

Seenrestaurierung

Eine Übersicht über interne Maßnahmen
in stehenden Gewässern
zur Reduzierung der Nährstoffgehaltes
und zur Erhöhung des Sauerstoffgehaltes

Inhaltsverzeichnis

I Problemstellung eutropher Gewässer	2
I.1 Ursachen Probleme und Verminderung von Eutrophierung.....	2
II Verfahren zur Restaurierung von Seen	3
II.1 Seentherapie	3
II.2 Verfahren der Seenrestaurierung	3
II.2.1 Maßnahmen im Wasserkörper	4
II.2.2 Maßnahmen am Sediment.....	8
II.2.3 Eingriffe in die Biozönose	10
II.3 Seerestaurierung - Beispiele und Kosten.....	12
II.3.1 Tiefenwasserableitung (TWA).....	12
II.3.2 Externe Phosphor-Elimination	13
II.3.3 Zwangszirkulation oder Destratifikation	14
II.3.4 Chemische Phosphor- Fällung mit Tiefenwasserbelüftung	15
II.3.5 Tiefenwasserbelüftung	16
II.3.6 Entschlammung mit Sedimententnahme.....	17
II.3.7 Sedimentabdeckung	18
Fazit.....	19
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	20

I Problemstellung eutropher Gewässer

I.1 Ursachen Probleme und Verminderung von Eutrophierung¹

Gewässer können nach ihrem Trophiegrad eingeteilt werden. Der Trophiegrad ist ein Maß für die Primärproduktion, also für die Produktion von Biomasse, v.a. in Form von Algen (ein Teil dieser Algen sind Blaualgen, eigentlich Photosynthesebetreibende Cyanobakterien). Er wird durch die Konzentration an Phosphor beschrieben (Phosphor dient als Baustein für die DNS, die Zellmembran und andere Bausteine in Organismen). Je höher der Nährstoffgehalt eines Gewässers, desto mehr Biomasse wird produziert.

Unter Eutrophierung versteht man die Zunahme des Trophiegrades eines Gewässers. Ein eutrophes Gewässer besitzt eine Phosphorkonzentration von $>30 \mu\text{g/l}$ während der Frühjahrszirkulation (die einsetzt, wenn die Dichte des Wasser in den oberen Schichten durch Erwärmung höher wird).

Ursache der Eutrophierung sind Nährstoffeinträge, insbesondere die Phosphorfracht in ein Gewässer. Eutrophierung ist prinzipiell ein natürlicher Prozess, der bei jedem See in sehr langen Zeiträumen abläuft, durch den Eintrag von Sedimenten. Durch menschliches Zutun wird der Prozess jedoch in übernatürlicher Masse verstärkt und beschleunigt. Nährstoffe gelangen über Abwasser, phosphathaltige Waschmittel, landwirtschaftliche Düngemittel, die ins Grundwasser gelangen, Niederschlag sowie über Ausscheidungen von Badegästen und von in und auf dem See lebenden Tieren, wie z.B. Wasservögel, ins Gewässer.²

Folgen der Eutrophierung sind übermäßiges Wachstum von Algen („Algenblüte“). Manche Cyanobakterienstämme scheiden toxische Substanzen aus zur Hemmung von Konkurrenten, was bei Massenbildung auch giftig für andere Organismen). Durch die Zunahme des Phytoplanktons, den frei schwimmenden Algen, werden die Lichtverhältnisse im oberen Wasserkörper (Epilimnion) vermindert, wodurch Wasserpflanzen (Makrophyten) und davon abhängige Tiere zurückgedrängt werden. Die absterbenden Organismen aus den oberflächennahen Wasserschichten sinken in tiefere Bereiche (Hypolimnion) ab, wo sie durch sauerstoffatmende Organismen (z.B. Pilze, Bakterien), die sich stark vermehren, abgebaut werden. Dadurch kommt es insbesondere in unteren Wasserschichten zu starker Sauerstoffabnahme bis zu sauerstofffreien (anoxischen) Verhältnissen. Dieser sauerstofffreie Teil des Wasserkörpers, der in Abhängigkeit von Morphometrie und thermischer Schichtung einen Großteil des gesamten Seewasservolumens ausmachen kann, entfällt zwangsläufig als Lebensraum für alle auf Sauerstoff angewiesenen Lebewesen. Die sauerstofffreien Verhältnisse führen wiederum zu einem Milieu, durch das reduzierende chemische und mikrobielle Prozesse hervorgerufen werden. Unter reduzierenden Bedingungen kommt es zur Bildung von Methan, übel riechendem Schwefelwasserstoff und Ammonium, die in höheren Konzentrationen auch toxisch wirken. Der Grund des Gewässers verschlammte (Absterben von Mikroorganismen). In extremen Fällen wird der gesamte Wasserkörper eines Sees sauerstofffrei, was den Tod zahlreicher Lebewesen zur Folge hat und umgangssprachlich als "Umkippen eines Gewässers" bezeichnet wird.

Abgesehen von den ökologischen Problemen führt Eutrophierung zu einer reduzierten Badewasserqualität und zum Verlust des Wertes als Standort der Naherholung.

¹ vgl. LAMPERT/SOMMER, 1999, S. 410 ff., ergänzt aus <http://members.aol.com/naujokat/Dissertation.html>

² vgl. HUPFER/SCHARF, 2002, S. 3

II Verfahren zur Restaurierung von Seen

II.1 Seentherapie

Eutrophierung kann nur durch Verminderung des Nährstoff-, insbesondere des Phosphorgehaltes, im Gewässer vermindert werden. Verfahren zur Reduzierung der Eutrophierung nennt man Seentherapie.

