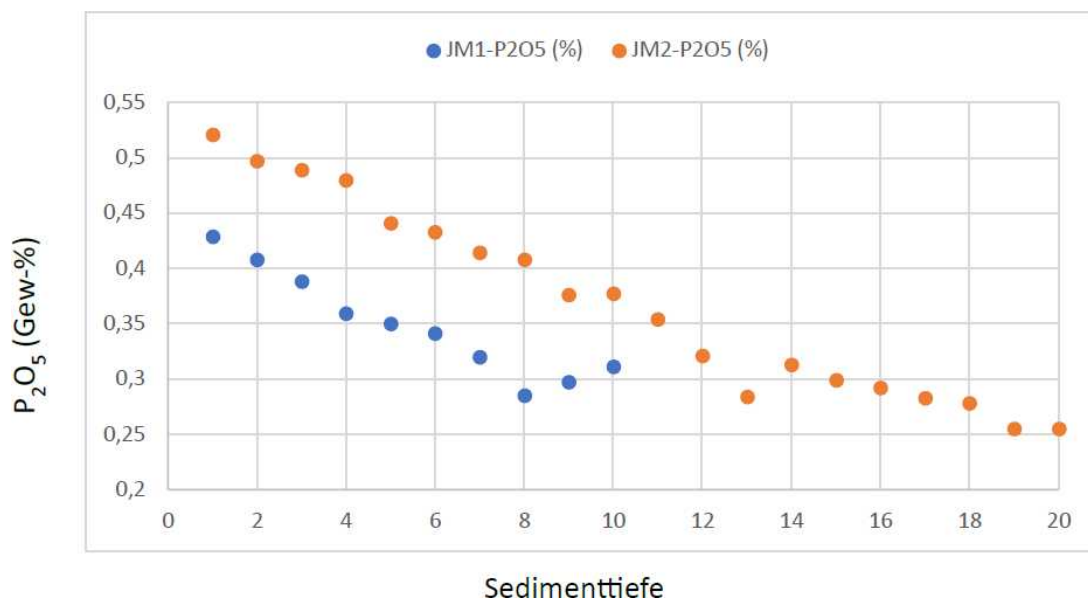


Abb. 9: Phosphatkonzentrationen in Oberflächensedimente des Jörne Meerke vor (JM1) und nach (JM2) der Applikation mit Ca-Nitrat.

6 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Dieses Kapitel fasst die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Gesamtvorhabens zusammen und beschreibt die erzielten Fortschritte hinsichtlich der Wirkungsweise, ökologischen Bewertung und technischen Umsetzung des Schäfersee-Verfahrens®. Die Darstellung beruht auf den gemeinsam erhobenen Mess-, Analyse- und Versuchsdaten des Büro Wassmann und der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Umweltmikrobiologie. Zur besseren Vergleichbarkeit erfolgt die Auswertung parametergestützt, sodass die beobachteten Zusammenhänge standortunabhängig interpretiert werden können.

Der Fokus liegt auf der Redoxstabilisierung, der Unterbindung reduktiver Prozesse, der Phosphordynamik im Sediment sowie den begleitenden mikrobiologischen Veränderungen. Damit werden die zentralen Wirkmechanismen des Verfahrens beschrieben und deren Bedeutung für die Stabilisierung urbaner, organisch belasteter Gewässer bewertet.

6.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten

Ziel der im Projekt durchgeführten Untersuchungen war es, die Wirkungsweise und ökologische Verträglichkeit des Schäfersee-Verfahrens® unter realen Bedingungen zu prüfen. Da jedes Gewässer ein individuelles Belastungs- und Kontaminationsprofil aufweist, war ein modularer und standortspezifisch angepasster Untersuchungsansatz erforderlich. Nur durch die Kombination von Feldmessungen, kontinuierlichem Monitoring, chemischer Analytik und mikrobiologischen Analysen konnten die komplexen Redoxprozesse und Stoffkreisläufe vollständig erfasst werden.

Gewässerübergreifender Ansatz Die Auswahl mehrerer Gewässer – vom langjährig behandelten Schäfersee über den neu behandelten Fennsee bis zum Jörne Meerke – war notwendig, um sowohl die kurzfristigen Reaktionen als auch die langfristige Systementwicklung zu erfassen. Der Vergleich verschiedener Seentypen erlaubt die Bewertung der Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere kontaminierte oder eutrophe Gewässer und liefert belastbare Hinweise auf standortabhängige Unterschiede im Redoxverhalten.

Monitoring, Sensorik und Wasseranalytik Die kontinuierliche Überwachung der physikalisch-chemischen Parameter bildete das zentrale Steuerungsinstrument des Schäfersee-Verfahrens®. Das Verfahren zielt nicht allein auf eine chemische Reaktion im Sediment ab, sondern auf eine kontrollierte Beeinflussung der Redoxbedingungen im gesamten Tiefenwasser. Daher war das begleitende Mess- und Datenmanagement kein begleitender Arbeitsschritt, sondern ein integraler Bestandteil des Funktionsprinzips.

Auf einem stationären Messponton wurde ein permanentes Sensor- und Datenaufzeichnungssystem installiert, das die Parameter Temperatur, Sauerstoff, Redoxpotenzial und Leitfähigkeit in Echtzeit erfasste. Diese kontinuierlichen Daten bildeten die Grundlage für die Dosierungsstrategie der Nitrat- und

Sauerstoffapplikation. Durch die enge Rückkopplung zwischen Messwerten und Steuerung konnte die Redoxdynamik gezielt beeinflusst werden, um anaerobe Prozesse (Sulfatreduktion, Methanogenese) zu unterbinden und oxidative Bedingungen zu stabilisieren.

Ergänzend dazu erfolgten regelmäßige Wasseranalysen aus verschiedenen Tiefen (Nitrat, Ammonium, Phosphat, Sulfat, Eisen), um die chemische Systementwicklung und die Bilanzierung der Stoffströme zu validieren. Das Monitoring lieferte somit sowohl die empirische Basis für die wissenschaftliche Auswertung als auch die operative Grundlage für die Prozesssteuerung. In dieser Verknüpfung von Beobachtung und Steuerung liegt das Alleinstellungsmerkmal des Schäfersee-Verfahrens® und der entscheidende methodische Fortschritt gegenüber klassischen Gewässersanierungsansätzen.

Darüber hinaus wurde am Schäfersee ein bestehender Grundwasserpegel in das Untersuchungsprogramm einbezogen, um mögliche Auswirkungen der Nitratdosierung auf das angrenzende Grundwasser zu prüfen. Die Analysen ergaben zu keinem Zeitpunkt erhöhte Nitratgehalte oder sonstige Hinweise auf eine Beeinflussung des Grundwassers. Damit bestätigt sich, dass die Nitratapplikation auf das Oberflächenwasser begrenzt bleibt und keine vertikale Stoffverlagerung in den Grundwasserleiter erfolgt.

Sediment- und Schadstoffanalysen Die Sedimentanalysen dienten dem Verständnis der ablaufenden biogeochemischen Prozesse und der potenziellen Risiken. Besonderes Augenmerk lag auf der Untersuchung metallischer und organischer Schadstoffe. Eisen wurde als Schlüsselfaktor betrachtet, da es einerseits Phosphor binden und so zur internen Nährstoffelimination beitragen kann, andererseits als Indikator für Redoxverhältnisse im Sediment fungiert. Zudem wurde geprüft, ob kontaminierte Sedimente durch die Sauerstoff- und Nitratapplikation Metalle mobilisieren könnten – ein Risiko, das trotz hoher Schwermetallgehalte im Sediment nicht bestätigt wurde. Die Untersuchungen zu organischen Schadstoffen (PAK, MKW, EOX) unter realen Umweltbedingungen ermöglichten eine differenzierte Bewertung des oxidativen Abbaus und lieferten erstmals belastbare Daten zur Langzeitstabilität der Sedimentmatrix.

Mikrobiologische und molekulare Untersuchungen Die mikrobiologischen Analysen, durchgeführt von der Abteilung Umweltmikrobiologie der Technischen Universität Berlin, waren notwendig, um die Mechanismen der beobachteten Redoxverschiebungen zu verstehen. Sie zeigen, wie die mikrobiellen Gemeinschaften auf Nitrat- und Sauerstoffzufuhr reagieren, welche funktionellen Gruppen an den Prozessen beteiligt sind und inwieweit Risiken, etwa durch toxische *Microcystis*-Populationen, bestehen. Die Ergebnisse aus qPCR-, HPLC- und Metagenomanalysen belegen, dass keine Hinweise auf unerwünschte Cyanobakterienentwicklungen vorlagen und dass die Nitratapplikation mit einer deutlichen Zunahme oxidativer und denitrifizierender Stoffwechselwege einhergeht. Die identifizierten funktionellen Gene (z. B. Oxygenasen) deuten zudem auf ein erhöhtes Potenzial zum Abbau organischer Schadstoffe unter Sauerstoffeinfluss hin.

Gesamtbewertung Das kombinierte Vorgehen aus kontinuierlicher Messung, chemisch-analytischer Kontrolle und molekularbiologischer Charakterisierung war notwendig und angemessen, um die Funktionsweise des Schäfersee-Verfahrens® ganzheitlich zu verstehen. Es erlaubt nicht nur die Bewertung

kurzfristiger Effekte, sondern auch Aussagen über langfristige Stabilisierung und ökologische Sicherheit. Damit wurden die Projektziele erreicht und zugleich belastbare Grundlagen für die Anwendung des Verfahrens in anderen belasteten Gewässersystemen geschaffen.

