

Limnologie von Bergbauseen der Lausitz – Besiedlung und Bewertung ¹

Von BRIGITTE NIXDORF, KLAUS VAN DE WEYER und DIETER LEßMANN

Zusammenfassung

Tagebaugewässer der Lausitz bilden eine künstlich erschaffene Seenlandschaft, die vielfältige Chancen, aber auch Risiken der Nutzung für Freizeit und Erholung, Fischerei, Wasserspeicherung und -versorgung sowie Hochwasserschutz und Naturschutz, bieten. Tagebauseen sind wegen ihres guten Phosphorbindungsvermögens meist nährstoffarme, klare Gewässer. Mehr als 50 % der kürzlich bewerteten Seen erreicht das gute ökologische Potential wie von der EU-Wasserrahmenlinie verlangt. Die Hälfte der Tagebauseen im Lausitzer Revier ist versauert und unterscheidet sich damit in grundlegenden chemischen Gewässermerkmalen von natürlichen Seen Mitteleuropas. Das betrifft im Wesentlichen die hohe Leitfähigkeit bei pH-Werten zwischen 2 und 4 und die Pufferung durch Eisen bzw. Aluminium. Darüber hinaus bilden die anthropogenen Eingriffe bei der morphometrischen Ausbildung von Lebensräumen eingeschränkte Rahmenbedingungen für die Ausprägung von Lebensgemeinschaften. Die Ressourcenbereitstellung für die Primärproduzenten gestaltet sich insbesondere für die CO₂-Versorgung in räumlich und zeitlich untypischen Mustern. Alle bisher untersuchten Gewässer sind besiedelt, wobei die Artenvielfalt mit abnehmender Azidität steigt. Beispiele der pflanzlichen Besiedlung durch Phytoplankton und Makrophyten werden aufgezeigt. Die Nahrungsketten in Tagebauseen sind in Abhängigkeit vom Säuregrad unterschiedlich komplex strukturiert. Fische, Mollusken und Crustaceen fehlen in extrem sauren Seen. Für die Leitbildentwicklung kann weder auf historische noch auf aktuelle Referenzgewässer zurückgegriffen werden. Als Kompromiss werden Nutzungs- und Lebensraumfunktionen neben Grundmotiven für die Entwicklung naturnaher Bereiche (Naturnähe, freie Entwicklung) in die Leitbildfindung integriert. An den spezifischen Leitbildern werden Ziele und der Eingriffsbedarf für Tagebauseen aufgezeigt.

Abstract

Limnology of mining lakes in Lusatia – colonization and assessment

Mining lakes in Lusatia form artificial landscapes that provide diverse opportunities, but also risks, for recreation, fisheries, water storage and supply, as well as flood control and nature protection. Owing to the high phosphorus-binding capacity of the sediment, these lakes are mostly nutrient poor and clear. More than half of the recently assessed mining lakes reach the good ecological potential required by the EU Water Framework Directive. Half of the mining lakes in Lusatia are acidic and differ from natural lakes in Central Europe in basic chemical parameters, in particular their high conductivity, pH values between 2 and 4, and chemical buffering by iron and aluminium. Furthermore, the formation of biocenoses is inhibited by anthropogenic

¹ Erweiterter Vortrag zur 23. Jahrestagung 2013 „Bergbau in der Lausitz - Eingriffe und Landschaftsentwicklungen“

interference in the development of habitats. Planktonic primary productivity is restricted by the limited availability of carbon dioxide, resulting in untypical seasonal and spatial patterns. All mining lakes investigated have been colonized to some extent, with species diversity increasing with decreasing acidity. Examples of colonization by phytoplankton and macrophytes are provided. The complexity of food chains in mining lakes depends on their acidity. There are no fish, molluscs or crustaceans in extremely acidic lakes. In contrast to natural lakes, no historical or existing lakes are available as reference examples for the development of general ecological concepts for mining lakes. We recommend compromise when developing such concepts, that is the integration of land utilization and habitat functions with basic principles for the development of near-natural areas. We relate aims and requirements of interventions to specific concepts for the development of mining lakes.

Keywords: Mining lakes, colonization, plankton, food webs, acidification.

1 Neue Seenlandschaften in Deutschland – Besonderheiten und Risiken saurer Seen

In Deutschland existieren mehr als 500 Tagebauseen, von denen 230 in ihrem Entwicklungsstatus dokumentiert wurden (NIXDORF et al. 2001, 2016). Die großen Tagebauseen sind dabei, die Gewässerlandschaft Deutschlands stark zu verändern, wie aus der Abb. 1 deutlich wird. Die Landschaften der Lausitz und Mitteldeutschlands sind in besonderem Maße

von diesen Veränderungen betroffen, weil in diesen ehemals seenarmen Gebieten nach 1990 eine drastische Reduzierung des Braunkohleabbaus einsetzte. Die nach der Abaggerung verbleibenden Hohlräume wurden und werden in den meisten Fällen mit Wasser gefüllt bzw. entwickeln sich durch den Grundwasserwiederanstieg selbständig zu Seen. Die Entstehung neuer Seen in den ehemaligen Lausitzer und Mitteldeutschen Braunkohlerevieren ist die markanteste Veränderung in der deutschen Gewässerlandschaft in den letzten 100 Jahren.

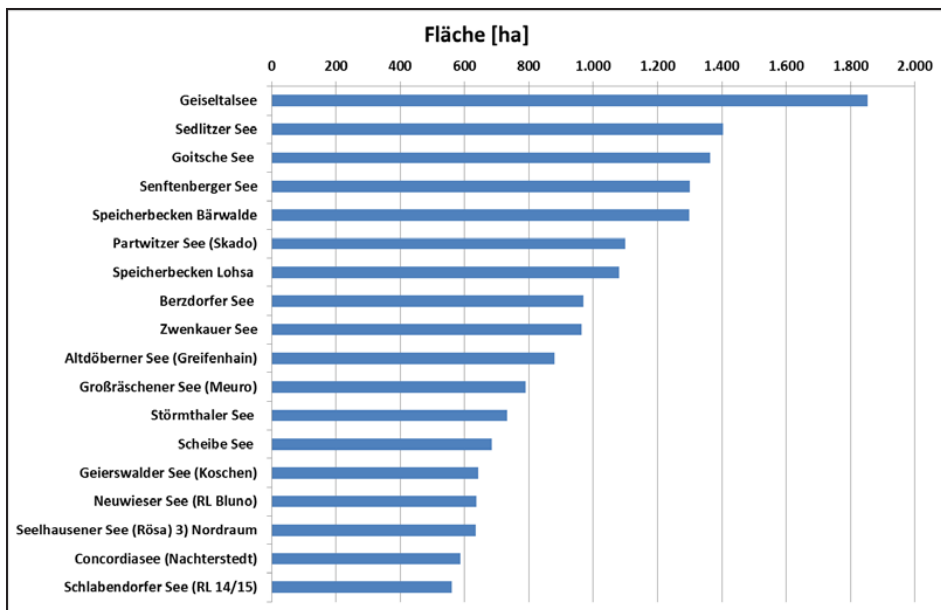


Abb. 1: Flächen der größten Tagebauseen im Lausitzer und Mitteldeutschen Revier bei Endwasserstand (LMBV Flutungsstand; <http://www.lmbv.de/index.php/Flutungsstand.html>).

Das Lausitzer Revier erstreckt sich im Süden Brandenburgs und in nordöstlichen Teilen von Sachsen. Im Mitteldeutschen Revier findet man Tagebauseen im Südraum Leipzig, Bitterfelder Raum und bei Geiseltal/Merseburg. Bis zum Jahr 2018 wird in Brandenburg und Sachsen das größte künstliche Seengebiet Europas entstehen. Das Lausitzer Seenland wird touristischen Bootsverkehr auf 14 miteinander verbundenen Seen mit insgesamt 7.000 ha Wasserfläche ermöglichen (Abb. 1).