Der Nährstoffgehalt kann entweder dadurch vermindert werden, indem externe Nährstoffquellen, also Quellen außerhalb des Sees reduziert werden (z.B. Abwasserbarrieren, Verbot der Verwendung von Düngemitteln im Einzugsbereich) dies nennt man **Seensanierung**.

Maßnahmen, die im See selbst den Nährstoffgehalt vermindern sollen, sind Verfahren, die im Wasserkörper, am Sediment oder in der tierischen und pflanzlichen Lebensgemeinschaft, der Biozönose, ansetzen und werden unter dem Begriff der **Seenrestaurierung** zusammengefasst.³

II.2 Verfahren der Seenrestaurierung

Maßnahmen im Wasserkörper	Maßnahmen am Sediment	Eingriffe in die Biozönose
Chemische Fällung	Entschlammung mit Sedimententnahme	Biomanipulation
Adsorption an Trägermaterialien	Entschlammung ohne Sedimententnahme	Förderung von Makrophyten
Tiefenwasserableitung	Sedimentkonditionierung	
Externe Phosphor-Elimination	Sedimentabdeckung	
Destratifikation		
Tiefenwasserbelüftung		

Tab.1 Übersicht der Verfahren zur Restaurierung von Seen⁴

³ vgl. HUPFER/SCHARF, 2002, S. 3

⁴ nach SPIEKER, 2002, S. 5

Grundlage der folgenden Verfahrensbeschreibungen sind die beiden Veröffentlichungen:

- J. SPIEKER: Technologie-Einsatz bei Seentherapien – Entwicklung, Stand, Perspektiven. In: Wasser & Boden, 54/9 (2002), S. 5-13
- M. HUPFER & B.W. SCHARF: Seentherapie - Interne Maßnahmen zur Verminderung der Phosphorkonzentration. In: Handbuch Angewandte Limnologie (2002), VI-2.1

II.2.1 Maßnahmen im Wasserkörper**II.2.1.1 Chemische Fällung/Adsorption im Gewässer**Verfahrensprinzip

Dem Wasserkörper werden Fällmittel zugegeben. Phosphorverbindungen werden durch Fällmittel adsorbiert und dadurch so schwer, dass sie zu Boden sinken und sedimentieren. Als Fällmittel werden vor allem Metallsalze (Aluminium, Eisen) und Calciumverbindungen eingesetzt. Durch gezielten Überschuss an Fällmittel soll die Bindekapazität des Sediments gegenüber Phosphor so erhöht werden, dass die Wirkung über den Zeitraum der Fällung hinausgeht.

Bei der Auswahl des geeigneten Fällmittels müssen die geochemischen Bedingungen im Wasserkörper und im Sediment berücksichtigt werden. Das Verfahren ist stark pH-abhängig.

Vorteile/Nachteile

Die Ausfällung führt zu einer unmittelbaren und sofortigen Verminderung des Phosphorgehaltes im See.

Bei Einsatz von Aluminium- oder Eisen-Salzen bilden sich zunächst Metall-Hydroxide, die mit Phosphat schwerlösliche Verbindungen eingehen, wobei H-Ionen frei werden und sich der pH-Wert vermindert.

Wird der pH-Wert zu gering, treten für tierische Organismen toxische Aluminium-Konzentrationen auf (Die H-Ionen im Wasserkörper verbinden sich mit den Hydroxid-Ionen des $\text{Al}(\text{OH})_3 \sim \text{PO}_4$, was dazu führt dass die Metall-Ionen wieder frei werden (vgl. Puffersysteme im Boden)), die dazu führen können, dass der Fraßdruck auf das Phytoplankton durch das Zooplankton (freischwimmende tierische Wasserorganismen) abnimmt und das Phytoplankton und somit die Eutrophierung zunimmt.

Die Zugabe von Calcium-Verbindungen führt zum pH-Anstieg, im Extremfall zu einem sog. Basen-Schock, der negative Wirkungen auf die Wasserfauna haben kann. Hohe pH-Werte im Wasserkörper vermindern außerdem die Bindungsfähigkeit von Phosphat durch Metall-OH.

Eine Kombination von Metallsalzen und Calciumverbindungen bietet die Möglichkeit auch in schwach gepufferten Gewässern Phosphor zu fällen.

II.2.1.2 Adsorption an Trägermaterialien

Verfahrensprinzip

Phosphat bindet an Granulate aus aktivierter Tonerde (Al_2O_3) mit künstlich vergrößerter Oberfläche oder sonstigen Phosphor-adsorbierenden Materialien, die auf Trägermaterialien, wie z.B. PU-Schaum aufgebracht werden. Diese Trägersysteme befinden sich entweder im Wasserkörper oder Wasser wird extern über die Trägermaterialien geleitet.

Vorteile/Nachteile

Im Gegensatz zum vorherigen Verfahren werden Phosphorverbindungen dabei nicht im Gewässer sedimentiert und es werden keine Stoffe zugeführt.

II.2.1.3 Tiefenwasserableitung

Verfahrensprinzip

Durch Absinken der Nährstoffpartikel und Rücklösungsprozesse aus dem Sediment reichert sich im Tiefenwasser (Hypolimnion) Phosphor an. Durch Ableitung des Tiefenwassers kommt es zur Abnahme des Nährstoffgehaltes im Gewässer. Voraussetzung ist ein stabil geschichteter See.