6.2 Sauerstoffhaushalt und Redoxstabilisierung

Die Entwicklung von Sauerstoffgehalt und Redoxpotenzial im Tiefenwasser des Schäfersees zeigt die grundlegende Wirkung des Schäfersee-Verfahrens®. In den Jahren 2015 und 2016 wurden Voruntersuchungen ohne Behandlung durchgeführt. Ab Juli 2017 begann die kontinuierliche Applikation von Calciumnitrat in Kombination mit sauerstoffangereichertem Wasser. Bereits nach kurzer Zeit reagierte das System deutlich: Das Redoxpotenzial stieg sprunghaft an und verblieb seither im positiven Bereich, während sich parallel auch der Sauerstoffgehalt in der Tiefenzone etablierte (Abb. 11, 10).

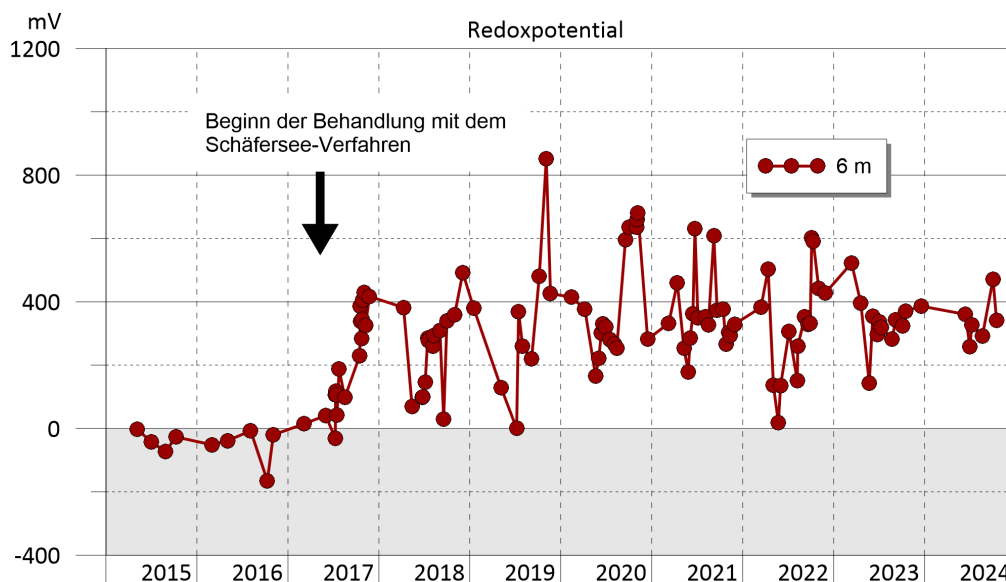


Abb. 10: Redoxpotenzial in 6 m Tiefe im Schäfersee, 2015–2024. Sprunghafter Anstieg und dauerhafte Stabilisierung nach Beginn der Behandlung.

Im Zeitraum vor 2017 lagen die Redoxwerte in 6 m Tiefe überwiegend im negativen Bereich (unter 0 mV), begleitet von anoxischen Bedingungen und typischer Schwefelwasserstoffbildung. Nach Beginn der Behandlung erhöhte sich das Redoxpotenzial auf Werte zwischen +300 und +800 mV und blieb auch während der sommerlichen Stagnationsphasen oberhalb der Nulllinie. Gleichzeitig konnte im Tiefenwasser erstmals wieder ein messbarer Sauerstoffgehalt nachgewiesen werden. In den Sommerhalbjahren erreichten die Werte Spitzen von 8 bis 10 mg l⁻¹, während sie zuvor nahe 0 mg l⁻¹ lagen.

Die Entwicklung belegt eine dauerhafte Stabilisierung des Redoxmilieus. Besonders deutlich wird der Effekt während der Herbstzirkulation: Der Sauerstoff aus den oberen Wasserschichten kann seit 2018 regelmäßig bis in 6 m Tiefe eindringen und dort persistieren. Dies war in der unbehandelten Phase nicht der Fall. Die Daten deuten darauf hin, dass das Tiefenwasser seither als Pufferzone wirkt, die den Aufstieg

zehrender Stoffe aus dem Sediment verhindert. Entsprechend bleiben auch die Sauerstoffverhältnisse in den oberflächennahen Schichten stabil.

Das Verhalten illustriert die zentrale Wirkweise des Verfahrens: Durch die Etablierung eines stabilen Redoxpotenzials werden die reduktiven Prozesse im Sediment unterdrückt, während die Sauerstoffzehrung in der Wassersäule abnimmt. Das System bleibt über Jahre hinweg oxidierend, ohne dass eine physikalische Vollumwälzung erforderlich wäre.

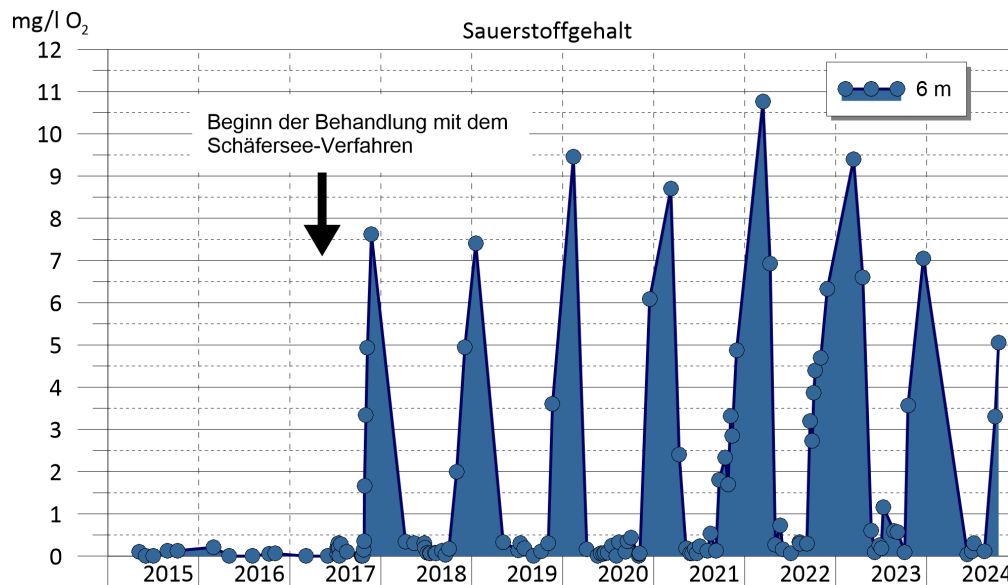


Abb. 11: Sauerstoffgehalt in 6 m Tiefe im Schäfersee, 2015–2024. Beginn der Behandlung mit dem Schäfersee-Verfahren® ab Juli 2017.

Ein analoges Verhalten wurde auch am Jörne Meerke festgestellt, wo das Redoxpotenzial im Hypolimnion nach Einleitung der Behandlung ebenfalls deutlich anstieg und damit die Rücklösung von Phosphor stoppte (vgl. Abschnitt 6.5). Am Fennsee führte die oberflächennahe Stoßdosierung zu einer Stabilisierung des Sauerstoffhaushalts im gesamten Wasserkörper; auftretende Defizite nach Starkregenereignissen konnten durch kurzfristige, tägliche Nachdosierungen innerhalb weniger Tage vollständig kompensiert werden.

6.3 Sauerstoffhaushalt

Die kontinuierlichen Messungen am Ponton des Schäfersees zeigen, dass die Sauerstoffverhältnisse über den gesamten Untersuchungszeitraum stabil blieben, ohne dass sich eine deutliche Beeinträchtigung infolge der Behandlung mit dem Schäfersee-Verfahren® ergab. Ab dem Jahr 2022, nach der vollständigen Installation aller Sonden, lagen für drei Tiefenstufen (1 m, 3 m und 4,5 m) kontinuierliche Daten vor. Die Konzentrationen schwankten in Abhängigkeit von der Schichtungssituation und den Witterungsbedingungen, blieben im Oberflächenbereich jedoch durchweg im oxidativen Bereich ($6\text{--}12\text{ mg l}^{-1}$). In den tieferen

Messpunkten traten während der sommerlichen Stagnationsphasen teilweise Sauerstoffzehrungen auf, die jedoch keinen Rückfall in ein reduktives Milieu nach sich zogen.

Diese Beobachtung verdeutlicht die Wirkweise des Verfahrens: Durch die gezielte Nitratdosierung wird das Redoxsystem so stabilisiert, dass auch bei geringem oder fehlendem Sauerstoffangebot ein oxidierendes Milieu erhalten bleibt. Die Nitratverfügbarkeit sorgt für eine Abpufferung des reduzierenden Potentials, sodass reduktive Prozesse (z.B. Sulfatreduktion) unterdrückt werden. Parallel dazu wird der Abbau von Ammonium gefördert und das Redoxpotenzial positiv gehalten. Damit bildet sich ein stabiles, schwach oxidatives Milieu aus, das die Phosphorbindung im Sediment begünstigt.

Die Sondenmessungen spiegeln diesen Zusammenhang deutlich wider: Während der Frühjahrsmonate vor Beginn der Dosierung (April–Mai) sinkt das Redoxpotenzial leicht ab und Ammonium kann in geringen Mengen nachgewiesen werden. Nach Einsetzen der Dosierung ab Juni steigen Redoxpotenzial und Nitratkonzentration deutlich an, während Ammoniumwerte abnehmen. Der Sauerstoff zeigt dabei keine unmittelbare Korrelation, was die Entkopplung zwischen Sauerstoffgehalt und Redoxzustand durch Nitratsteuerung bestätigt.