Bedingt durch die Abbautechnologie in den Braunkohletagebauen ergeben sich vielfältige morphologische Ausprägungen der Beckenform der Seen, die natürlicherweise in der Region

nicht vorkommen (z. B. Wechsel schmaler und sehr tiefer Randschläuche mit Flachwasserbereichen, die über Absetzerkippen entstehen). Alte Tagebauseen sind meist klein, wie die Seen im Muskauer Faltenbogen, neue sehr groß, wie Geiseltalsee, Sedlitzer See, Goitzsche-See, Senftenberger See, Speicherbecken Bärwalde und Partwitzer See, mit künftig jeweils über 1.000 ha Wasserfläche.

Das Lausitzer Revier mit dem Sedlitzer und dem Partwitzer See in Brandenburg und den Speicherbecken Bärwalde und Lohsa II in Sachsen wird flächenmäßig die größten Seen in diesem ehemaligen Braunkohleabbaugebiet stellen. Insgesamt wird eine Wasserfläche von

Tab. 1: Flutungsstand (Flutungsbeginn und Flutungsende) der entstehenden Seen in der Brandenburgischen Lausitz mit Angabe der künftigen Volumina und Flächen der Tagebauseen nach Angaben der LMBV vom Dezember 2015, ergänzt um die mittlere Tiefe (Zmitt). Seen nach Größe (Fläche) angeordnet, saure Seen fett hervorgehoben, (Namen in runden Klammern) bergbauliche Bezeichnung, [Fläche in eckigen Klammern] abweichende Angabe der Flächengröße des LUGV Brandenburg, 1) Oberflächenwasser, 2) Grundwasserwiederanstieg, 3) pH-Zwischenstand im Dezember 2015 / * Anpassung wg. noch notwendiger Sanierungs- und Böschungsarbeiten, ** Bekalkungsmaßnahme durchgeführt, *** Seenbezeichnung LUGV Brandenburg, k.A. keine Angaben (http://www.lmbv.de/index.php/Brandenburgische_Lausitz.html, Aufgerufen am 3.12.2015)

Brandenburgische Lausitz	End-Stand			Flutungsbeginn	Ist-Stand Flutungs- ende	pH-Wert ³⁾
	Fläche ha	Volumen Mio m ³	Z _{mitt} m			
Sedlitzer See	1404	210	15,0	2005	*2019	3,1
Partwitzer See (Skado)	1100	134	12,2	2004	2015	2,9
Altdöberner See bzw. Greifenhainer See*** (Greifenhain)	880	294	33,4	1998	2021	8,0
Großbräscher See bzw. Ilsesee*** (Meuro)	789	135	17,1	2007	2017	3,3
Geierswalder See (Koschen)	642	98	15,3	2004	2013	6,8**
Schlabendorfer See	561	46	8,2	2002	2012	7,0**
Gräbendorfer See	457	92	20,1	1996	2007	7,1
Lichtenauer See (RL F)	326	23	7,1	k.A.	2011	6,8**
Klinger See (SRS Jänschwalde)	320	100	31,3	2000	2021	4,1
Bergheider See (Klettwitz N)	320	36	11,3	2001	2015	3,0
Bischdorfer See (RL 23)	255	19	7,5	2000	2013	5,4
Drehnaer See (RL 12)	222	13	5,9	1999	2012	7,2**
Schönfelder See (RL 4)	140	8	5,7	1997	2008	8,1
Kleinleipischer See (RL 131S)	83	7	8,4	k.A.	k.A.	2,7
Stiebsdorfer See 2) (RL 13)	51	4	7,8	k.A.	k.A.	3,2
Heidese (RL 131N)	51	4	7,8	k.A.	k.A.	2,7
Kahnsdorfer See (RL 24) ¹⁾	44	1	2,3	k.A.	k.A.	7,7
Grünhauser See-Ost²⁾ (RL 130)	43	2	4,7	k.A.	k.A.	2,8
Grünhauser See-West²⁾ (RL 129)	16	1	6,3	k.A.	2009	2,8

7.704 bzw. 7.076 ha in der Brandenburgischen und Sächsischen Lausitz nach Flutungsende entstehen.

Das Lausitzer Braunkohlenrevier ist gekennzeichnet durch einen relativ hohen Anteil saurer Seen. Von den insgesamt 36 in den Tabellen 1 und 2 aufgelisteten Seen befinden sich derzeit 17 im sauren Bereich mit z. T. sehr niedrigen pH-Werten.

Die wasserwirtschaftlichen Herausforderungen sind gekoppelt mit der Forderung nach der Einstellung eines sich selbst regulierenden Wasserhaushalts in den Bergbauregionen. Die zukünftigen Nutzungen der Tagebauseen schließen neben Naherholung und Freizeitgestaltung auch wirtschaftliche Aspekte wie den Tourismus und den Fischfang sowie den Naturschutz ein. Naturschutzfachliche Bedeutung und Nutzung der Seen stehen jedoch in unmittelbarem Zusammenhang mit Fragen der

Wasserqualität, die stark von den Bergbaufolgen beeinflusst wird. Seen mit extremer Versauerung können gravierende Auswirkungen auf die Besiedlungsmöglichkeiten für Pflanzen und Tiere sowie auf die Nutzungsmöglichkeiten haben. Dies erfordert in einer Reihe von Seen, die hydrologisch in Flusssysteme eingebunden sind (z. B. Spree, Schwarze Elster), die Durchführung von umfangreichen Sanierungsmaßnahmen. Einige Seen, wie der Schlabendorfer See, werden chemisch neutralisiert. Andere Seen, wie der Senftenberger See, sind auf die permanente Zufuhr von neutralem Flusswasser angewiesen (NIXDORF et al. 2015).

Viele der neuen Tagebauseen liegen im Einzugsgebiet der Spree. Diese hat in den vergangenen Jahren bundesweit dadurch Schlagzeilen gemacht, dass eine akute Gefährdung des Biosphärenreservats und Tourismusmagneten Spreewald durch erhöhte Eisenkonzentrationen

Tab. 2: Flutungsstand (Flutungsbeginn und Flutungsende) der entstehenden Seen in der Sächsischen Lausitz mit Angabe der künftigen Volumina und Flächen der Tagebauseen nach Angaben der LMBV vom Dezember 2015 ergänzt um die mittlere Tiefe (Zmitt).

Seen nach Größe (Fläche) angeordnet, saure Seen fett hervorgehoben, (Name in runden Klammern) bergbauliche Bezeichnung, 1) Grundwasserwiederanstieg, 2) pH-Zwischenstand Dezember 2015 (<http://www.lmbv.de/index.php/saechsische-lausitz.html>, Aufgerufen am 3.12.2015)

Sächsische Lausitz	Fläche in ha	End-Stand		Ist-Stand		
		Volumen in Mio m ³	Z _{mitt} in m	Flutungsbeginn	Flutungsende	pH-Wert ²⁾
Speicherbecken Bärwalde	1299	173	13,3	1997	2009	7,3
Speicherbecken Lohsa	1081	97	9,0	1997	2015	5,5
Berzdorfer See	969	333	34,4	2002	2013	8,8
Scheibe See	685	109	15,9	2002	2011	7,8
Neuwieser See (RL Bluno)	636	55	8,6	2002	2017	2,8
Bernsteinsee (Burghammer)	482	35	7,3	1997	2009	7,1
Blunoer Südsee (RL Nordschlauch)	387	63	16,3	2005	2017	2,7
Spreetaler See (SNO)	361	89	24,7	1998	2015	3,3
Speicherbecken Dreiweibern	294	35	11,9	1996	2002	7,5
Sabrodter See (RL Nordrandschlauch)	207	28	13,5	2006	2017	2,7
Erika-See ¹⁾ (Laubusch)	145	6	4,1	k.A.	1970	7,5
Graureihersee (RL D/F)	137	5	3,6	2018	2018	7,8
Heide VI ¹⁾	100	8	8,0	k.A.	1984	3,0
Bergener See (RL Südostschlauch)	99	2	2,0	k.A.	2017	2,5
Lugteich	95	3	3,2	2010	2018	2,5
Olbersdorfer See	60	6	10,0	1996	1999	k.A.
Kortitzmühler See	28	1	3,6	2018	2018	7,6

infolge des Braunkohlebergbaus in der Lausitz befürchtet wurde. Der Anstieg der Eisenkonzentrationen in Teilen der Spree und ihrer südlichen Zuflüsse zum Oberspreewald führte zu einer Braunfärbung des Wassers und zu einer Ablagerung von Eisenerosion auf der Flusssohle (Abb. 2). Die Verockerung stellt nicht nur eine ästhetische Beeinträchtigung dar, sondern hat auch gravierende negative Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften im Gewässer. Dazu zählen u. a. die Verschlechterung des Sauerstoffhaushaltes, eine Versauerungsgefährdung, direkte toxische Wirkung von Eisen(II)-Ionen, die Bildung von Eisenniederschlägen auf Atmungsorganen zum Beispiel von Fischen und Kleintieren, eine Verschlechterung des Lichtklimas für Pflanzen, die Beeinträchtigung der Nahrungsaufnahme von Tieren und eine Verminderung des Selbstreinigungsvermögens des Gewässers.