Vorteile/Nachteile

Die Tiefenwasserableitung führt auch zu einer Phosphorverarmung der oberen Sedimentschichten, was zu einer reduzierten Phosphorrücklösung aus dem Sediment führt.

Neben den Nährstoffen werden auch reduzierende Stoffe entfernt. Der Sauerstoffhaushalt wird durch Vermischungsprozesse und durch verminderte Konzentration reduzierender Stoffe verbessert.

Ein Problem stellt die Verbringung des dem See entnommenen Wassers dar, welches nährstoffreich, unter Umständen mit übel riechenden Substanzen belastet ist (z.B. H_2S).

Bei geringen Zuflussmengen kann es zum Absenken des Wasserspiegels kommen.

II.2.1.4 Externe Phosphor-Elimination

Verfahrensprinzip

Dem See wird Wasser entnommen, außerhalb des Sees wird Phosphor durch Fällung, Filtration oder Adsorption aus dem Wasser eliminiert. Anschließend wird das gereinigte Wasser dem Gewässer wieder zugeführt. Voraussetzung ist auch hier ein geschichteter See.

Vorteile/Nachteile

Im Gegensatz zur Tiefenwasserableitung kommt es nicht zur Wasserspiegelabsenkung. Ähnlich wie bei der Tiefenwasserableitung wird aber der Sauerstoffhaushalt im See verbessert (Entnahme reduzierender Substanzen, Durchmischungseffekte). Im Vergleich zur direkten Einbringung von Fällmitteln in das Gewässer kommen die Chemikalien nur mit einem kleinen Wasseranteil in Berührung. Die Risiken, die bei den Fällungsmethoden bestehen, sind daher geringer.

Bei hohen Ammoniumkonzentrationen des Tiefenwassers kam es vor, dass es nach Rückführung des phosphorarmen Wassers wegen reduzierter Pufferwirkung zum pH-Anstieg und zu toxischen Ammoniak-Konzentrationen kommt.

Der entstehende Anlagenschlamm muss unter Umständen deponiert werden.

II.2.1.5 Zwangszirkulation oder Destratifikation

Verfahrensprinzip

Die Zwangsdurchmischung des Sees erfolgt durch Einblasen von Druckluft. Dadurch wird die Schichtung zerstört und der gesamte Wasserkörper mit Sauerstoff angereichert. Ziel dieses Verfahrens ist es, für das Phytoplankton, also den frei schwimmenden Algen schlechtere Bedingungen zu schaffen, da Starklichtformen (z.B. Blaualgen) in tiefere Schichten und Schwachlichtformen (z.B. Kieselalgen) in höhere Schichten bewegt werden.

Da bei permanenter Zirkulation mit konstant werdenden Turbulenzbedingungen viele Algen in der Lage sind, sich den regelmäßig wechselnden Lichtbedingungen anzupassen, wird die Destratifikation auch intermittierend, also in unregelmäßigen Abständen, ausgesetzt und wieder hochgefahren.

Vorteile/Nachteile

Durch die Durchmischung kommt zur Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse. Die Vorhersagen, wie die Destratifikation auf das Phytoplankton wirkt, sind jedoch aufgrund der komplexen ökologischen Zusammenhänge in Seen sehr schwierig.

Die erzwungene Zirkulation führt zu einer Anreicherung von reduzierenden Stoffen und Abkühlung in den oberen Wasserschichten bzw. Erwärmung in den unteren Schichten. Dies kann zu problematischen Sauerstoffverhältnissen im oberen Bereich des Gewässers führen sowie zu ungünstigen Bedingungen für Fische, die nicht zu hohe Temperaturen aushalten. Außerdem können die Turbulenzen die Rücklösung von Phosphat aus dem Sediment fördern.

II.2.1.6 Tiefenwasserbelüftung

Verfahrensprinzip

Ziel bei der Tiefenwasserbelüftung ist die Vergrößerung des aeroben, also sauerstoffhaltigen Lebensraumes und damit eine Vergrößerung der Bereiche, in dem Tiere (Fische, Zooplankton – freischwimmende - und Zoobenthos – bodenlebende – Tiere leben können.

Reiner Sauerstoff oder Luft werden direkt über der Bodenoberfläche eingeblasen.

Die Tiefenwasserbelüftung kann bei Seen mit einer Tiefe ab ca. 10 Meter und einem geeignet großen Hypolimnion eingesetzt werden. Bei Tiefen größer als ca. 15 Meter ist reiner Sauerstoff vorzuziehen, da sich durch die Druckverhältnisse molekularer Stickstoff (aus der Druckluft) anreichern kann, was zur Schädigung von Fischen führt.

Vorteile/Nachteile

Durch die verbesserten Bedingungen für das Zooplankton erhöht sich der Fraßdruck auf das Phytoplankton, wodurch Algen vermindert werden. Bei der Tiefenwasserbelüftung wird die bestehende Schichtung des Wasserkörpers nicht zerstört.

Aerobe Bedingungen im Tiefenwasser verringern die Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment, wie es bei reduzierten Verhältnissen der Fall ist. Phosphat wird im Sediment gebunden, wenn es gelingt, in der obersten Schicht oxidierende Verhältnisse zu erreichen.

Der Abbau von organischem Material im Tiefenwasser wie Faulschlamm wird intensiviert.

Die Temperaturen in tieferen Schichten bleiben erhalten, was die Voraussetzung für das Überleben kaltstenothermer Fische (also Fische, die nicht zu hohe Temperaturen aushalten) ist.