Ergänzende Vor-Ort-Messungen während der Wintermonate belegen zudem, dass sich im Schäfersee selbst in 6 m Tiefe wieder messbarer Sauerstoff einstellt. Dies deutet darauf hin, dass die durch die Nitratapplikation erreichte Stabilisierung des Redoxmilieus die Rückkehr oxidierender Bedingungen auch in tieferen Wasserschichten ermöglicht. Der Messpunkt selbst befindet sich nicht im Bereich der größten Wassertiefe ($Z_{\max}$), weshalb die dortigen Sensoren diesen Effekt nur teilweise erfassen.

Ein vergleichbares Verhalten zeigte sich auch im Jörne Meerke, wo die Behandlung das Redoxpotenzial im Tiefenwasser anhebt und damit eine Unterbindung der Phosphorrücklösung bewirkt (vgl. Abschnitt 6.5). Am Fennsee führte die Behandlung hingegen zu einer generellen Stabilisierung des Sauerstoffhaushalts im gesamten Wasserkörper. Dort reagiert das System besonders sensibel auf Witterungsereignisse; durch ereignisgesteuerte Stoßdosierungen konnte jedoch jeder kurzzeitige Sauerstoffabfall innerhalb weniger Tage vollständig kompensiert werden.

6.4 Hemmung reduktiver Prozesse und Gasbildung

Die Stabilisierung des Redoxpotenzials durch Nitrat und Sauerstoff führte in allen behandelten Gewässern zu einer deutlichen Hemmung reduktiver Prozesse und damit zur Unterdrückung der Gasbildung im Sediment. Unter natürlichen, anoxischen Bedingungen werden Sulfat und Kohlendioxid von Mikroorganismen als alternative Elektronenakzeptoren genutzt, was zur Bildung von Schwefelwasserstoff (H_2S) und Methan (CH_4) führt. Diese Stoffe sind nicht nur toxisch, sondern verursachen erhebliche Geruchsbelastungen und tragen durch ihre Freisetzung in die Atmosphäre zur Klimawirkung eutropher Gewässer bei.

Mit der gezielten Bereitstellung von Nitrat (NO_3^-) als höherwertigem Elektronenakzeptor wurde dieser Stoffwechselfad gezielt unterbunden. Nitrat wird in der Redoxhierarchie bevorzugt, sodass Sulfat- und

Methanbildner energetisch verdrängt werden. Dadurch kam es in den behandelten Sedimentzonen zu einem Übergang von reduktiven in oxidative Stoffwechselbedingungen, was sich in den Messdaten und den beobachteten Gasbildungsprozessen klar widerspiegelte.

- H_2S : Geruchsemissionen wurden in den behandelten Gewässerabschnitten vollständig eliminiert. Im Fennsee, wo zuvor faulige Gerüche regelmäßig bis in die Umgebung wahrnehmbar waren, konnten belastungsbedingte H_2S -Peaks bereits kurz nach der Inbetriebnahme der Anlage durch ereignisgesteuerte Dosierungen zuverlässig unterdrückt werden. Am Schäfersee wurden über mehrere Jahre hinweg nur noch geringste Mengen von gelöstem Schwefelwasserstoff detektiert. Diese Beobachtungen bestätigen, dass die Sulfatreduktion in den oberen Sedimentschichten durch die Nitratversorgung vollständig gehemmt wurde.
- CH_4 : Die Methanproduktion im Sediment sowie die Methanfreisetzung durch Ebullition (Gasblasenaufstieg) und diffusive Emission gingen nach Anwendung des Schäfersee-Verfahrens® deutlich zurück. Dies wurde sowohl durch die Sedimentanalysen als auch durch die Gasfallenmessungen eindeutig belegt. Im Fennsee konnte eine ausgeprägte Abnahme der Methanbildung im Sediment und zugleich eine deutlich geringere Methanfreisetzung über die Gasfallen gemessen werden. Am Schäfersee zeigte sich ebenfalls eine Reduktion der methanogenen Aktivität, wobei im Hochsommer zeitweise wieder ein leichter Anstieg zu beobachten war; insgesamt blieb das Methanniveau jedoch deutlich unter den Ausgangswerten. Diese Ergebnisse belegen den mikrobiellen Konkurrenzmechanismus zwischen Denitrifikation und Methanogenese und bestätigen die nachhaltige Unterdrückung methanbildender Prozesse. Eine quantitative Bewertung der vermiedenen Methanfreisetzung erfolgt im Kontext der Klimarelevanz (siehe Abschnitt 6.7).
- N_2O : Die vorübergehende Bildung von Lachgas, einem natürlichen Zwischenprodukt der Denitrifikation, konnte im Tiefenwasser unmittelbar oberhalb der Sedimentschicht des Schäfersees nachgewiesen werden. Im Fennsee blieb N_2O im untersuchten Konzentrationsbereich unterhalb der Nachweisgrenze. Die gemessenen Werte am Schäfersee deuten auf eine temporäre Zwischenbildung hin, die im Zuge der vollständigen Denitrifikation zu molekularem Stickstoff (N_2) reduziert wird. Für Lachgas konnten in dieser Studie keine Hinweise auf eine vermehrte Freisetzung gefunden werden. Angesichts des hohen Treibhauspotenzials von N_2O ($GWP_{100} \approx 265\text{--}298 \times CO_2$) ist dieser Befund besonders relevant, da er zeigt, dass trotz zwischenzeitlicher Bildung keine signifikanten Emissionen auftreten. Weitere Untersuchungen sollten sich mit der quantitativen Bilanzierung der tatsächlich aus dem Wasserkörper entweichenden Gase in Abhängigkeit von Nitratdosierung und Redoxzustand befassen.

Die Hemmung der Bildung von Schwefelwasserstoff, Methan und Lachgas hatte tiefgreifende Auswirkungen auf das gesamte ökologische System. Durch das Ausbleiben toxischer Schwefelverbindungen wurden benthische Lebensräume wieder besiedelbar, und die Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser ging deutlich zurück. Die Reduktion der CH_4 - und N_2O -Freisetzung trägt zusätzlich zur Verringerung klimarelevanter Emissionen bei, da Methan ein etwa 30-fach höheres (GWP_{100}) (siehe Abschnitt 2.5). Damit stellt die

Unterdrückung der Gasbildung einen der zentralen Wirkmechanismen des Schäfersee-Verfahrens® dar – sowohl aus ökologischer als auch aus klimapolitischer Perspektive.

6.5 Phosphordynamik und Sedimentprozesse

Die Entwicklung der Phosphorkonzentrationen im Schäfersee verdeutlicht die nachhaltige Wirkung des Schäfersee-Verfahrens® auf die Phosphorverfügbarkeit im Tiefenwasser. Bereits wenige Jahre nach Einführung der Behandlung sanken die Gesamtposphorwerte (Ges-P) im Tiefenwasser deutlich ab. Während in den Jahren 2015 und 2016 noch Konzentrationen von bis zu 2 mg l^{-1} auftraten, lagen die Werte ab 2021 im Bereich von $0,05\text{--}0,2 \text{ mg l}^{-1}$ (Abb. 12).

Die Boxplot-Auswertung stellt diesen Unterschied klar heraus: Der Median der Gesamtposphorkonzentrationen reduzierte sich um mehr als eine Größenordnung, und die Spannweite der Messwerte verringerte sich deutlich. Das System zeigt seither keine Rücklösungsereignisse mehr und bleibt auch in den Sommermonaten stabil. Diese Entwicklung belegt den Übergang von einer intern getriebenen Phosphorquelle zu einer stabilen Phosphorsenke.

Die beobachtete Stabilisierung beruht auf der Etablierung eines dauerhaft oxidierenden Milieus im Sediment-Wasser-Übergangsbereich. Durch die Nitratdosierung wird ein Redoxniveau aufrechterhalten, das die Reduktion von Eisen(III)- und Sulfatverbindungen unterbindet. Damit bleibt das Eisen im oxidierten Zustand verfügbar, wodurch Phosphat bevorzugt an schwerlösliche Eisenphosphate gebunden wird. Eine direkte Bestimmung der Bindungsform erfolgte nicht, jedoch weisen ergänzende sedimentanalytische Untersuchungen der Technischen Universität Berlin auf die Bildung von Vivianit ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) in oberflächennahen Sedimentschichten hin. Diese Analysen wurden durch die Arbeitsgruppen der Umweltmikrobiologie sowie des Instituts für Angewandte Geochemie (Prof. Neumann) durchgeführt. Der Nachweis von Vivianit spricht für ein reduziertes Eisen(II)-Phosphat als Stabilitätsform, das sich unter leicht oxidierenden Bedingungen an der Sedimentoberfläche langfristig erhält. Wahrscheinlich liegt daneben auch Eisen(III)-gebundener Phosphor vor, der jedoch analytisch bislang nicht eindeutig bestätigt wurde.

Im Schäfersee, an dem das Verfahren bereits seit 2017 kontinuierlich angewendet wird, konnte somit eine dauerhafte Umstellung des Sedimentmilieus erreicht werden. Das Eindringen der Calciumnitratlösung in das oberflächennahe Sediment wird als entscheidend für diesen Prozess bewertet, da hierdurch Schwefelwasserstoff eliminiert und eine Bindung an Fe-Oxihydroxide ermöglicht wird, die sich später zu Vivianit umwandeln können. Die langjährige Behandlung begünstigt somit die Ausbildung stabiler, mineralischer Phosphorbindungen, wodurch der Gesamtposphor im Tiefenwasser dauerhaft auf sehr niedrigem Niveau verbleibt.