Wie notwendig ein Schutz der Spreewaldgewässer vor erhöhten Eisenkonzentrationen ist, wird durch folgende Zahlen belegt: 21 Muschel- (davon 17 Arten, die auf der Roten Listen Brandenburgs stehen) und 29 Libellenarten (davon 9 Arten auf der Roten Liste Brandenburgs, KÖHLER et al. 2002) haben dort ihren

Lebensraum und sind durch eine Verockerung gefährdet. Hinzu kommt die potentielle Beeinträchtigung von optisch orientierten Räubern unter den Wirbeltieren, wie Fischotter, Schwarzstorch und Eisvogel.

2 Limnologie von Tagebauseen

2.1 Typisierung von Tagebauseen als Voraussetzung für Bewertungen

Zunächst wurde eine Einordnung der Tagebauseen in das chemisch-physikalische Spektrum von Standgewässern vorgenommen (Abb. 3).

Aufgrund der Morphometrie und der geringen Nährstoffbelastung können neutrale Tagebauseen zu den stabil geschichteten Klarwasserseen gezählt werden, die auch als natürliche Referenzgewässer ausgewählt wurden. Sie gehören zu den Hartwasserseen, die im neutralen Zustand mit den natürlichen Hartwasserseen (z. B. Klarwasserseen in Nordbrandenburg) verwandt sind. Sie sind reich an Sulfat, Calcium und Eisen und arm an Phosphor, was sie als potenzielle Klarwasserseen ausweist. Dieser Seentypus ist in unserer Region selten



Abb. 2: Verockerung am Eichower Fließ, Juli 2013. Foto: D. Leßmann

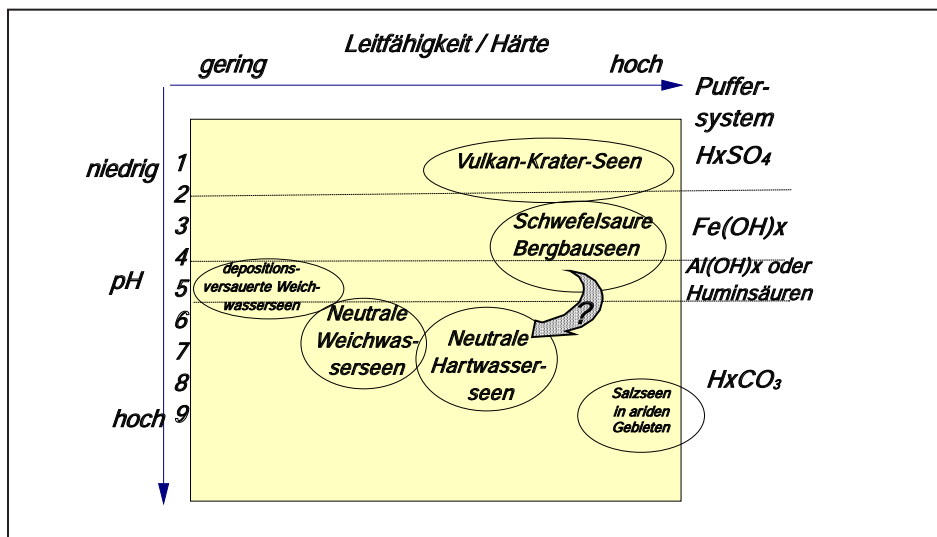


Abb. 3: Seentypisierung in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit, dem pH-Wert und dem Puffersystem (nach NIXDORF et al. 2003).

und schützenswert. Klarwasserseen sind dafür bekannt, dass sie auf Nährstoffeinträge und damit Eutrophierung besonders sensibel reagieren. Tagebauseen weisen jedoch durch ihren besonderen Chemismus ein sehr gutes Retentionsvermögen für Phosphor auf (GRÜNEBERG in NIXDORF et al. 2016). Diese sensible Balance gilt es, als Chance für eine gute Gewässerqualität, zu erhalten und gegebenenfalls zu steuern.

Aus den Tabellen 1 und 2 ist ersichtlich, dass die Hälfte der gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie berichtspflichtigen Tagebauseen in der Lausitz sauer ist. Diese Seen stellen aquatische Ökosysteme dar, für die es bislang keine oder nur wenige äquivalente Beispiele in der Natur gibt. Sie bilden einen eigenständigen Gewässertypus, der chemisch den vulkanischen schwefelsauren Seen näher steht als den depositionsversauerten Weichwasserseen.

2.2 Besiedlung von Tagebauseen entlang des pH-Gradienten

Mit den Forschungen zur Gewässerökologie und Limnologie von extrem sauren aquatischen Ökosystemen Ende der 1990er Jahre wurde bereits im LENAB-Projektverbund „Leitbildentwicklung in der Bergbaufolgelandschaft“ eine solide wissenschaftliche Grundlage zum

ökologischen Verständnis der Seen geschaffen (WIEGLEB et al. 2000; BTU Cottbus 1998). Im Rahmen des Förderschwerpunktes „Sanierung und ökologische Gestaltung der Landschaften des Braunkohlebergbaues in den neuen Bundesländern“ wurden folgende Aspekte thematisiert:

- Erfassung und Bewertung des Entwicklungspotentials naturnaher terrestrischer, semiaquatischer und aquatischer Bereiche der Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft,
- Erarbeitung von Leitbildern und Handlungskonzepten für deren verantwortliche Gestaltung und nachhaltige Entwicklung,
- Leitbilder für naturnahe Bereiche.

Wesentliches Anliegen des Vorhabens war die Herstellung einer sich selbstorganisierenden Landschaft, in der zur Erreichung ökologisch begründeter, aber auch wirtschaftlich tragfähiger und gesellschaftlich akzeptierter, Zielvorstellungen die natürlichen Entwicklungspotentiale genutzt werden sollten.

Im Rahmen des LENAB-Verbundprojektes konnten Richtung und Intensität biologischer Besiedlungen und Wirkmechanismen in den aquatischen Ökosystemen der Lausitz beschrieben werden. Sie bilden Grundlagen für Handlungsempfehlungen zur Gestaltung und Sanierung aquatischer Lebensräume in enger

Wechselwirkung mit angestrebten bzw. anzustrebenden Zielen einer ökologisch verträglichen Gewässernutzung. Gleichzeitig wurden Grundlagen für die ökologische Bewertung künstlicher Gewässer geschaffen (s. Kap. 3.2).

Zunächst musste seitens der Wissenschaftler der vorherrschenden Meinung entgegen getreten werden: „Saure Tagebauseen sind tote und/oder lebensfeindliche Gewässer“. Generell zeichnen sich die Lebensgemeinschaften in den stark versauerten Seen durch eine geringe Diversität aus, die in der Regel mit niedrigen Biomassen und Intensitäten von Stoffumsätzen verbunden ist. Auffällig sind Monodominanzen einzelner Taxa (LESSMANN & NIXDORF 2000; DENEKE 2000). Innerhalb taxonomischer Einheiten ist meist nur eine funktionelle Gruppe vertreten, es kommen die gleichen herbivoren Konsumenten im Pelagial wie im Litoral vor.