Der Erfolg des Verfahrens ist sehr stark abhängig von den geochemischen Verhältnissen und den Reaktionen, die durch den hohen bzw. nach Abschalten der Anlage wieder niedrigeren Sauerstoffgehalt hervorgerufen werden, abhängig von z.B. Eisen und anderen Gehalten in Sediment und Wasserkörper. Langfristig kann das anaerobe Bindungspotenzial der tieferen Sedimentschichten für den Phosphor-Rückhalt auch von großer Bedeutung sein. Diese Schichten werden durch die Belüftung jedoch kaum beeinflusst.

II.2.2 Maßnahmen am Sediment

II.2.2.1 Entschlammung mit Sedimententnahme

Verfahrensprinzip

In den oberen Sedimentschichten eutropher Seen ist die Akkumulation von Phosphor oft sehr groß. Mit der Absaugung von Sediment soll die Ursache der internen Phosphor-Belastung durch Resuspendierung vermindert werden.

Vorteile/Nachteile

Durch die Entfernung der obersten Sedimentschicht werden auch reduzierte (z.B. H₂S) und organische Substanzen aus dem Wasserkörper entnommen, was den Sauerstoffhaushalt im Wasserkörper positiv beeinflusst.

Durch das Freilegen von phosphorärmeren Altsedimenten erhöht sich möglicherweise die Bindungskapazität für Phosphor im Sediment, es können aber auch Phosphor-Freisetzung-Mechanismen in Gang gesetzt werden (z.B. aus phosphorreicher Altsediment oder an Eisen gebundenes Phosphat kann resuspendieren).

Für die Trocknung und Deponierung des Sedimentes müssen geeignete Flächen bereitgestellt werden, falls das Material nicht als Dünger in der Landwirtschaft verwendet werden kann. Oft ist dies mit Geruchsbelästigungen verbunden.

Durch Aufwirbelungen organischer, reduzierter Partikel kann es zu Belastungen des Sauerstoffhaushaltes und Trübungserscheinungen auch in höheren Schichten kommen.

Durch die Sedimententnahme kann es zur Zerstörung der Selbstabdichtung des Gewässers gegenüber dem Grundwasser kommen, was eine Nährstoffbelastung aus dem Grundwasser ermöglichen kann.

Positive Einflüsse des Sedimentes z.B. in der pH-Stabilisierung können beeinträchtigt werden. Die Fauna der Weichsedimente wird vernichtet.

II.2.2.2 Entschlammung ohne Sedimententnahme

Verfahrensprinzip

Bei der Entschlammung ohne Sedimententnahme wird das Sediment im Gewässer dadurch behandelt, indem es durchgepflügt und aufgewirbelt wird. Ziel dieser Maßnahme ist eine Entgasung und damit Kompaktierung des Sedimentes sowie die Förderung der Mineralisierung des organischen Materials.

Vorteile/Nachteile

Durch die in Gang gesetzten Wasserbewegungen kommt es zu Sauerstoffzufuhr in tieferen Schichten, was zu einem verstärkten Abbau organischer Substanzen führt. Allerdings ist dieser Effekt oft nur von kurzer Dauer und es stellen sich relativ schnell wieder sauerstofffreie Verhältnisse ein.

Der Eingriff ohne Sedimententnahme stellt einen weitaus schonenderen Eingriff in das lebende Sediment als die Sedimententnahme dar. Es kann allerdings zur Phosphor-Freisetzung aus dem Sediment kommen, welche durch eine gekoppelte Fällung aber gebunden werden können.

II.2.2.3 Sedimentkonditionierung

Verfahrensprinzip

Bei dieser Maßnahme wird Nitrat statt Sauerstoff als Oxidationsmittel in das Sediment bzw. in den Wasserkörper eingebracht, um Phosphor und andere Substanzen im Sediment zu oxidieren. Dadurch sollen die redoxgesteuerte Phosphor-Freisetzung aus dem Sediment ins Wasser verhindert werden, indem Phosphor als Phosphat an gleichzeitig in den Wasserkörper hinzu gegebenes Fällmittel (v.a. Eisen) gebunden wird. Außerdem sollen Denitrifikationsprozesse stimuliert werden, indem organische Substanzen durch Nitrat-beratmende Bakterien (z.B. Thiobacillus denitrificans) abgebaut werden ($5 \text{ CH}_2\text{O} + 4 \text{ NO}_3^- \rightarrow 5 \text{ CO}_2 + 2 \text{ N}_2 + 3 \text{ H}_2\text{O} + 4 \text{ OH}^-$).

Verfahren, bei denen andere Mittel als Nitrat, z.B. Tonminerale (Si- und Al-Oxide), zum Einsatz kommen sind momentan in der Entwicklung.

Ähnlich wie bei der Sauerstoffzufuhr muss eine kontinuierliche Zugabe von Nitrat über einen angemessenen Zeitraum gewährleistet sein.

Vorteile/Nachteile

Nitrat ist gegenüber Sauerstoff stärker löslich in Wasser und dringt normalerweise (durch höhere Diffusionsgeschwindigkeiten) tiefer in das Sediment ein. Aber bei den komplexen geochemischen Verhältnissen im Wasserkörper und im Sediment von Seen ist eine Vorhersage der realen Auswirkungen der Nitrat- und gekoppelten Fällmittelzugaben und Dosierungen nur sehr schwierig möglich.