Am Iröne Meerke wurden im Rahmen des Projekts von der lanaplan GbR gezielte Inkubationsversuche durchgeführt. Dabei wurden Sedimentkerne vor und kurz nach der erstmaligen Calciumnitratdosierung untersucht. In den nach der Behandlung entnommenen Proben zeigte sich eine deutliche Abnahme der

löslichen Phosphorfraktionen. Mineralogische Untersuchungen ergaben dort keinen Vivianitnachweis, jedoch Hinweise auf calciumhaltige Phasen, die auf die beginnende Bildung apatithaltiger Verbindungen schließen lassen. Da die Behandlung zu diesem Zeitpunkt erst begonnen hatte, ist das Ausbleiben signifikanter Vivianitmengen plausibel.

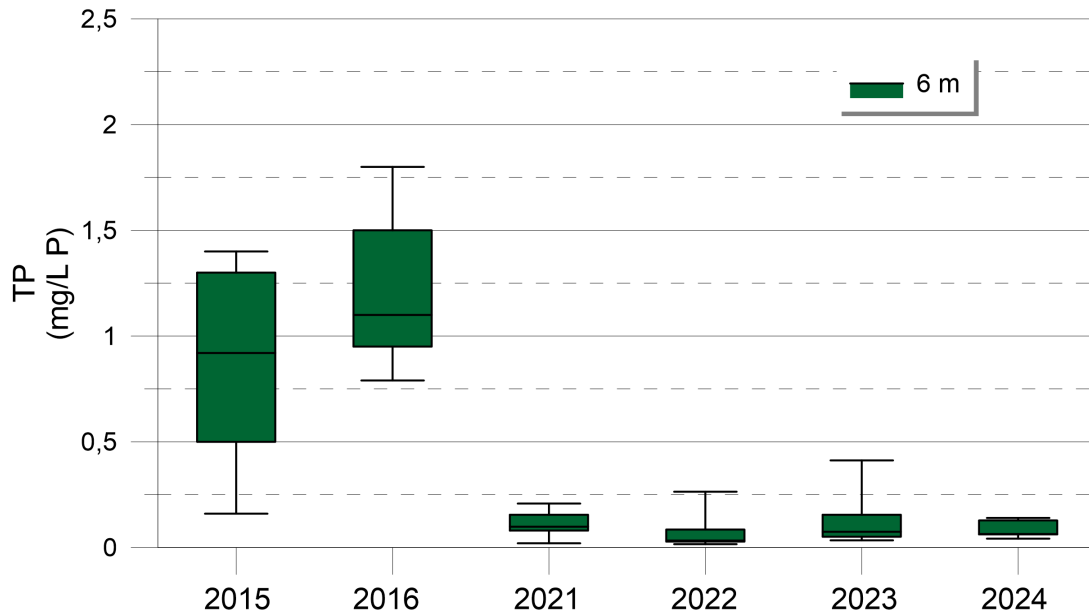


Abb. 12: Jahresweise Verteilung der Gesamtposphorkonzentrationen (6 m Tiefe) im Schäfersee vor Beginn der Behandlung (2015–2016) und während des Projektzeitraums (2021–2024).

Im flacheren Fennsee führte die gleichmäßige Verteilung der Nitrat- und Sauerstoffdosierung im gesamten Wasserkörper zu einer generellen Stabilisierung des Phosphorhaushalts. Die Reduktion der Phosphorkonzentrationen im Tiefenwasser weist darauf hin, dass dort vermutlich Eisen(III) als Bindungspartner fungiert. Aufgrund der durchgehend oxidativen Wasserverhältnisse ist eine Eisen(III)-Phosphatbindung wahrscheinlich, auch wenn im Sediment selbst anoxische Mikrozonon auftreten können.

6.6 Mikrobiologische Befunde

Die mikrobiologischen Untersuchungen liefern ein detailliertes Bild darüber, wie sich die Zusammensetzung und Aktivität der mikrobiellen Gemeinschaften in den behandelten Gewässern infolge der gesteuerten Sauerstoff- und Nitratapplikation verändert haben. Im Vordergrund stand dabei die Frage, in welchem Maße sich die dominierenden Stoffwechselprozesse von reduktiven zu oxidativen Bedingungen verschieben und welche Rolle dabei nitrifizierende, denitrifizierende und methanogene Mikroorganismen spielen.

Schäfersee Die mikrobiologischen Analysen des Schäfersees zeigen über die gesamte Behandlungsphase hinweg eine weitgehend stabile Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft. Bereits vor Beginn des Projekts war das Gewässer über mehrere Jahre mit dem Schäfersee-Verfahren® behandelt

worden, sodass sich eine angepasste Sedimentgemeinschaft etabliert hatte. Die Auswertung der 16S-rRNA-Sequenzdaten belegt, dass die Sedimente von *Proteobacteria* dominiert werden, insbesondere von Vertretern der *Gammaproteobacteria*, die für heterotrophe Denitrifikation bekannt sind (Xu *et al.*, 2014). Ähnliche Dominanzverhältnisse wurden in anderen Studien zur Calciumnitrat-Applikation beschrieben (Tang *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022). Methanogene Archaeen der Ordnung *Methanosarcinales* traten nur in geringer relativer Häufigkeit auf und nahmen im Verlauf der Behandlungsperiode leicht ab, was mit den sinkenden Methankonzentrationen im Poren- und Tiefenwasser korrespondiert.

Im Sediment des Schäfersees wurden in geringen Anteilen DNA-Spuren von *Microcystis* spp. detektiert. Diese Nachweise beziehen sich ausschließlich auf Sedimentproben und sind als Überreste bzw. persistente Signale früherer Einträge zu werten, nicht als Hinweis auf aktive Populationen im Freiwasser. Im Epilimnion wurden weder durch mikroskopische Analysen noch durch HPLC- oder qPCR-Untersuchungen Hinweise auf das Vorhandensein von Microcystin-bildenden Cyanobakterien gefunden; auch das Toxin Microcystin-LR blieb unterhalb der Nachweisgrenze von $0,1 \mu\text{g L}^{-1}$. Damit bestätigt sich, dass im Schäfersee trotz der Nitrat- und Sauerstoffzugabe keine Förderung toxischer Cyanobakterien erfolgte. Der Bezug zu den theoretischen Überlegungen von Hellweger *et al.* (2022) unterstreicht, dass die ergänzenden Untersuchungen insbesondere dem wissenschaftlichen Ausschluss potenzieller Risiken dienen.

Die Befunde deuten darauf hin, dass die im Sediment vorhandenen mikrobiellen Gemeinschaften flexibel zwischen Sauerstoff-, Nitrat- und Sulfatatmung wechseln können und die Prozesse der Denitrifikation durch die vorhandenen Populationen getragen werden. Eine grundlegende Umstrukturierung der mikrobiellen Gemeinschaft war für die Umsetzung der redox-basierten Prozesse nicht erforderlich, was auf eine stabile, adaptierte Sedimentökologie hinweist.

Fennsee Im unbehandelten Zustand dominierten im Fennsee anaerobe Mikroorganismen, die Fermentierungs-, Sulfatreduktions- und Methanogenese Prozesse katalysieren. Dies spiegelte sich in den erhöhten Sulfidkonzentrationen und der typischen Geruchsentwicklung des Gewässers wider. Nach Einführung des Schäfersee-Verfahrens® veränderte sich die Zusammensetzung der Sedimentgemeinschaft deutlich: Nitratatmende und schwefeloxidierende Bakterien wie *Dechloromonas*, *Thiobacillus* und *Sulfuritalea* nahmen in ihrer relativen Häufigkeit zu, während methanogene Archaeen, insbesondere Vertreter der Gattung *Methanosaeta*, signifikant zurückgingen. Diese Entwicklung weist auf eine gezielte Verschiebung des Redoxgleichgewichts in Richtung oxidativer Prozesse hin.

Parallel zu diesen mikrobiellen Veränderungen wurde durch die TU Berlin eine deutliche Veränderung der Wasserchemie dokumentiert. Die Sulfatkonzentrationen stiegen im Jahr 2024 auf Werte zwischen 75 und 120 mg L^{-1} , nachdem sie im Vorjahr noch unter 25 mg L^{-1} gelegen hatten, während H_2S nur zu Jahresbeginn kurzzeitig nachweisbar war. Gleichzeitig blieben die Nitratgehalte im Wasserkörper stabil unter $2 \text{ mg L}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$, und der Gehalt an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) im Tiefenwasser nahm von 27,5 auf 13 bis 18 mg L^{-1} ab. Diese Entwicklungen deuten auf eine verstärkte heterotrophe Nitratatmung und einen Übergang zu oxidativen Bedingungen im gesamten Sediment-Wasser-System

hin.

Begleitende Metagenomanalysen zeigten eine Zunahme funktioneller Gene, die an der Nitratatmung beteiligt sind, was belegt, dass das zugeführte Nitrat mikrobiell umgesetzt wird und nicht nur durch Diffusion oder chemische Reaktion abnimmt. Zudem wurden vermehrt Gene für Oxygenasen nachgewiesen, die den mikrobiellen Abbau organischer Substanzen unter sauerstoffreichen Bedingungen ermöglichen. Damit ergibt sich der Hinweis, dass die gesteuerten Redoxbedingungen auch das Potenzial der Sedimentgemeinschaft zum oxidativen Abbau organischer Kohlenstoffverbindungen erhöhen. Insgesamt zeigen die Befunde, dass das Verfahren im Fennsee zu einer nachhaltigen Umstellung der mikrobiellen Stoffwechselaktivität hin zu nitrat- und sauerstoffbasierten Prozessen führt und damit eine zentrale Voraussetzung für die langfristige Stabilisierung des Redoxmilieus schafft.