In den limnologischen Projekten des LEN-AB-Projektverbundes wurden zunächst Freiwasser und Sedimente untersucht sowie die Mechanismen der Erst- und Folgebesiedlung der Uferbereiche von Tagebauseen. Die Untersuchung zur Besiedlung durch Fische erfolgte neben wissenschaftlichen Aspekten auch im Rahmen wirtschaftlich orientierter Projekte (Zusammenfassung siehe: NIXDORF 2001, RÜMMLER 2010).

2.2.1 Plankton saurer Seen

Plankton ist die biologische Hauptkomponente des Freiwassers (Pelagial) in allen stehenden Gewässern. Nach der ökologischen Funktion unterscheidet man das pflanzliche (Phyto-), das tierische (Zoo-) und das Bakterioplankton. Das Phytoplankton bildet dabei durch die Fähigkeit der autotrophen Lebensweise (Primärproduktion) die Grundlage für die Konsumenten und Destruenten in einem Ökosystem. Zu den Destruenten gehören Bakterien und Pilze. Diese kommen in hohen Zellzahlen in Tagebauseen vor (200.000 bis 2 Mio. Bakterien pro ml). Es dominieren sehr kleine Zellen ($< 1 \mu\text{m}$). Innerhalb der größeren Morphotypen (Stäbchen, Filamente) herrscht eine höhere Vielfalt als in natürlichen neutralen Seen. Die bakterielle Produktion ist z. T. ungewöhnlich hoch und übersteigt die Primärproduktion. Das Phytoplankton wird dominiert durch kleine und bewegliche Taxa (Phytoflagellaten).

Die Biomassebildung wird durch Phosphor und in den sauren Gewässern auch durch anorganischen Kohlenstoff limitiert. Dagegen findet sich relativ viel Ammonium, weil die Nitrifikation im sauren Milieu gehemmt ist. Das führt zu Besonderheiten, die wir in natürlichen Seen gar nicht bzw. nur sehr selten beobachten können:

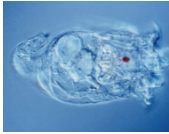

Die Phytoplankter entwickeln sich verstärkt in tieferen Schichten (TCM = Tiefen-Chlorophyll-Maxima), wo sie zwar wenig Licht zur Verfügung haben, aber mehr anorganischen Kohlenstoff und auch Phosphor assimilieren können. Die Knappheit an anorganischen Nährstoffen wird häufig durch einen Wechsel in der Ernährungsweise kompensiert, so dass mixotrophe Organismen dominieren. Diese können von einem pflanzlichen Stoffwechsel auf einen tierischen umschalten. Diese Erscheinung ist auch in oligo- und mesotrophen natürlichen Seen zu beobachten.

Eine weitere Besonderheit der Phytoplanktonentwicklung ist eine „gestörte“ Saisonalität innerhalb der saisonalen Sukzession. So werden neben den sommerlichen Maxima im Hypolimnion im Winter zusätzliche Maxima unter Eis beobachtet, wo sich in diesen Perioden ausreichend anorganischer Kohlenstoff angereichert hat.

Das Zooplankton zeigt ebenfalls eine typische Entwicklung von sehr wenigen Arten bis zu einer artenreichen Zusammensetzung entlang des pH-Gradienten. Deshalb kann die Zooplankton-Besiedlung zur Klassifikation der Tagebauseen benutzt werden (Tab. 3). Erst bei einem pH größer als 2,9 treten Crustaceen (*Chydorus spec.*) auf. Ab pH 3 ist mit dem Vorkommen effektiver Filtrierer (Rotatorien, Ciliaten) zu rechnen und damit von einem größeren Einfluss des Zooplankton-Grazings auf das Phytoplankton auszugehen.

Eine weitere Besonderheit der sauren Seen ist das Auftreten benthischer oder litoraler Zooplanktontaxa im Pelagial, wie es bei Ciliaten und Rotatorien beobachtet wurde. Sporadisch oder episodisch sind hohe Biomassen bei pelagischen Primärproduzenten und Konsumenten zu beobachten, die das hohe ökologische Entwicklungspotential dieser Extrembiotope widerspiegeln.

Tab. 3: Zooplankton-Besiedlung zur Klassifikation der Tagebauseen (nach DENEKE 2000).

Beispielarten	Artenanzahl	pH-Bereich	
<i>Cephalodella hoodi</i>		1–4	2,3–2,9
<i>Brachionus sericus</i>		3–7	2,7–3,5
<i>Chydorus sphaericus</i> <i>Cephalodella c.f. hoodi</i> <i>Cephalodella gibba</i> <i>Elosa worallii</i> <i>Brachionus urceolaris</i> <i>Bdelloidea</i>		6–11	> 3,5

2.2.2 Makrofauna und Nahrungsnetze

Extrem saure Tagebaurestseen weisen im Vergleich mit neutralen Seen eine veränderte Zusammensetzung und Funktion sowohl der planktischen als auch der benthischen Biozö-nosen auf. Im Pelagial stehen den Algen und den Bakterien im wesentlichen Flagellaten und Rotatorien als potentielle Konsumenten gegenüber. Diese sehr verkürzte Nahrungs-kette wird durch carnivore Corixiden ergänzt, die auch in regenversauerten Gewässern als Top-Prädatoren beschrieben wurden (HENRIK-SON & OSCARSON 1981). Diese übernehmen die Rolle der Fische. Neben ihrem Einfluss auf das planktische Nahrungsnetz stellen die Corixiden auch potentielle Räuber des Makrozoobenthos im Profundal und Litoral dar. Damit kommt ihnen sowohl eine bedeutende Rolle bei der Verknüpfung der unterschiedlichen Biozö-nosen als auch bei Stofftransportprozessen zu. Das Litoral ist durch eine beachtliche Anzahl an Taxa wie Corixiden, Dytisciden, Sialis und Chironomiden gekennzeichnet (Abb. 4).

Der pH-Wert (Säurestress) scheint ein wichtiger regulativer Faktor für die Entwicklung eines komplexeren Nahrungsnetzes zu sein. Ab pH 3 ist mit dem Auftreten effektiver Filtrierer (Rotatorien, Ciliaten) zu rechnen und damit von einem größeren Einfluss des Zooplankton-Grazings auf das Phytoplankton auszugehen. Innerhalb des Zooplanktons ist

die Konkurrenz die dominante Interaktion, da höhere trophische Ebenen und damit ein potentieller Fraßdruck fehlen. Zeitweise stellen Heliozoen die einzigen Konsumenten 2. Ordnung dar. In Abb. 5 ist ein Beispiel für ein Nahrungsnetz in einem sauren Tagebausee dargestellt.

2.2.3 Besiedlung und Vegetationsentwicklung des Land-Wasser-Übergangsbereichs (Makrophyten und benthische Diatomeen)

Tagebauseen weisen in Abhängigkeit vom pH-Wert, der Karbonathärte und der Trophie unterschiedliche Besiedlungen mit aquatischen Makrophyten auf. In sauren Tagebauseen ist *Juncus bulbosus* die bestimmende Art, die oft Monodominanzbestände ausbildet (PIETSCH 1973, 1979). Bei pH-Werten < 4,0 können zudem *Eleocharis acicularis* und *Potamogeton natans* auftreten. Ab einem pH-Wert von 4 kommen weitere Arten hinzu: *Nymphaea alba*, *Utricularia* spp., *Sphagnum* spp., *Potamogeton polygonifolius*, *Sparganium natans*. Bei höheren pH-Werten treten weitere Makrophyten auf. Für die Verteilung der Arten sind die Karbonathärte und die Trophie maßgeblich.

Neutrale bis schwach alkalische, karbonatreiche, oligo- bis mesotrophe Tagebauseen weisen eine artenreiche Vegetation aus Armleuchteralgen auf (*Chara aspera*, *C. contraria*,

C. hispida, *C. aculeolata* [= *polyacantha*], *Nitella opaca*, *Tolypella glomerata*). Bei Eutrophierung oder auch nährstoffreichen Sedimenten nehmen höhere aquatische Makrophyten wie *Myriophyllum* spp., *Potamogeton* spp. *Elodea nuttallii* oder *Najas marina* ssp. *intermedia* zu.