Ein Nachteil dieser Methode ist die mögliche Mobilisierung organisch gebundenen Phosphors sowie die Mobilisierung eisen gebundenen Phosphors durch vermehrte Denitrifikanten, die dreiwertiges Eisen veratmen, nachdem Nitrat verbraucht ist.

Vorteile sind die Oxidation reduzierter Substanzen wie H_2S und die Verhinderung von unerwünschten N-fixierenden Cyanobakterien durch ein erhöhtes N-P-Verhältnis.

II.2.2.4 Sedimentabdeckung

Verfahrensprinzip

Durch eine Sedimentabdeckung soll eine Barriere gegen den Transport (Ausgasung, Bioturbation - Umschichtung der obersten Sedimentschichten durch Organismen, Resuspension) von Nähr- und Schadstoffen aus dem Sediment in den Wasserkörper geschaffen werden. Beim Abdeckmaterial wird zwischen physikalischen und chemischen Barrieren unterschieden.

Als physikalische Abdeckungen werden Kunststoffolien aus Polyethylen, Polyvinylchlorid und Polypropylen oder mineralische Substanzen (Aschen, Sande, Schluffe) eingesetzt.

Als aktive Barriersysteme werden Fällmittel (Calcite (CaCO_3), Zeolithe (mit Wasser gebundene (hydratisierte) Aluminium- und Siliciumoxide und Tonminerale) als Kationentauscher mit großer Oberfläche) im stöchiometrischen Überschuss über das Sediment dem Wasserkörper zugegeben.

Für die aktiven Barriersysteme gelten die gleichen Anforderungen wie bei den besprochenen Fällmitteln. Bei den mineralischen Abdeckmaterialien bestimmen Faktoren wie Porendichte, Lagerungsdichte und Absetzbarkeit die Wirksamkeit. Entscheidend ist eine gleichmäßige Verteilung des Materials auf dem Sedimentkörper.

Das spezifische Gewicht des Abdeckmaterials darf nur geringfügig höher sein als das Sediment, da es sonst zu einer zu starken Kompaktierung des Sedimentes kommt und das phosphorreiche Porenwasser in den Wasserkörper gepresst wird.

Vorteile/Nachteile

Folien können nur bei kleinen Seen eingesetzt werden. Mineralische Substanzen können wegen ihres Gewichtes zu tief in das Sediment einsinken. Aschen enthalten teilweise Schwermetalle.

Bestimmt vor allem die laufend neu gebildete Sedimentschicht den internen Phosphor-Kreislauf, so ist mit einem relativ schnellen Rückgang der Wirksamkeit von Abdeckmaterialien zu rechnen.

Nach momentanen Erkenntnissen ist die Wirksamkeit von Physikalischen Barriersystemen als gering einzustufen

II.2.3 Eingriffe in die Biozönose

Bei Eingriffen in die Biozönose werden Organismen in den Wasserkörper eingesetzt oder daraus entnommen. Diese Eingriffe führen zu einer gezielten Verschiebung der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft im See.

II.2.3.1 Fischbiozönose

Verfahrensprinzip

Bei diesem als Biomanipulation bezeichneten Verfahren wird das Verhältnis von Fried- und Raubfischen zugunsten der Räuber (z.B. Barsch, Aal) verschoben. Dadurch wird die Zahl der Friedfische (z.B. Karpfen) reduziert, was wiederum den Fraßdruck auf das Zooplankton (z.B. Daphnien = Wasserfloh = Kleinkrebs) vermindert und deren Zahl erhöht. Dies führt zu einem verstärkten Fraßdruck auf das Phytoplankton, was zu einer verminderten Eutrophierung und zu einer Erhöhung der Sichttiefe führen kann.

II.2.3.2 Makrophyten

Verfahrensprinzip

Makrophyten sind höhere Wasserpflanzen. Wasserpflanzen stehen in Konkurrenz mit Algen um die Nährstoffe im See. Ein durch Makrophyten dominierter See weist meistens hohe Sichttiefen und geringe Konzentrationen an Phosphor auf. Um den See in den makrophytendominierten Zustand zu versetzen, werden gezielt Wasserpflanzen angesiedelt. Werden Uferbereiche mit Röhrichten (z.B. Schilf) besiedelt, stellen diese Bereiche Akkumulationszonen für Nährstoffe und organische Stoffe dar, die dem Wasserkörper nicht mehr zur Verfügung stehen und dadurch als Senken eutrophierungsrelevanter Substanzen wirken können.

Vorteile/Nachteile

Mit Wasserpflanzen bewachsene Ufer stellen Lebensräume für viele Tierarten dar. Die Pflanzen müssen jedoch an den Standort passen. Es sollten keine nicht einheimischen, sich evtl. zu stark ausbreitende Wasserpflanzen eingesetzt werden.

II.3 Seerestaurierung - Beispiele und Kosten

Die Kosten der einzelnen Sanierungsbeispiele sind als Anhaltspunkte für den betreffenden See zu verstehen. Je nach verwendeten Methoden, limnologischen Gegebenheiten, Seegröße usw. können diese stark variieren und können deshalb nicht auf den Flückiger See bezogen werden. Ebenso stehen die angeführten Beispiele in keinem Zusammenhang zu möglichen Restaurierungsmethoden des Flückigersees sondern sollen lediglich eine Auswahl angewandter Verfahren wiedergeben.