Jröne Meerke Vom Jröne Meerke liegen bislang nur eingefrorene Sedimentproben aus der obersten Schicht (0–5 cm) vor, die zur weiteren mikrobiologischen Untersuchung eingelagert wurden. Die Proben wurden von Projektpartnerseite beprobt und der TU Berlin zur späteren Analyse übergeben. Eine Auswertung steht noch aus, da im Untersuchungszeitraum die Arbeiten an den Gasmessungen und Metagenomdaten des Fennsees priorisiert wurden. Aufgrund der ähnlichen physiko-chemischen Ausgangsbedingungen ist jedoch anzunehmen, dass sich die mikrobiellen Prozesse im Jröne Meerke in vergleichbarer Weise in Richtung oxidativer und nitratbasierter Stoffwechselpfade verschieben werden.

Cyanobakterien und Cyanotoxine Vor dem Hintergrund der in der Fachliteratur geführten Diskussion um die Wechselwirkungen zwischen Stickstoff- und Phosphorlimitierung (Hellweger *et al.*, 2022) wurde überprüft, ob die Zufuhr von Nitrat und Sauerstoff im Rahmen des Schäfersee-Verfahrens® das Wachstum oder die Toxinbildung von Cyanobakterien, insbesondere *Microcystis* spp., begünstigt. Hierzu etablierte die TU Berlin molekularbiologische (PCR, qPCR) und analytische Verfahren (HPLC) zum Nachweis des *mcyA*-Gens und des Toxins Microcystin-LR.

Im Oberflächenwasser des Schäfersees konnten weder *Microcystis* noch Microcystin-LR oberhalb der Nachweisgrenze ($\text{LOD} = 0,1 \mu\text{g L}^{-1}$) detektiert werden; mikroskopische Phytoplanktonanalysen und fluorometrische Chlorophyllmessungen bestätigten diesen Befund. Auch im Fennsee wurde weder das *mcyA*-Gen noch Microcystin-LR nachgewiesen. In den 16S-rRNA-Analysen des Sediments fanden sich nur minimale Anteile potenziell toxinbildender Cyanobakterien (*Microcystis* $\approx 0,002\%$, *Nostoc* und *Planktothrix* noch geringer).

Die Daten zeigen konsistent, dass das Schäfersee-Verfahren® keine Förderung analysierter toxischer Cyanobakterien verursacht. Die im Sediment gelegentlich nachgewiesenen Cyanobakterien-DNA-Fragmente können als Überdauerungsformen interpretiert werden und zeigten für die Bewertung des Freiwassers in dieser Studie keine ökologische Relevanz.

Bewertung Die Gesamtheit der mikrobiologischen Untersuchungen belegt, dass das Schäfersee-Verfahren® zu einer gezielten Verschiebung der mikrobiellen Stoffwechselprozesse in den Sedimenten führt. Durch die regelmäßige Zufuhr von Nitrat und Sauerstoff werden reduktive Prozesse auf Sulfat- und

Methanbasis weitgehend unterdrückt, während oxidative und denitrifizierende Prozesse gestärkt werden. Die Sedimente entwickeln dadurch ein stabileres Redoxmilieu mit geringerer Methanbildung und reduzierter Schwefelwasserstoffproduktion. Zugleich konnten keine negativen Effekte auf die mikrobiologische Diversität oder eine Förderung toxinbildender Cyanobakterien festgestellt werden. Insgesamt stützen die Ergebnisse die Annahme, dass das Verfahren mikrobiell vermittelte Prozesse nutzt, um die Sediment-Wasser-Grenzschicht langfristig zu stabilisieren und die Wasserqualität nachhaltig zu verbessern.

6.7 Klimarelevante Effekte

Die Reduzierung der Methanogenese im anoxischen Tiefenwasser stellt einen zentralen klimarelevanten Effekt des Schäfersee-Verfahrens® dar. Am Schäfersee, an dem die entsprechenden Gasmessungen durchgeführt wurden, zeigte sich nach Beginn der Calciumnitratdosierung ein deutlicher Rückgang der Bildung spezifischer Gase. Innerhalb weniger Stunden bis Tage nahm die H_2S -Produktion in den Tiefenzonen stark ab, was sowohl analytisch als auch organoleptisch belegt wurde: In Tiefenwasserproben war kein Schwefelwasserstoffgeruch mehr feststellbar – selbst bei Sedimentanteilen. Dies weist auf eine weitgehende Reduzierung der Sulfatatmung und damit der H_2S -Emissionen hin.

Parallel zeigten die mikrobiologischen Analysen der Technischen Universität Berlin eine Verschiebung der mikrobiellen Gemeinschaftsstruktur, besonders im Fennsee, der im behandelten und unbehandelten Zustand verglichen werden konnte. Methanogene Archaeen nahmen dabei tendenziell ab, während nitrat- und oxidationsbasierte Stoffwechselgruppen zunahmen.

Damit wird belegt, dass die durch Nitrat- und Sauerstoffeinfluss stabilisierten Bedingungen die methanogene Aktivität im Sediment signifikant einschränken.

Die von der TU Berlin durchgeführten Experimente am Schäfersee stützen diesen Befund quantitativ. Über den Behandlungszeitraum sanken die Konzentrationen gelösten Methans in den Sedimenten substantiell. Im weiteren Verlauf zeigten sich im Hochsommer vereinzelt vorübergehende Anstiege, vermutlich infolge von Dosierpausen und einer zwischenzeitlichen thermischen Stabilisierung des Wasserkörpers. Dies unterstreicht die Bedeutung einer kontinuierlichen Behandlung zur Aufrechterhaltung stabiler Redoxbedingungen bei kontinuierlichem Eintrag von ungeklärten Regenwassereinflüssen.

Lachgas (N_2O) konnte im Tiefenwasser des Schäfersees direkt über den Sedimenten als natürlicher Zwischenschritt der Denitrifikation vorübergehend nach der Dosierung nachgewiesen werden. Daher wurden im Folgejahr Lachgasanalysen des Schäfersees an verschiedenen Tiefenebenen durchgeführt und Gasfallen verwendet; jedoch konnte Lachgas in dem untersuchten Konzentrationsbereich im Gegensatz zu Methan nicht nachgewiesen werden. In den Messungen im Fennsee konnte Lachgas ebenfalls nicht direkt über dem Sediment nachgewiesen werden, möglicherweise aufgrund der gesteuerten Dosierung mit vielfach geringeren eingesetzten Nitratkonzentrationen. Diese Befunde weisen darauf hin, dass die Nitratapplikation in den untersuchten Seen keine relevanten unvollständigen Denitrifikationsprozesse ver-

ursacht, auch wenn weitere Studien, die sich detailliert mit der Lachgasbilanzierung befassen, weiterhin empfohlen werden.

Methan (CH_4) besitzt ein etwa 28- bis 34-fach höheres Treibhauspotenzial als Kohlendioxid (CO_2) über einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP_{100}), und etwa 80- bis 83-fach über 20 Jahre (GWP_{20}) (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). Binnengewässer gelten daher als bedeutende Methanquellen und spielen eine bislang unterschätzte Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf (Aben *et al.*, 2017; Wen *et al.*, 2018). Bereits Grossart *et al.* (2011) konnten zeigen, dass selbst in oxischen Schichten methanogene Prozesse auftreten können. Die durch das Schäfersee-Verfahren[®] erzielte deutliche Reduktion dieser Prozesse hat somit über den lokalen Gewässerschutz hinaus globale klimarelevante Bedeutung.

Die bislang vorliegenden Ergebnisse belegen, dass die Methanproduktion im Sediment und die Emission an die Atmosphäre am Fennsee während der Behandlungsphasen stark reduziert werden konnten, auch wenn kurzzeitige Rückgänge der Wirksamkeit bei sommerlicher Schichtung beobachtet wurden. Damit leistet das Verfahren einen messbaren Beitrag zur Minderung klimarelevanter Treibhausgase und zur ökologischen Stabilisierung urbaner Gewässer. Eine weiterführende Bilanzierung vermiedener Methanemissionen in CO_2 -Äquivalente kann in zukünftigen Arbeiten ermittelt werden.

6.8 Technische und prozessuale Erkenntnisse

Ein wesentliches Ergebnis des Projektes ist die Entwicklung eines vollständig integrierten Prozesssteuerungssystems für die Gewässerbehandlung. Die im Projekt realisierten stationären Anlagen ermöglichen eine bedarfsgerechte, ferngesteuerte Dosierung von Calciumnitrat und erlauben eine flexible Anpassung an hydrologische und chemische Randbedingungen in Echtzeit. Damit wurde erstmals ein Gewässertherapieansatz umgesetzt, bei dem Messung, Bewertung und Steuerung unmittelbar miteinander gekoppelt sind.

- *Fennsee*: Containeranlage mit unterirdischer Verteilung und Turbojets; ereignisgesteuerte Stoßdosierung bei Starkregen.
- *Jröne Meerke*: Einbindung des Trinkwassernetzes als Sauerstoffquelle; mikrozyklische Dosierstrategie mit täglichen bis zweitäglichen Minimalmengen.
- *Schäfersee*: Pontonbetrieb als Referenz; Planung einer landseitigen Station zur Daueranwendung.

Das System basiert auf einer kontinuierlichen Erfassung von Messdaten (Sauerstoff, Redoxpotenzial, Temperatur, Nitrat, Ammonium) in 10 min-Intervallen. Diese Daten werden über eine webbasierte Plattform automatisiert ausgewertet, sodass die Dosiermengen adaptiv an die aktuellen Prozesszustände und den spezifischen Bedarf des jeweiligen Gewässers angepasst werden können. Die Prozesssteuerung erlaubt damit eine *dynamische Gewässertherapie*, bei der Eingriffe nicht nach festen Zeitplänen, sondern auf Grundlage realer chemischer und physikalischer Veränderungen erfolgen.