Wenige Tagebauseen wie der Goitzschee weisen sowohl saure als auch neutrale bis schwach alkalische Bereiche auf. Einen Sonderfall bildet der Senftenberger See, in dem sich saures, nährstoffarmes Weichwasser und neutrales, nährstoffreiches Hartwasser vermischen. Daher weist der Senftenberger See sowohl Weich- als auch Hartwasserarten auf (VAN DE WEYER et al. 2009; Abb. 6 und 7).

Hierbei bleibt zu berücksichtigen, dass Weichwasserarten wie *Juncus bulbosus* und *Utricularia minor* auch bei höheren Karbonatgehalten vorkommen können (PIETSCH 1973). Dies trifft auch in Bezug auf andere Parameter wie z. B. den pH-Wert zu. Die nachgewiesenen Weichwasserarten (s. Tab. 4) haben ihren Schwerpunkt in oligo- bis mesotrophen Gewässern, während die Hartwasserarten weite Amplituden in Bezug auf die Trophie aufweisen.

Bei den makrophytischen Helophyten (z. B. *Phragmites australis*, *Sparganium* spp., *Typha* spp.) ist die Verteilung in Bezug auf die unterschiedlichen Typen von Tagebauseen nicht so

Tab. 4: Nachweise von aquatischen Makrophyten im Senftenberger See (VAN DE WEYER et al. 2009).

Schwerpunkt im Weichwasser:	
<i>Juncus bulbosus</i>	oligo- bis mesotroph
<i>Utricularia minor</i>	oligo- bis mesotroph
<i>Littorella uniflora</i>	oligo- bis mesotroph
<i>Pilularia globulifera</i>	oligo- bis mesotroph
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	oligo- bis mesotroph
<i>Luronium natans</i>	oligo-bis mesotroph
<i>Potamogeton polygonifolius</i>	oligo-bis mesotroph
Schwerpunkt im Hartwasser:	
<i>Chara braunii</i>	oligo- bis polytroph
<i>Chara contraria</i>	oligo- bis polytroph
<i>Najas marina</i> ssp. <i>intermedia</i>	oligo- bis polytroph
<i>Potamogeton nodosus</i>	meso- bis polytroph
indifferent:	
<i>Chara virgata</i>	oligo- bis eutroph
<i>Nitella flexilis/opaca</i>	oligo- bis eutroph
<i>Potamogeton alpinus</i>	oligo- bis eutroph
<i>Potamogeton obtusifolius</i>	oligo- bis eutroph
<i>Utricularia australis/vulgaris</i>	oligo- bis eutroph
<i>Eleocharis acicularis</i>	oligo- bis polytroph
<i>Elatine hexandra</i>	oligo- bis polytroph
<i>Myriophyllum spicatum</i>	oligo- bis polytroph
<i>Potamogeton pectinatus</i>	oligo- bis polytroph
<i>Potamogeton pusillus</i>	oligo- bis polytroph
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	meso- bis polytroph
<i>Elodea canadensis</i>	meso- bis polytroph

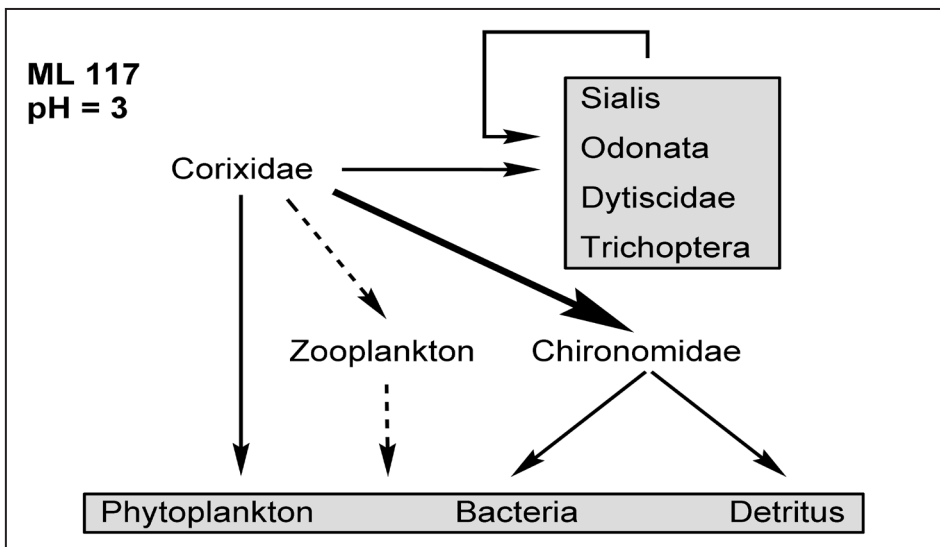


Abb. 4: Nahrungsnetzbeziehungen unter besonderer Berücksichtigung der Makrofauna im sauren (pH 3) Tagebausee Plessa RL 117 (Grünwalder Lauch), (modifiziert nach WOLLMANN et al. 2000).

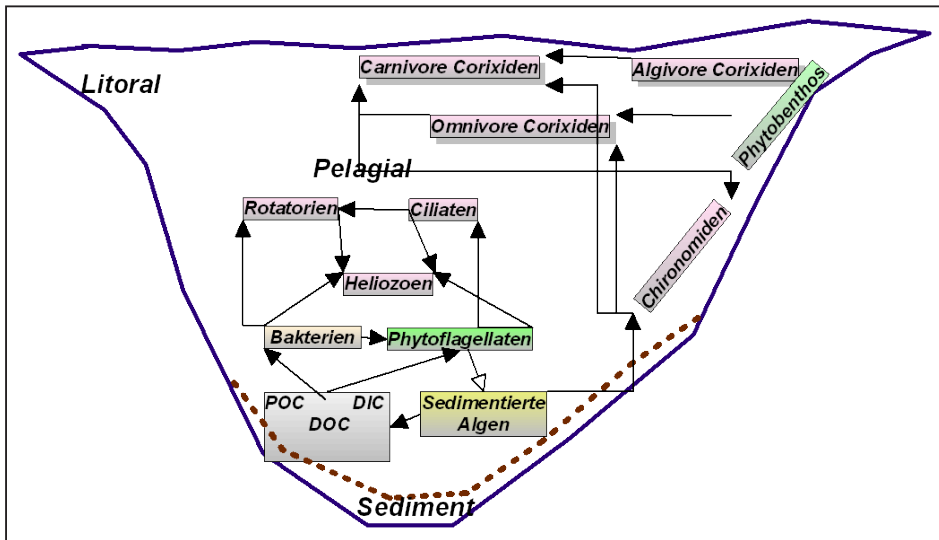


Abb. 5: Nahrungsnetz in einem sauren Tageausee der Lausitz (POC – partikulärer organischer Kohlenstoff, DIC – gelöster anorganischer Kohlenstoff, DOC – gelöster organischer Kohlenstoff).

deutlich ausgeprägt wie bei den aquatischen Makrophyten.

Aus naturschutzfachlicher Sicht ist bemerkenswert, dass die Tageauseen verschiedene Makrophyten aufweisen, die in den Roten Listen von Sachsen (DOEGE 2008, SCHULZ 2013) geführt sind. Beispielfhaft seien hier *Chara aspera*, *C. braunii*, *Chara hispida*, *Littorella uniflora* und *Potamogeton nodosus* erwähnt. Zudem beherbergen einige Tageauseen auch verschiedene Lebensraumtypen der FFH-Richtlinie, z. B. 3140 (oligo-mesotrophe kalkhaltige Gewässer mit benthischer Vegetation aus Armleuchteralgen), 3130 (oligo- bis mesotrophe stehende Gewässer mit Vegetation der Littorelletea uniflorae und/oder der Isoëto-Nanojuncetea) bzw. 3150 (natürliche eutrophe Seen mit einer Vegetation vom Typ Magnopotamion oder Hydrocharition).

Neutrale Tageauseen können auch eine sehr artenreiche benthische Diatomeenflora vorweisen wie im Fall des Kulkwitzer Sees in Sachsen (GUTOWSKI et al. 2011). So sind im Kulkwitzer See die indikativen Arten *Achnanthydium minutissimum* und *Cocconeis neothumensis* als häufige Formen anzutreffen, und Arten wie *Amphora oligotraphenta* bzw. *Navicula subalpina* kommen mit geringen Individuendichten vor, welche sonst in oligo- bis mesotrophen Alpen- und Voralpenseen beheimatet sind.