II.3.1 Tiefenwasserableitung (TWA)

Eine TWA eignet sich, um bei schon begonnenen externen Lastsenkungen eine Beschleunigung der Therapie zu erreichen. Die Effizienz vermindert sich mit der Einsatzdauer, da eine Verarmung an mobilem Phosphor stattfindet und weniger organisches Material sedimentiert wird.

Technisch realisiert wird dieser Vorgang anhand des „Olszewski-Rohrs“ oder durch einen Grundablass in Talsperren oder anderen künstlichen Gewässern. Die Ableitung des Wassers wird durch Heberleitungen oder Gefälledruckleitungen ermöglicht. Bei höher liegendem Auslass oder anderen Nutzungen des Wassers sind Pumpstationen notwendig.

Beispiel

Meerfelder Maar, Eifel
 Fläche: 0,25 km²
 Mittlere Tiefe: 9m
 Maximale Tiefe: 17m

Nutzung als Angel- und Badesee, erhöhte Nährstoffzufuhr durch Düngemittel.

Ab 1950 Verminderung der externen Belastung, 1981-83 Einrichtung einer Pufferzone zwischen See und landwirtschaftlichen Nutzflächen. 1982 Installation einer TWA mit einer Wasserförderung des Olszewski-Rohres (30 cm Durchmesser) von 13 l/sec.

Nach 3 Jahren trat eine deutliche Verminderung der Trophie auf (Gesamt-Phosphor (TP) - Konzentrationen sanken und blieben auch nach 10 Jahren noch niedrig, Zunahme der Diversität des Phytoplanktons, Zunahme der jährlichen Sichttiefe. Ab 1986 erstmals wieder submerse Makrophyten – höhere Wasserpflanzen, die ständig unter Wasser leben)

Der See hat vermutlich ein Trophieniveau erreicht, welches seinem potentiell natürlichen Niveau entspricht.

Kosten

Keine genauen Angaben für das Meerfelder Maar verfügbar. Bisher installierte TWA- Anlagen bewegen sich bei den Investitionskosten im Bereich € 10.000 bis € 150.000.

II.3.2 Externe Phosphor-Elimination

Die externe Phosphor-Elimination kann mit wenig Aufwand am Ufer als dauerhafte, ortsfeste oder als transportable Anlage realisiert werden. Die notwendigen Chemikalien (Fällmittel) werden bedarfsabhängig zugegeben werden, was eine Überwachung der Wasserbeschaffenheit erfordert.

Im Vergleich mit der TWA besteht hier eine größere Steuerbarkeit der Eliminationsleistung. Die Anlagen lassen sich relativ gut in die Landschaft einpassen, und erfordern nur einen geringen Wartungsaufwand und können durch Nutzung der Photovoltaik auch sehr energieeffizient betrieben werden (vgl. energieautarke Anlage PELIKAN auf dem Waidsee in Weinheim⁵).

Bekannt geworden ist die Anlage am Beispiel PELICON (Phosphat Eliminations Container), die nach dem Verfahren der Trinkwasseraufbereitung funktioniert: durch chemische Fällung und Flockenbildung durch Metallsalze sowie durch Flotation zur Abtrennung der Flocken aus dem Wasserstrom. Die Elimination erfolgt in mehreren Teilschritten, indem das geförderte Wasser hintereinander geschaltete Reaktionskammern durchfließt.

Die Anlage ist in einem 6,1 x 2,5 m großen Container untergebracht und schafft 35-50m³ Wasser pro Stunde zu reinigen. Mit Ausnahme der Frostperiode kann die Anlage ganzjährig betrieben werden.

Beispiel

Sommerbad Farmsen bei Hamburg
Fläche: 0,017 km²
Maximale Tiefe: 8m

Der See ist eine ehemalige Tongrube, zu- und abflusslos, und wird seit über 20 Jahren als Bade- und Angelgewässer genutzt. Während des intermittierenden Betriebs 1995 wurden 11.000 m³ Wasser aufbereitet, was zu einer Entfernung von 2,8kg TP führte. Eine P-Entlastung war im Untersuchungszeitraum noch nicht nachzuweisen, die Untersuchung war jedoch nur auf ein Jahr begrenzt, was die Aussagekraft dieses Ergebnisses stark einschränkt. Ähnliche Anlagen in anderen Seen konnten den Phosphorgehalt erfolgreich vermindern (vgl. Kleinen Seddiner See in Brandenburg⁶).

Kosten

Die Investitionskosten der Anlage liegen bei € 150.000.

Pro m³ geförderten Wassers werden ca. 0,15kWh benötigt, so setzen sich die jährlichen Betriebskosten aus Strom und Fällmittel von € 15.000 bis €29.000 sowie aus den Kosten für Wartung und Betreuung aus € 10.000 bis €15.000 zusammen.

⁵ vgl. Workshop-Dokumentation „Wenn der Baggersee krank ist...“ am 29.06.02 in Freiburg

⁶ vgl. Workshop-Dokumentation „Seentherapie“ vom 18.-20.03.02 in Berlin

II.3.3 Zwangszirkulation oder Destratifikation

Es entsteht eine künstliche stark nach oben gerichtete Strömung des Wasser-Luft-Gemisches, die durch das Einblasen von Druckluft erzeugt wird. Die Luftverteilungseinrichtungen werden in ausreichendem Abstand vom Sediment verlegt. In einer Landstation wird mit Kompressoren die nötige Druckluft erzeugt. Durch Trageseilkonstruktionen werden die Düsen- und Luftzuführungsleitungen im Wasserkörper gehalten.