Zur Veranschaulichung werden im Folgenden exemplarische Online-Daten gezeigt, welche die Funktionsweise und Reaktionsfähigkeit der automatisierten Regelungssysteme belegen. Beide Beispiele ver-

deutlichen typische Herausforderungen städtischer und halbstädtischer Gewässer mit unterschiedlichen hydraulischen und trophischen Bedingungen.

Die dargestellten Abbildungen sind Screenshots aus dem webbasierten Steuer- und Monitoringsystem, dem zentralen *Control Center*, über das die Sensordaten erfasst, grafisch aufbereitet und in Echtzeit visualisiert werden. Über dieselbe Plattform erfolgt auch die Fernsteuerung der Dosiersysteme, sodass Eingriffe unmittelbar und gezielt auf aktuelle Veränderungen der Gewässerparameter reagieren können.

Fennsee: Reaktive Stoßdosierung nach Starkregenereignis. Starkregenereignisse stellen für innerstädtische Gewässer eine besondere Belastung dar. Über Regenwasserkanäle gelangt stark mit organischem Material und Nährstoffen belastetes Oberflächenwasser in die Systeme, häufig begleitet von Temperatursprüngen und einer starken Trübung.

Die Folge ist eine rasche Zunahme des biochemischen Sauerstoffbedarfs im gesamten Wasserkörper, wodurch selbst zuvor stabile Sauerstoffverhältnisse innerhalb weniger Stunden zusammenbrechen können. Ein typisches Beispiel ereignete sich am 9. September 2024: Innerhalb eines halben Tages fiel der Sauerstoffgehalt im Fennsee von zuvor 3–6 mg L⁻¹ auf nahezu null. Bereits am Folgetag wurde durch die Steuerung der Containeranlage eine reaktive Stoßdosierung eingeleitet. Drei Dosierungen zu jeweils 200 L Calciumnitrat genügten, um innerhalb weniger Tage eine deutliche Erholung der Sauerstoffverhältnisse herbeizuführen. Die Abbildung 13 zeigt die zeitliche Entwicklung dieses Ereignisses. Das Beispiel verdeutlicht, dass über die automatisierte Regelung kurzfristige Belastungen infolge externer Ereignisse abgepuffert werden können und eine stabile Sauerstoffdynamik auch unter extremen Bedingungen aufrechterhalten bleibt.

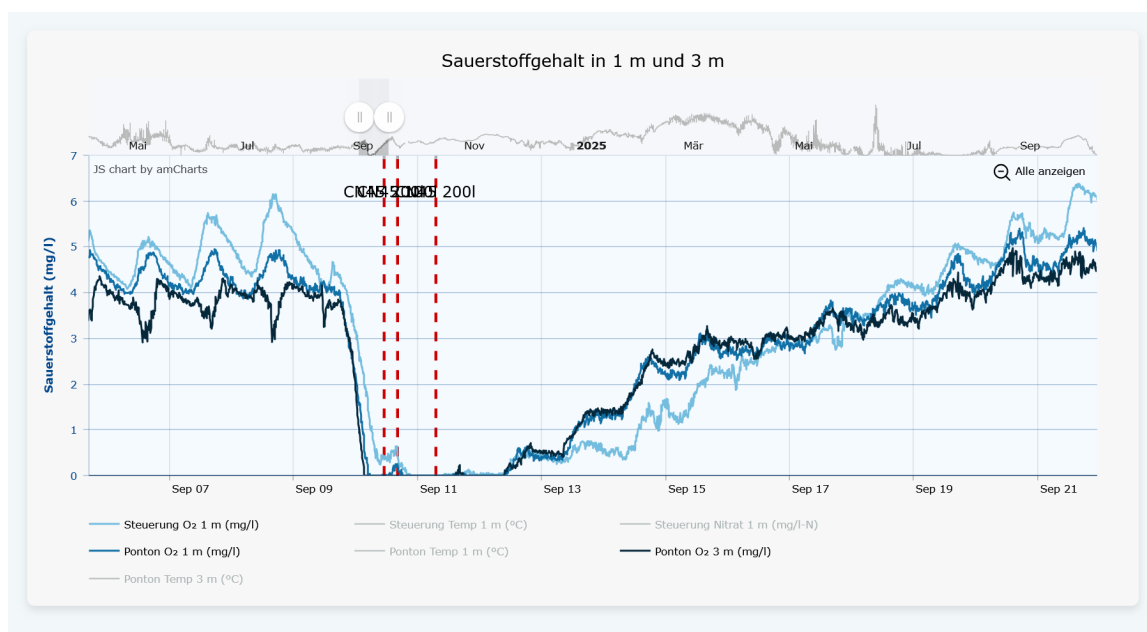


Abb. 13: Fennsee: Reaktive Sauerstoffstabilisierung nach Starkregen durch Stoßdosierung (Online-Daten, 10 min-Intervall).

Jröne Meerke: Schrittweise Anhebung des Redoxpotenzials. Im Gewässer Jröne Meerke wurde ein anderer Steuerungsansatz verfolgt, der auf einer kontinuierlichen, aber kleindosierten Nitratzufuhr basiert. Ziel war die gezielte, graduelle Anhebung des Redoxpotenzials in der Tiefenzone, um reduktive Prozesse dauerhaft zu unterbinden. Zu Beginn erfolgte eine tägliche Dosierung von rund 10 L Calciumnitrat; mit zunehmender Systemstabilisierung konnte das Dosierintervall schrittweise auf zwei Tage verlängert werden, ohne dass die Redoxwirkung nachließ. Diese kontinuierlich reduzierte Nitratzufuhr bewirkte über mehrere Wochen eine nachhaltige Stabilisierung der chemischen Verhältnisse: Das Redoxpotenzial wurde allmählich in den positiven Bereich überführt, während gleichzeitig die Ammoniumkonzentrationen sanken. Diese Entwicklung zeigt, dass selbst geringe, bedarfsgerecht dosierte Mengen ausreichen, um den Sediment-Wasser-Übergangsbereich in ein mild oxidierendes Milieu zu überführen und die Freisetzung reduzierter Stoffe (NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+}) zu verhindern. Die Online-Daten in Abbildung 14 verdeutlichen diesen Zusammenhang und belegen die Effizienz der sanften, mikrozyklischen Dosierstrategie.

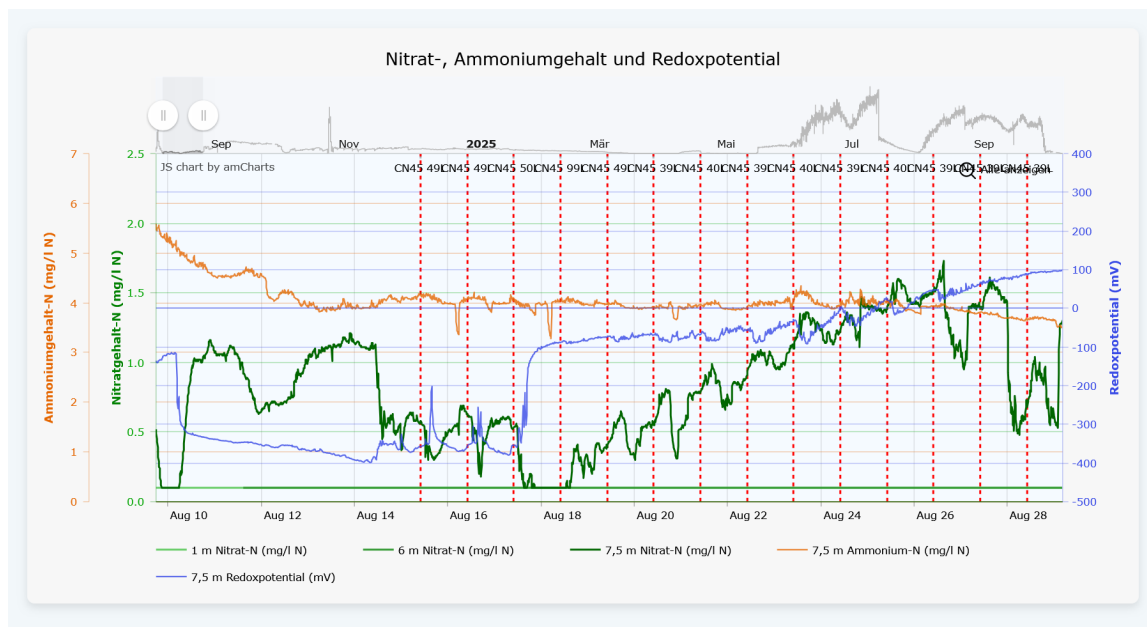


Abb. 14: Jröne Meerke: Entwicklung von Nitrat-, Ammonium- und Redoxpotenzial bei täglicher Stoßdosierung (Live-Daten aus Online-Monitoring).

Im Schäfersee liegen ebenfalls umfangreiche Online-Datenreihen vor, die den Verlauf von Sauerstoff- und Redoxpotenzial dokumentieren. Eine kontinuierliche Regelung ist dort bislang jedoch nicht implementiert, da die Behandlung gegenwärtig in drei zeitlich begrenzten Dosierphasen pro Jahr erfolgt. Während dieser etwa zweiwöchigen Anwendungen wird das Tiefenwasser gezielt vordosiert, wodurch bereits eine deutliche Stabilisierung des Redoxpotenzials erreicht werden kann.

Mit einer künftig geplanten landseitigen Dosieranlage wäre eine kontinuierliche, messdatenbasierte Steuerung möglich. Durch die direkte Kopplung an die Sensorik (Redox- und Nitratsonden) ließe sich das Dosierregime dynamisch anpassen und die Stoffzugabe weiter optimieren. Dies würde nicht nur eine

noch präzisere Stabilisierung des Milieus ermöglichen, sondern zugleich den Materialeinsatz reduzieren und die Betriebssicherheit erhöhen.