Achnanthydium minutissimum ist die am weitesten verbreitete Diatomeen-Art in Tageauseen. Nur mäßig bis stark saure Gewässer gehören nicht zu ihrem Verbreitungsgebiet. Als floristische Besonderheit und sehr seltene Art in Deutschland gilt *Achnanthydium thermalis*. Sie wurde bislang in Mineral- und Thermalquellen gefunden, bevorzugt elektrolytreiche Gewässer und scheint sich in Tageauseen Sachsens gut zu verbreiten (GUTOWSKI et al. 2011, S. 128). In sauren Tageauseen sind *Eunotia exigua*, *Navicula* spp. und *Nitzschia* spp. häufige Vertreter der Bacillariophyceen (WOLLMANN et al. 2000)

2.2.4 Fischbiozöosen und fischereiwirtschaftliche Entwicklung von Tageauseen

Fische treten in Gewässern mit pH-Werten unter 5 in unseren Breiten natürlicherweise nicht auf. Eine wichtige gewässerpraktische Forschungsaufgabe bestand in der Lösung der Frage: Welche gewässeradäquaten Fischgemeinschaften und welche fischereiliche Nutzung kann es in den großen und nährstoffarmen Tageauseen geben? Hier wird auf eine Zusammenfassung der relevanten Projekte in NIXDORF (2001) und RÜMLER (2010) verwiesen.



Abb. 6: Im Südwesten des Senftenberger Sees bildet *Juncus bulbosus* dichte Bestände. Foto: K. van de Weyer



Abb. 7: Im Südwesten des Senftenberger Sees kommen *Juncus bulbosus* und *Potamogeton nodosus* zusammen vor. Foto: K. van de Weyer

Fische sind in all ihren Entwicklungsstadien erst ab einem pH größer 5 lebens- und vor allem reproduktionsfähig. Neben dem touristischen Aspekt ist die Fischereiwirtschaft in den Bergbaufolgelandschaften eine Entwicklungs-komponente, der man besondere Aufmerksamkeit schenkt.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand u. a. die Frage nach der Säuretoleranz früher Entwicklungsstadien von einheimischen Fischen. Am tolerantesten gegenüber Säurestress erwiesen sich Flussbarsch (*Perca fluviatilis*), Hecht (*Esox lucius*) und Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*). Niedrige pH-Werte verursachen bei allen untersuchten Fischarten Probleme beim Schlüpfen, die wahrscheinlich durch die Beeinflussung des Schlupfenzym Chorionase bedingt sind. Weiterhin führen Eisenniederschläge auf den Eiern zu einer schlechteren Sauerstoffversorgung. Die untere Grenze für die erfolgreiche Reproduktion von Fischen, die sonst in neutralen Gewässern leben, liegt bei pH = 5,5. Lediglich die Kleine Maräne (*Coregonus albula*) kann sich nur im neutralen pH-Bereich reproduzieren. Als Erstbesiedler von Tagebauseen mit nährstoffreichem Wasser und einer Entwicklungstendenz zur Neutralität ist der Barsch anzusehen.

Als zweite Frage wurde untersucht, welche Überlebenschancen Fische haben, die mit dem Flutungswasser in die Tagebauseen eingetragen werden. Dazu war die Erfassung der Entwicklung des Makrozoobenthos als wichtige Gruppe der Fischnährtiere notwendig. Dabei konnten mehr als 1.000 Individuen pro m² nachgewiesen werden. Der Senftenberger See als „älterer“ Tagebausee hat eine etablierte Fischzönose mit den Hauptfischarten Barsch, Zander, Hecht, Kleine Maräne, Plötze, Rotfeder, Blei und Güster. Besatzmaßnahmen durch Berufsfischer werden mit Karpfen, Aal und Wels vorgenommen.

Die Verteilung der Fische entlang eines pH-Gradienten wurde im Senftenberger See mittels Kiemennetzen ermittelt. Dabei zeigte sich, dass Flussbarsche, Hechte und Rotfedern regelmäßig auch in sauren Bereichen auftreten, Plötze und Güster nur selten und Bleie gar nicht. Vollwertige Strukturen (Makrophyten im See) werden als Laichplätze in permanent oder episodisch versauerten Bereichen nicht angenommen.

Untersuchungen zur Fischfauna im Olbasee, einem sauren und schon relativ alten Tagebausee in Sachsen, belegen, dass Barsche bei einem ausreichenden Nahrungsangebot pH-Werte zwischen 3,1 und 4,1 tolerieren können. Die Nahrung besteht hauptsächlich aus Insektenlarven. Eine erfolgreiche Reproduktion der Barsche ist jedoch unter diesen Bedingungen nicht möglich.

Für die meisten der künftigen und bereits bestehenden Tagebauseen wird ein oligo- bis mesotropher Zustand prognostiziert. Die morphometrischen Besonderheiten dieser Seen bestehen in dem Vorhandensein eines großen Hypolimnions, der steilscharigen Beckenform und dem reduzierten Anteil fischereilich bedeutsamer Flachwasseranteile (Litoral). Die Uferlinien sind gerade, und es werden wenige künstlich geschaffene Flachwasserbereiche entstehen.

Der Zustand der jungen Tagebauseen ist durch die fehlende bzw. reduzierte Makrophytenvegetation, Litoral- und Profundalfauna gekennzeichnet. Als Nahrungsgrundlage steht fast ausschließlich Zooplankton zur Verfügung. Unter Beachtung der morphometrischen (mittlere Tiefe > 15 m) und trophischen Verhältnisse (Sichttiefe > 5 m, ausreichend Sauerstoff bis zum Grund, Dinobryon und Ceratium als Sommerplankton) und unter der Voraussetzung der pH-Neutralität entsprechen die Seen den Maränenseen gemäß der Klassifikation natürlicher Seen. Deshalb wurden für die Kalkulationen die Ertragswerte aus norddeutschen Maränenseen (Stechlinsee, Wummsee, Werbellinsee) herangezogen. Die mögliche Primärproduktion und die Entwicklung des Zooplanktons soll die Grundlage für die Entwicklung von Fischpopulationen sein, die in Anlehnung an den Maränensee II nach BAUCH (1955) bzw. MÜLLER (1966) ein bevorzugtes Wachstum der Kleinen Maräne (*Coregonus albula*) als Leitfischart zulassen. Die Kleine Maräne ist ein kaltstenohermer, zooplanktonfressender und ausschließlich pelagisch lebender Fisch, der am besten an die nährstoffarmen und sauerstoffreichen Bedingungen angepasst ist.

Tagebauseen, die aufgrund ihrer Morphometrie und Substratbeschaffenheit die Entwicklung von Makrophytenbeständen zulassen, haben gute Chancen für ein Aufkommen von Hecht (*Esox lucius*) und Plötze (*Rutilus*

rutilus) sowie Großmaräne (*Coregonus lavaretus*), Aal (*Anguilla anguilla*), Blei (*Abramis brama*), Schleie (*Tinca tinca*) und Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*), Barsch (*Perca fluviatilis*) und anderen Kleinfischarten.

3 Leitbilder und ökologische Bewertung

3.1 Leitbilder

Ein mögliches Leitbild für Standgewässer in der Bergbaufolgelandschaft könnte der mesotrophe, leicht saure Tagebausee mit hohem Härtegraden sein. Sein Pufferungsvermögen ist jedoch insbesondere im Anfangsstadium der Reifung sehr gering, was ihn anfällig gegen Säureschübe und damit rückversauerungsgefährdet macht. Aufgrund der besonderen geologischen Verhältnisse findet sich im ehemaligen Tagebaubereich Schlabendorf-Nord für dieses Leitbild ein Referenzgewässer (Stöbritzer See). Für andere Bereiche mit stark versauerten Seen sind aufwendige und z. T. auch lang andauernde Sanierungsmaßnahmen zur Erreichung dieser anspruchsvollen Ziele notwendig. Daher ist das Ziel des mesotrophen leicht sauren Tagebausees mit dem übergeordneten Leitbild „Naturnähe“ und „Nachhaltigkeit“ kaum vereinbar und für die Kernzonen naturnaher Bereiche ungeeignet. Anwendbar ist es für Übergangszonen, in denen dann auch Nutzungsansprüche durch den Menschen (z. B. Bade- oder Freizeitseen) berücksichtigt würden.