Beispiel

Schliersee, Bayrische Alpen
Fläche: 2,22 km²
Mittlere Tiefe: 23,9m
Maximale Tiefe: 40,5m

Seit den 50er Jahren deutliche Anzeichen einer zunehmenden Eutrophierung, ab den 60er Jahren Maßnahmen zur Abwasserfernhaltung. Obwohl seit den 80er die Lastreduzierung in den geringeren TP- Konzentrationen zu erkennen war, weist der See weiterhin Sauerstoffschwund im Tiefenwasser auf, der auf eine unvollständige Durchmischung des Gewässers im Frühjahr und Herbst vermuten lässt.

Seit Ende 1982 wird die natürliche Zirkulation mit einer Zwangszirkulationsanlage unterstützt (von Oktober bis Dezember und von April bis Mai wird der gesamte See innerhalb von drei bis vier Tagen durchmischt). Seit Beginn der Maßnahme hat sich der Sauerstoffhaushalt verbessert.

Kosten

Die Installationskosten lagen bei € 165.000. Die Betriebskosten betragen € 20.000 pro Jahr.

II.3.4 Chemische Phosphor- Fällung mit Tiefenwasserbelüftung

Die Einsatzmengen der Metallsulfate berechnen sich vor allem unter Beachtung der Säureneutralisationskapazität des Seewassers. Ein günstiger Zeitpunkt für die chemische Fällung ist unmittelbar nach dem eventuellen Eisaufruch. Aluminiumsalze haben den Vorteil gegenüber Eisensalzen, dass die gefällten Phosphate irreversibel in anaeroben Sedimentschichten gebunden werden.

Beispiel

Groß- Glienicker See, Berlin
Fläche: 0,67 m²
Mittlere Tiefe: 6,5m
Maximale Tiefe: 10,8m

Nutzung zur Naherholung, Baden, Angeln. Starke Eutrophierung in den 80er Jahren mit H₂S-Geruch und Fischsterben. Ab 1990 Fernhalten von ungeklärten Abwässern und 1992 bis 93 Durchführung einer Eisenbehandlung mit gleichzeitiger Inbetriebnahme von vier hypolimnischen Belüftungsanlagen.

Ab 1998 dann keine Belüftung mehr notwendig. Die trophischen Parameter zeigen eine nachhaltige Verbesserung der Wasserqualität an. Die jährliche mittlere Sichttiefe nahm von 1,7m auf 3m zu. Die Langzeitwirkung erklärt sich vor allem durch die Unterbindung externer P- Einträge.

Kosten

Die Eisenbehandlung kostete € 1,1 Mio , dazu kommen Investitionskosten für die Tiefenwasserbelüftung von ca. € 0,6 Mio. Zusätzlich ca. € 50.000 als jährliche Betriebskosten.

II.3.5 Tiefenwasserbelüftung

Für die Realisierung gibt es viele technische Lösungen. Das Tiefenwasser kann außerhalb des Sees mit Sauerstoff angereichert werden und wieder dem See zugeführt werden (RISTELOX- System).

Eine weitere Möglichkeit stellen auf dem See schwimmende Geräte dar. Diese fördern das hypolimnische Wasser in Richtung Seeoberfläche und mischen gleichzeitig Luft aus der Atmosphäre dazu. Das angereicherte Wasser wird über ein Fallrohr luftblasenfrei in das Hypolimnion zurückgeleitet. Beim TIBEAN – Verfahren fließt das aus dem Hypolimnion angesaugte Wasser durch einen Injektor und saugt nach dem Prinzip der Wasserstrahlpumpe Luft an.

Beim LIMNO – Gerät erfolgt der Transport des Tiefenwassers mittels Druckluft aus Kompressoren.

Beispiel

Sempachersee, Zentralschweiz
Fläche: 14,4 km²
Mittlere Tiefe: 44m
Maximale Tiefe: 87m

Die P-Konzentration hat sich von 1954 bis 1983 etwa verzehnfacht, ab den 70er Jahren nahm die Algenproduktion erheblich zu. Seit 1984 wird der See künstlich mit Sauerstoff versorgt. Während der Wintermonate (November bis April) wird durch die eingebrachte Druckluft eine Zwangszirkulation herbeigeführt. In den Sommermonaten (Mai bis Oktober) werden feinblasig 3t reinen Sauerstoffs pro Tag in das Hypolimnion eingebracht, ohne die natürliche Schichtung zu stören.

Mit Beginn der internen Maßnahmen hat sich die Sauerstoffsituation im Tiefenwasser des Sees deutlich gebessert. Nach mehr als 15jähriger Erfahrung zeigt sich, dass es möglich ist, durch technische Maßnahmen das Tiefenwasser ganzjährig aerob zu halten.

Kosten

Die Investitionskosten betragen im Jahr 1984 ca. € 1,5Mio und die jährlichen Betriebskosten belaufen sich auf ca. €250.000.

II.3.6 Entschlammung mit Sedimententnahme

Für die mechanische Entfernung von Sedimenten werden verschiedenen Verfahren eingesetzt.

Bei der Saugspülung wird mit einem Saugrüssel und einer Kreiselpumpe der angesaugte, dünnflüssige Schlamm über Rohrleitungen zu einem Spülfeld oder einer Entwässerungseinrichtung transportiert. Für die Spülfelder wird Platz benötigt, um die Sedimentmengen trocknen zu können. Bei mechanischen Entwässerungseinrichtungen erfolgt die Trocknung mittels Pressen oder Zentrifugen.