7 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Projekts wurden international mehrere Studien veröffentlicht, die sich mit der Anwendung von Nitrat zur Redoxstabilisierung und Sanierung eutropher oder belasteter Gewässer befassen. Diese Arbeiten bestätigen die grundlegende Wirksamkeit nitratbasierter Verfahren und erweitern das Verständnis ihrer ökologischen Effekte.

Bereits in den 1970er Jahren wurde der Einsatz von Nitrat zur biochemischen Oxidation reduzierter Sedimente erstmals beschrieben (Ripl, 1976). Das Prinzip, Nitrat als alternativen Elektronenakzeptor zur Unterbindung anaerober Prozesse zu nutzen, bildet die konzeptionelle Grundlage vieler moderner Sanierungsverfahren, darunter auch das Schäfersee-Verfahren®.

In den letzten Jahren haben verschiedene Arbeitsgruppen weltweit neue Anwendungen dieses Ansatzes untersucht und weiterentwickelt. So demonstrierten Kowalczevska-Madura *et al.*, 2024, dass eine kontinuierliche Nitratbehandlung des Hypolimnions in einem hypereutrophen See zu einer signifikanten Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse, einer Reduktion der Phosphorrücklösung und einer Stabilisierung der Wasserqualität führt. Dabei wurde gezeigt, dass die Methode auch langfristig stabil arbeitet und Phasen der Cyanobakterienblüten verkürzt oder vollständig unterbindet.

Weitere Untersuchungen befassten sich mit der gezielten Zufuhr von Calciumnitrat in Kombination mit Sauerstoffanreicherung, insbesondere zur Geruchskontrolle und Redoxstabilisierung in organisch belasteten Sedimenten. Studien wie Y. Zhang *et al.*, 2024, Wang *et al.*, 2024 und S. Zhang *et al.*, 2024 untersuchten sowohl Labor- als auch Feldanwendungen, bei denen Calciumnitrat eine nachhaltige Unterdrückung reduktiver Prozesse und eine Verbesserung der Phosphorbindung bewirkte. Gleichzeitig zeigten sich unter bestimmten Bedingungen Hinweise auf Metallmobilisierung, was die Notwendigkeit präziser Dosierstrategien und kontinuierlicher Überwachung unterstreicht. Die Mehrheit der bisher veröffentlichten Arbeiten wurde jedoch im Labor- oder Reaktormaßstab durchgeführt oder beleuchtete einzelne Teilaspekte, so dass die im vorliegenden Projekt gewonnenen Feldbefunde eine ideale und praxisnahe Ergänzung zur internationalen Studienlage darstellen.

Auch frühere Arbeiten zur Wirkung von Nitrat und Sauerstoff auf den mikrobiellen Stoffumsatz (W. Li *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2020; L. Li *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022) haben wichtige Beiträge zum Verständnis der Prozesse in sulfidhaltigen oder organisch stark belasteten Sedimenten geleistet. Sie zeigen, dass Nitrat nicht nur als Oxidationsmittel wirkt, sondern auch spezifische mikrobielle Gemeinschaften fördert, die den Abbau organischer Schadstoffe unterstützen.

Zusammenfassend belegen diese Veröffentlichungen, dass Nitrat-basierte Verfahren international als *nature-based solution* zur Redoxstabilisierung und Schadstoffminderung zunehmend Anerkennung fin-

den. Die Ergebnisse bestätigen die im vorliegenden Projekt erzielten Befunde hinsichtlich Wirksamkeit, Steuerbarkeit und Umweltverträglichkeit der nitratgestützten Prozessführung und unterstreichen die Bedeutung einer präzisen, adaptiven Regelstrategie, wie sie im Schäfersee-Verfahren[®] erstmals umgesetzt wurde.

7.1 Verwertbarkeit und Ausblick

Das Schäfersee-Verfahren[®] wurde als dauerhaft einsetzbares, automatisiertes System zur Redoxstabilisierung urbaner Gewässer erfolgreich validiert. Die Anwendung ermöglicht eine gezielte Steuerung des Redoxmilieus, vermindert die Bildung reduktiver Gase und trägt zur Stabilisierung interner Stoffkreisläufe bei. Damit steht erstmals ein praxisgerechtes Verfahren zur Verfügung, das sich insbesondere für regenwasserbeeinflusste, städtische und eutrophierte Gewässer sowie für flache, stark organisch belastete Seen eignet.

Die erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage für eine weitergehende technische Umsetzung in der kommunalen Wasserwirtschaft. Vorgesehen ist die Übertragung des Verfahrens auf weitere Standorte, die ähnliche Belastungsbedingungen aufweisen. Aktuell werden Anschlussprojekte in Hannover, Braunschweig (Parkgewässer) und in NRW vorbereitet.

Im praktischen Gewässerschutz besteht ein deutlicher Bedarf an Lösungen für die Behandlung von Regenrückhalte- und Stadtgewässern, die regelmäßig unter Sauerstoffmangel und Geruchsbelastungen leiden. Das Schäfersee-Verfahren[®] bietet hier einen erprobten, ressourcenschonenden Ansatz, der mit vorhandener Infrastruktur kombinierbar ist. Die Projektergebnisse zeigen, dass sich auf dieser Grundlage neue Handlungsmöglichkeiten für Kommunen eröffnen, insbesondere dort, wo bislang keine wirtschaftlich tragfähigen Sanierungsverfahren existierten.

Langfristig besteht Potenzial für die Nutzung des Verfahrens in weiteren Gewässertypen wie Speicherbecken, Talsperren und Rückhalteanlagen. Durch die Kombination aus einfacher Technik, hohem Automatisierungsgrad und messdatenbasierter Steuerung bietet das Schäfersee-Verfahren[®] eine robuste und übertragbare Lösung zur nachhaltigen Verbesserung urbaner Gewässerqualität.

8 Zusammenfassung und Fazit

Das grundlegende Ziel des Projektes war die Stabilisierung empfindlicher, redoxsensitiver Gewässersysteme durch die gezielte Behandlung des Tiefenwasserkörpers. Im Mittelpunkt stand dabei nicht die klassische Nährstoffelimination, sondern die Wiederherstellung eines stabilen, oxidierenden Milieus im Hypolimnion – als Grundlage für alle weiteren biogeochemischen Prozesse.

Am Schäfersee konnte nachgewiesen werden, dass die Anwendung von Calciumnitrat keine nachteiligen Wirkungen auf das System hervorruft. Weder traten toxische Reaktionsprodukte noch Schwermetallanreicherungen auf; vielmehr zeigte sich, dass die Zugabe von Nitrat und die damit verbundene Sauerstoffbereitstellung reduktive, potenziell schädliche Prozesse vollständig unterbindet. Infolge der Oxidation von Ammonium und Sulfidverbindungen werden giftige Stoffe wie Schwefelwasserstoff eliminiert, während gleichzeitig durch nitrat- und sauerstoffabhängige Enzymsysteme (z. B. Monooxygenasen) der mikrobielle Abbau organischer Substanzen gefördert wird. Dadurch wird der natürliche Sedimentabbau reaktiviert und das Gesamtsystem langfristig stabilisiert. Besonders bemerkenswert ist die unerwartet langanhaltende Sauerstoffanreicherung im Tiefenwasser des Schäfersees, die über Zeiträume von bis zu neun Monaten beobachtet wurde – ein deutlicher Hinweis auf die nachhaltige Pufferung des Redoxpotenzials und die Wiederherstellung oxidativer Sedimentzonen. Ergänzende Untersuchungen im Grundwasser ergaben zu keiner Zeit erhöhte Nitratkonzentrationen, was die lokale Rückhaltwirkung und ökologische Sicherheit des Verfahrens bestätigt.

Im Verlauf des Projektes wurde die Anwendung des Schäfersee-Verfahrens® auf weitere Gewässertypen ausgedehnt. Am Jörne Meerke konnte gezeigt werden, dass auch ein stark geschichtetes Tiefengewässer durch gezielte, kleindosierte Nitratgaben innerhalb weniger Wochen von einem reduzierenden in ein oxidierendes Milieu überführt werden kann. Die mikrozyklische Dosierung führte dort zu einer kontinuierlichen Anhebung des Redoxpotenzials und zu einer deutlichen Abnahme von Ammonium im Tiefenwasser. Am Fennsee wurde dagegen ein flaches, polymiktisches System erfolgreich behandelt. Die flächige Dosierung über ein unterirdisches Rohrverteilungsnetz ermöglichte eine homogene Durchmischung und stabilisierte das Redoxniveau im gesamten Wasserkörper. Das System reagierte selbst auf Starkregenereignisse robust: kurzfristige Sauerstoffeinbrüche konnten durch gezielte Stoßdosierungen innerhalb weniger Tage ausgeglichen werden.

Die Veränderung des chemischen Milieus führte zwangsläufig zu einer Veränderung der Lebensbedingungen für Mikroorganismen und höhere Organismen. Durch die Wiederherstellung eines oxidierenden Hypolimnions entstanden Lebensräume, die zuvor dauerhaft anoxisch und damit lebensfeindlich waren. In den behandelten Gewässern wurden keine negativen Effekte auf Flora und Fauna festgestellt. Vielmehr ist davon auszugehen, dass sich die Biodiversität in Richtung einer stabileren, artenreicheren Gemeinschaft entwickelt. Erste Hinweise auf eine solche Milieuverschiebung ergeben sich aus mikrobiologischen Analysen, die eine Zunahme nitratatmender Bakterien und eine deutliche Abnahme methanogener Archaeen zeigen. Begleitend wurden keine relevanten Lachgasemissionen festgestellt; die Nitratdosierung

führte zu keiner messbaren Akkumulation von N_2O , was auf eine weitgehend vollständige Denitrifikation hinweist. Die deutliche Reduktion der Methanbildung im Sediment und die stark verminderten Emissionen an die Wasseroberfläche leisten zugleich einen messbaren Beitrag zur Minderung klimarelevanter Treibhausgase.