Bei der Leitbildentwicklung für Gewässer der Bergbaufolgelandschaft gibt es Schwierigkeiten durch die sehr speziellen Rahmenbedingungen für die Gewässer, aber auch durch Unsicherheiten und/oder Unschärfen über Wege und Resultate der künftigen Naturentwicklung in der Bergbaufolgelandschaft. Als allgemeines übergeordnetes Leitbild ist auch für die Bergbaufolgelandschaften Naturnähe in den gesetzlichen Vorgaben und Sanierungsplänen festgeschrieben. Die Basis für diese Leitbilder ergab sich aus den Resultaten aktueller Untersuchungen über den ökologischen Zustand von in den Bergbaufolgelandschaften bereits bestehenden Gewässern.

Eine wesentliche Funktion dieser Leitbilder ist es, zunächst ein Bild künftiger möglicher Entwicklungen zu zeichnen und interne Zielkonflikte oder auch Konflikte zwischen Nutzung und ökologischem Potential der Gewässer aufzuzeigen. Dadurch werden neue Denkansätze provoziert und intuitive Bewertungen verdeutlicht: So kann „sauer“ a priori nicht gut oder schlecht sein, sondern nur in Bezug auf Referenzzustände oder Nutzungsvorgaben. Die vorbergbaulich natürlichen Zustände kann man als Leitbilder ausschließen, weil es unter natürlichen Bedingungen z. B. keine Seenplatte in der Lausitz gegeben hätte.

Die Leitbilder für Gewässer der Bergbaufolgelandschaften unterscheiden sich also in mehrfacher Hinsicht von den sonst üblichen:

Sie sind Prognosen eines noch nicht bestehenden Zustandes.

Sie sollen für naturnahe Bereiche am Grundmotiv „Naturnähe“ entwickelt werden, das für die anthropogen stark überformten Bergbaufolgelandschaften nicht bestimmt ist und teilweise im Gegensatz zu verschiedenen Nutzungsinteressen steht.

Sie müssen über den Rahmen des in der Ökologie üblichen hinaus Unschärfen und Unsicherheiten abbilden.

Um diesen Unschärfen und Unsicherheiten Rechnung zu tragen, wurden mit Hilfe einer Szenariotechnik mehrere alternativ möglich erscheinende Leitbilder erarbeitet.

Für Standgewässer wird aus der Sicht der Limnologen die Beantwortung der Frage nach einem Leitbild zunächst aus der Beschreibung des Entwicklungspotentials der Seen abgeleitet, das sich nach der Flutung ohne weitere nachhaltige Eingriffe herausbilden würde. Es wird zum derzeitigen Stand der Diskussion als der leicht saure, mesotrophe See definiert, der eine Entwicklung und im Sinne eines anthropozentrischen Weltbildes auch Neutralisierungsmaßnahmen in naturnahen Bereichen zulässt (Abb. 8, Badensee, Leitbild A).

Leitbild A: der neutrale, mesotrophe Tagebausee (nutzungsorientierter Ansatz)

Es gibt vielfältige Anlässe, über den ökologischen Reiz, die wissenschaftliche Brisanz und eine breitere Akzeptanz saurer Gewässer nachzudenken. Das sollte auch den Schutz dieses eigenständigen Gewässertyps

einschließen, der hier mit dem Leitbild B bezeichnet wird.

Leitbild B: Saurer Tagebausee als eigener Seentyp, als eigenständiges, isoliertes Ökosystem

(Abb. 9): Unter dem Grundmotiv: Nutzungsminimierung bzw. ohne Nutzung, (freie Sukzession, Prozessschutz) überlässt man den See seiner natürlichen Entwicklung. Je nach Versauerungspotential und Grundwasserzuflüssen bleibt der See in seinem sauren Zustand (ständiger Säurenachschub z. B. aus der Kippe) oder entwickelt sich mittel- bis langfristig (Zeitschiene kann sich über viele Jahrzehnte erstrecken) zum leicht sauren (pH ca. 5) oder circumneutralen Gewässer. Eine bewusste Einleitung saurer Wässer kann ebenfalls als eine mögliche Handlungsmaßnahme zum Erhalt des sauren Gewässers vorgenommen werden.

Diese bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass auch in den extrem sauren Seen biologische Aktivität vorhanden ist. Es kommen Lebensgemeinschaften vor, die an

den Extremstandort angepasst sind. In den USA gibt es erste Bestrebungen zum Schutz von Mikroorganismengemeinschaften an Extremstandorten. Diese Seen wären für die stille Erholung geeignet, eventuell auch als „Anschauungsmaterial“ über die Auswirkungen des Bergbaus auf Natur und Landschaft („kultuhistorisches Denkmal oder Wissenschaftsdenkmal“).

Das Konfliktpotential ergibt sich aus den beschränkten Nutzungsmöglichkeiten durch den Menschen, z. B. nur zur stillen Erholung, zum Landschaftserleben oder Ähnlichem. Wasserwirtschaftliche Schwierigkeiten ergeben sich bei hydrologischer Einbindung, z. B. in Fließgewässersysteme oder Speicherbewirtschaftung.

Leitbild C: Tagebausee als ökologisch eingebundenes Landschaftselement in der Bergbaufolgelandschaft

(Abb. 10): Grundmotive sind: Biodiversität (allerdings nicht auf den See als Objekt bezogen, sondern auf die umgebende Landschaft), Artenschutz, Biotopschutz-Biotopverbund.

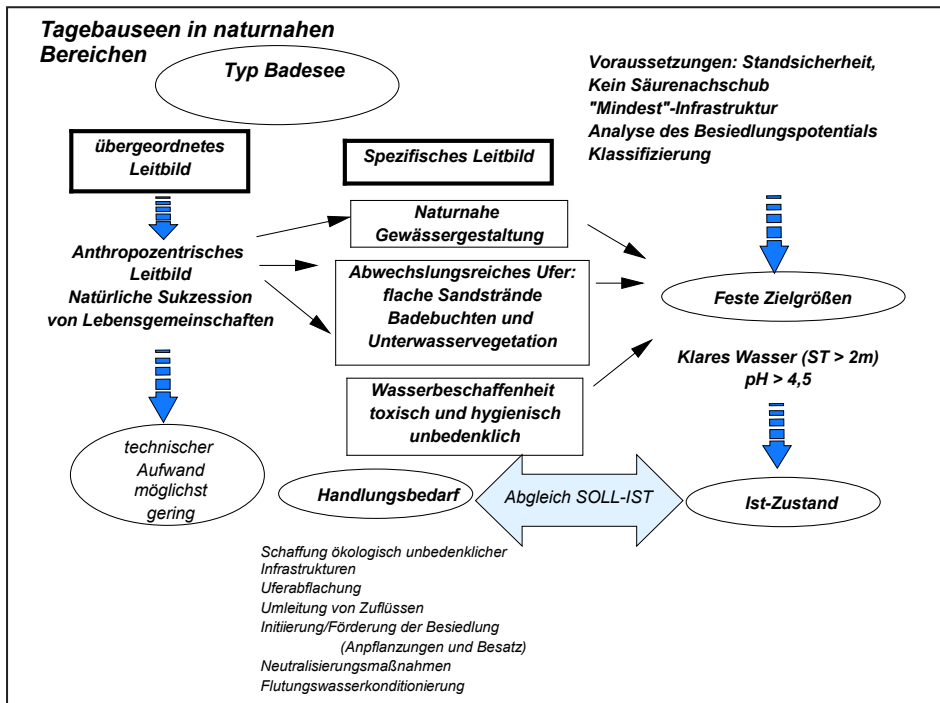


Abb. 8: Handlungsbedarf zur Erhaltung bzw. Erreichung eines Gewässerzustandes in Tagebauseen, der eine Badenutzung zulässt (beachte den pH-Wert >4,5 als Zielgröße!).