Die Nassbaggerung wird mit Kettenbaggern oder Greifern, die auf einem Ponton oder Schiff montiert sind, realisiert. Die dünneflüssige Faulschlammschicht wird damit nicht gut erfasst.

Beispiel

Plötzensee, Berlin
Fläche: 0,77 km²
Mittlere Tiefe: 2,9m
Maximale Tiefe: 6,2m

Natürliches Gewässer ohne oberirdischen Zu- und Abfluss, Nutzung als Bade- und Angelgewässer. 1997/98 Teilentschlammung mit anschließender externer Aufbereitung des Wassers. 60.000 m³ Sediment wurden ausgebagert, weideraufbereitet und in Kompostwerken und Deponien wiederverwendet.

Die Wirkung blieb unerwartet gering. Vermutlich wurden nur Zwischenschichten entfernt, anstatt die jüngsten Sedimente zu entfernen, die in direktem Austausch mit dem Tiefenwasser stehen.

Kosten

Die Kosten bei einer mechanischen Entschlammung von Seen können stark schwanken. Pro m³ Sedimententfernung entstehen Kosten zwischen € 30 und € 150. Beim Plötzensee betragen die Kosten der Entschlammung insgesamt €1,8 Mio. Wegen der hohen Kosten ist diese Methode für flache und kleinere Gewässer geeigneter.

II.3.7 Sedimentabdeckung

Die Einbringung des Abdeckmaterials kann an der Wasseroberfläche oder in Sedimentnähe erfolgen. Wie beim Einsatz von Fällmitteln wird es z.B. vom Boot aus oder über schwimmenden Sprühleitungen verteilt. Auch können Altsedimente mit einem Spülbohrverfahren gefördert werden, um damit die jüngeren Sedimente abzudecken.

Beispiel

Arendsee, Sachsen- Anhalt
Fläche: 5,13 km²
Mittlere Tiefe: 4,9m
Maximale Tiefe: 29m

Steigende Nährstoffeinträge ab Mitte des 20.Jh. führten zu einer starken Eutrophierung

Seit 1970 wird das Abwasser zentral erfasst und aufbereitet, 1976 eine Tiefenwasserableitung installiert.

Im Herbst 1995 wird eine Seekreideaufspülung durchgeführt, die eine Fällung des Phosphors im Wasserkörper mit sich zieht und der interne P-Kreislauf soll durch die „Versiegelung“ am Sediment unterbrochen werden. Über zwei Monate lang wurde mit einem Saugspülbagger aus dem Litoral im Nordteil des Sees Seekreide gefördert und mittels Rohrleitungen über der Seeoberfläche verteilt.

Noch keine Auswirkungen bekannt, man geht davon aus, dass die Phosphorrücklösung um bis zu 97% reduziert werden kann.

Kosten

Die Kosten für die Sedimentabdeckung setzen sich aus Voruntersuchung, dem Materialbedarf, den Transportkosten und der Ausbringtechnik zusammen. Die Kosten für das naturnahe Kreideverfahren des Arendsees (ohne Vor- und Begleituntersuchungen) betragen € 300.000.

Fazit

Seeinterne Restaurierungsmaßnahmen sind sinnvoll zur Unterstützung nur langsam wirkender externer Sanierungsmaßnahmen. Restaurierungsmaßnahmen sind langfristig jedoch nur erfolgreich, wenn die externen Maßnahmen zur Bekämpfung der Ursachen der Verhältnisse im See aufrechterhalten bleiben.

Der Erfolg der Restaurierungsmaßnahmen ist abhängig von den geochemischen und ökologischen Verhältnissen im See, im Sediment und im näheren Umfeld des Sees. Es ist daher eine absolute Voraussetzung, den See vorher fundiert und ausgiebig zu untersuchen, wie dies im Falle des Flückigersees durch das Limnologische Büro Höhn in Zusammenarbeit mit Mitgliedern des Bürgerforums geschehen ist.

Diese Untersuchungen stellen die Basis zur Entscheidung dar, welche Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen für ein bestimmtes Gewässer in Frage kommen und einen möglichst großen und langfristigen Erfolg versprechen.

Trotzdem bleiben bei einem derartig komplizierten ökologischen System wie es in einem See dieser Größe besteht Unsicherheitsfaktoren. Begleitende Untersuchungen während der Durchführung der Maßnahmen und für die Erfolgskontrolle sind daher ebenso unverzichtbar.

Neben den ökologisch-technischen Gegebenheiten müssen bei Eingriffen an einem See unterschiedlichster Nutzungsinteressen, auch soziale und ökonomische Aspekte, berücksichtigt werden. Da die Seerestaurierung die Verhältnisse am Gewässer nachhaltig verändern kann, sollte die zur Durchführung kommende Maßnahme von den Vertretern der einzelnen Nutzergemeinschaften des Sees im Konsens getragen werden. Ein Weg, dieses Ziel zu erreichen besteht in der Beteiligung der jeweiligen Nutzer und Anwohner des Sees an der Entscheidungsfindung, im Rahmen eines Prozesses der Lokalen Agenda 21.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- SPIEKER, J.: Technologie-Einsatz bei Seentherapien – Entwicklung, Stand, Perspektiven. In: Wasser & Boden, 54/9 (2002), S. 5-13
- HUPFER, M. & SCHARF, B.W.: Seentherapie: Interne Maßnahmen zur Verminderung der Phosphorkonzentration. In: Handbuch Angewandte Limnologie (2002), VI-2.1
- Lampert, W. & Sommer, U.: Limnoökologie. Stuttgart 1999