Neben der gezielten Stabilisierung des Redoxpotenzials und der Unterdrückung methanogener Prozesse zeigte sich im Projektverlauf ein weiterer, zunächst nicht erwarteter Effekt: Die veränderten chemischen Bedingungen führten zu einer deutlichen Abnahme der gelösten und mobilisierbaren Phosphoranteile. Diese Beobachtung stand zu Beginn des Projekts nicht im Fokus der Zielsetzung, erwies sich jedoch als wesentlicher Befund zur langfristigen Wirkung des Verfahrens. Die Stabilisierung des Redoxmilieus schuf Bedingungen, unter denen gelöster Phosphor im Sediment erneut gebunden werden konnte. Am Iröne Meerke belegten Inkubationsversuche der lanaplan GbR eine Umkehr der Flussrichtung: Aus einem Sediment, das zuvor als Phosphorquelle fungierte, wurde innerhalb weniger Wochen eine stabile Phosphorsenke. Diese Entwicklung wurde durch geochemisch-mineralogische Untersuchungen der TU Berlin deutlich belegt und verweist auf die Bildung von Eisen(II)-Phosphat (Vivianit) sowie calciumhaltigen Phosphatmineralen. Auch am Schäfersee zeigen Langzeitdaten einen rückläufigen Gesamtphosphorgehalt, was auf eine nachhaltige Bindung von Phosphor im Sediment schließen lässt. Damit ist belegt, dass die Redoxstabilisierung nicht nur zur Eliminierung reduktiver Prozesse führt, sondern auch indirekt die interne Phosphordynamik positiv beeinflusst.

Insgesamt zeigt sich, dass die kombinierte Dosierung von Nitrat und Sauerstoff zu einer umfassenden Stabilisierung des chemischen und biologischen Gleichgewichts in behandelten Gewässern führt. Das Schäfersee-Verfahren® bewirkt die Wiederherstellung oxidativer Bedingungen, den Abbau reduktiver Stoffe, die Aktivierung mikrobieller Abbauprozesse und die Eliminierung toxischer Verbindungen. Es wirkt damit sowohl als technische Sanierungsmaßnahme als auch als ökologische Regenerationsstrategie.

Für die zukünftige Entwicklung besteht Potenzial in der Etablierung dauerhaft sensorgestützter Anlagen, die auf Basis von Online-Daten (Redox, Nitrat, Sauerstoff) eine adaptive Regelung ermöglichen. Zudem sollten die langfristige Stabilität der mineralischen Phosphorbindung und die Auswirkungen auf die Biodiversität weiter untersucht werden. Darüber hinaus sollte die Quantifizierung der vermiedenen Methanemissionen in CO_2 -Äquivalente und die Bewertung potenzieller Lachgasflüsse Teil zukünftiger Untersuchungen sein, um die klimarelevanten Wirkungen des Verfahrens umfassend zu bilanzieren. Das Verfahren hat sich als skalierbares, ressourceneffizientes und umweltverträgliches Instrument zur Sanierung eutropher Gewässer erwiesen und kann zukünftig wesentlich zur Minderung interner Nährstofflasten und klimarelevanter Emissionen beitragen.

Literaturverzeichnis

- Aben, R. C. H., N. Barros, E. van Donk, T. Frenken, S. Hilt, G. Kazanjian, L. P. M. Lamers, E. T. H. M. Peeters, J. G. M. Roelofs, L. N. S. Domis, S. Stephan, M. Velthuis, D. B. V. de Waal, M. Wik, B. F. Thornton, J. Wilkinson, T. DelSontro und S. Kosten (2017). Cross-continental increase in methane ebullition under climate change. *Nature Communications* **8**, S. 1682.
- Carey, C. C. (2023). Causes and consequences of changing oxygen availability in lakes. *Inland Waters* **13**(3), S. 316–326.
- Dugener, N. M., A. D. Weinke, I. P. Stone und B. A. Biddanda (2023). Recurringly Hypoxic: Bottom Water Oxygen Depletion Is Linked to Temperature and Precipitation in a Great Lakes Estuary. *Hydrobiology* **2**(2), S. 410–430.
- Grossart, H.-P., K. Frindte, C. Dziallas, W. Eckert und K. W. Tang (2011). Microbial methane production in oxygenated water column of an oligotrophic lake. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **108**(49), S. 19657–19661.
- Hellweger, F. L., R. M. Martin, F. Eigemann, D. J. Smith, G. J. Dick und S. W. Wilhelm (2022). Models predict planned phosphorus load reduction will make Lake Erie more toxic. *Science* **376**(6596). Epub 2022 May 26, S. 1001–1005.
- Howarth, R. W. (2024). The greenhouse gas footprint of liquefied natural gas (LNG) exported from the United States. *Energy Science & Engineering*. Accepted 16 September 2024.
- Hupfer, M. und J. Lewandowski (2008). Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments - a long-lasting paradigm in limnology. *International Review of Hydrobiology* **93**(4-5), S. 415–432.
- Hupfer, M., B. Rube und P. Schmieder (1995). Origin and diagenesis of polyphosphate in lake sediments: a ³¹P-NMR study. *Limnology and Oceanography* **40**(4), S. 610–617.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kowalczevska-Madura, K., A. Kozak, A. Budzyńska, R. Dondajewska-Pielka, E. Osuch, S. Podsiadłowski und R. Gołdyn (2024). Effects of continuous nitrate treatment of hypolimnion in a small, hypereutrophic lake. *Chemosphere* **363**, S. 142815.
- LaBrie, R., M. Hupfer und M. P. Lau (2023). Anaerobic duration predicts biogeochemical consequences of oxygen depletion in lakes. *Limnology and Oceanography Letters* **8**(4), S. 666–674.
- Li, L., L. Wu, Y. Huang, Y. Li, C. Liu, J. Li und N. Li (2021). Assessment of Calcium Nitrate Addition on the AVS Removal, Phosphorus Locking, and Pb Release in Sediment. *Water, Air, & Soil Pollution* **232**(12).
- Li, W., S. Zhang, L. Zhang, X. Li, F. Wang, G. Li, J. Li und W. Li (2019). In-situ remediation of sediment by calcium nitrate combined with composite microorganisms under low-DO regulation. *Science of The Total Environment* **697**, S. 134109.
- Nürnberg, G. K. (1984). The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia. *Limnology and Oceanography* **29**(1), S. 111–124.
- Psenner, R., B. Boström, M. Dinka, K. Pettersson und R. Puckso (1988). Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Arch Hydrobiol Beih Ergeb Limnol* **30**, S. 98–103.
- Ripl, W. (1976). Biochemical Oxidation of Polluted Lake Sediment with Nitrate: A New Lake Restoration Method. *Ambio* **5**(3), S. 132–135.
- Sondergaard, M., J. Jensen und E. Jeppesen (2003). Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* **506-509**(1-3), S. 133–145.
- Tang, Y., M. Li, Y. Zou, M. Lv und J. Sun (2018). Mechanism of aerobic denitrifiers and calcium nitrate on urban river sediment remediation. *International Biodeterioration & Biodegradation* **126**, S. 119–130.

- Wang, P., C. Zhu, Y. Gao, Z. Cai, Y. ye und Y. Tao (2024). Sulfide-rich sediments remediation by slow-release calcium nitrate with low risk: Experiments in a continuous flow reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **12**.(3), S. 112960.
- Wen, X., V. Unger, G. Jurasinski, F. Koebsch, F. Horn, G. Rehder, T. Sachs, D. Zak, G. Lischeid, K.-H. Knorr, M. E. Böttcher, M. Winkel, P. L. E. Bodelier und S. Liebner (2018). Predominance of methanogens over methanotrophs in rewetted fens characterized by high methane emissions. *Biogeosciences* **15**.(21), S. 6519–6536.
- Xu, M., Q. Zhang, C. Xia, Y. Cui, H. Wang, Z. Zhu, L. Lin, Z. He, J. Zhou, H. Li und Y. Deng (2014). Elevated nitrate enriches microbial functional genes for potential bioremediation of complexly contaminated sediments. *The ISME Journal* **8**, S. 1932–1944.
- Yang, X., M. Zhong, J. Pu, C. Liu, H. Luo und M. Xu (2022). Risk control and assessment of sulfide-rich sediment remediation by controlled-release calcium nitrate. *Water Research* **226**, S. 119230.
- Zhang, S., A. Wang, L. Li, Z. Liang, K. Huang, Q. Ye, G. Deng, Y. Yang, P. Li, G. Yu und Y. Liang (2024). Phosphorus immobilization in sulfide-ferrous oxidation process driven by nitrate reduction during black-odorous sediment remediation. *Bioresource Technology* **407**, S. 131130.
- Zhang, Y., Z. Liang, P. Li, J. Lai, P. Kang, R. Huang, Y. Liang und G. Yu (2024). Piped-slow-release calcium nitrate dosing: A new approach to in-situ sediment odor control in rural areas. *Science of The Total Environment* **926**, S. 171993.
- Zhou, J., M. Zhang, M. Ji, Z. Wang, H. Hou, J. Zhang, X. Huang, A. Hursthouse und G. Qian (2020). Evaluation of heavy metals stability and phosphate mobility in the remediation of sediment by calcium nitrate. *Water Environment Research* **92**.(7), S. 1017–1026.