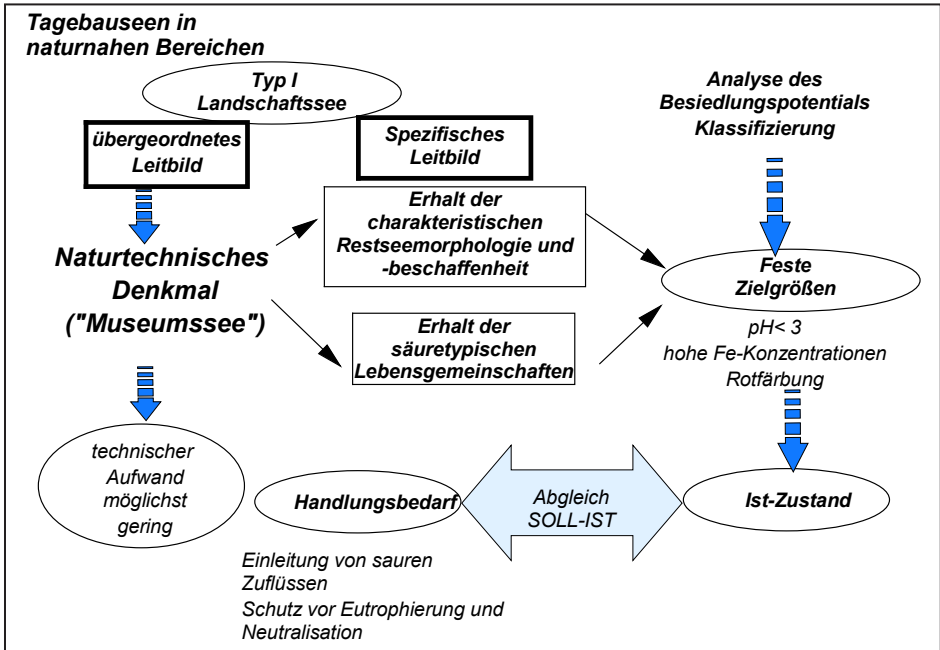


Abb. 9: Handlungsbedarf zum Erhalt eines geschützten, sauren Landschaftssees in der Bergbaufolgelandschaft.

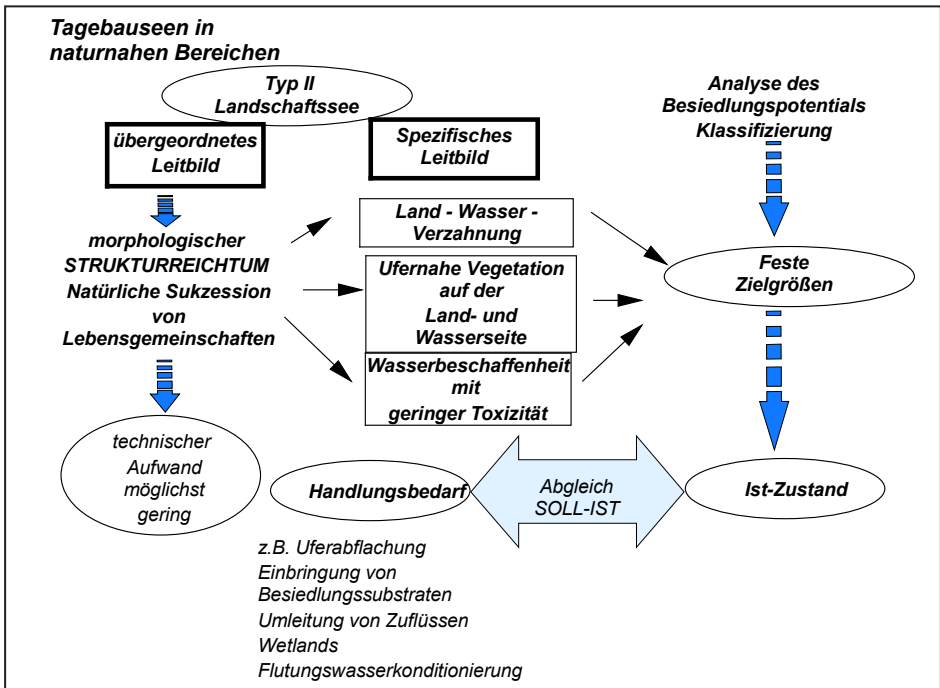


Abb. 10: Leitbild Landschaftssee mit der Funktion als ökologisch eingebundenes Landschaftselement.

Derzeit stellen die sauren Seen Landschaftsbereiche dar, die nicht in ihr Umfeld eingebunden sind; sie sind nicht harmonischer Teil der Landschaft. Damit fallen bestimmte Funktionen, wie z. B. Laichgewässer für Libellen/Amphibien, Futterressource für Vögel, die normalerweise von einem See erfüllt werden, bei den sauren Seen aus. Um diese ökologischen Funktionen zu erfüllen, wäre zumindest ein nur schwach saurer, besser neutraler Zustand des Sees im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht notwendig. Man kann zwar davon ausgehen, dass die Organismen im See an die Säure und damit verbundenen extremen Lebensbedingungen angepasst sind, die Lebewesen im Umland aber nicht oder nur in geringem Umfang. Bei diesem Leitbild werden Leitbilder des Arten- oder Biotopschutzes dem Leitbild für den See übergeordnet.

Wo, d.h. in welchen Bereichen und in welcher Entfernung voneinander, neutrale oder weniger saure Seen erforderlich sind, hängt davon ab, für welche Organismen man Trittsteinbiotope, Nahrungsressourcen oder ähnliches schaffen will (Betrachtung der Mobilität von Insekten, Amphibien, Vögeln).

Die Zeitschiene, innerhalb derer eine Zielgröße (schwach saurer bis neutraler pH-Wert, oder Erreichen des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes) erreicht werden kann oder soll, liegt im Bereich mehrerer Jahre. Sie ist ein wichtiges Bewertungskriterium und definiert auch den Umfang von Maßnahmen zur Erreichung dieses Leitbildes.

Die Ergebnisse aus den Forschungsprojekten zur möglichen fischereilichen Nutzung der Tagebauseen lieferten wichtige Informationen über die Säuretoleranz einheimischer

Tab. 5: Klassifizierung von Tagebauseen nach LESSMANN & NIXDORF (1998) nach Azidität, pH-Werten, Leitfähigkeiten, KB_{8,2}-Werten und Besiedlung mit Plankton und Makrophyten (ergänzt durch VAN DE WEYER 2009). N- neutral, MS- mäßig sauer, SS- sehr sauer, ES I-III- extrem sauer (von sehr hoch bis extrem)

pH	Leitfähigkeit [mS/cm]	Azidität K _{8,2} [mmol/l]	Versauerungsgrad	Besiedlung Phytoplankton	Besiedlung Zooplankton	Besiedlung Makrophyten
> 6	0,5–1,5	< 0	schwach bis nicht sauer N	diverse Cryptophyta Chlorophyta Diatomeen (Haptophyta)	diverse	diverse, deutliche Unterteilung in Abhängigkeit von Hydrogenkarbonatgehalt und Trophie
> 4,5 – 6	gering	um – 0,5	mäßig sauer MS	Besiedlungsmuster unerforscht		<i>Juncus bulbosus</i> , <i>Eleocharis acicularis</i> , <i>Potamogeton natans</i> , <i>Nymphaea alba</i> , <i>Utricularia</i> spp., <i>Sphagnum</i> spp., <i>Potamogeton polygonifolius</i> , <i>Sparganium natans</i>
3,5 – 4,5	< 1,5	0–1,6	sehr sauer SS	<i>Peridinium</i> / <i>Gymnodinium</i> / Chlorophyta (coccale) Cryptophyceen	<i>Cephalodella</i> cf. <i>hoodi</i> <i>Cephalodella gibba</i> <i>Elosa worallii</i> <i>Brachionus urceolaris</i> Bdelloidea <i>Chydorus sphaericus</i>	<i>Juncus bulbosus</i> , <i>Eleocharis acicularis</i> , <i>Potamogeton natans</i> , ab pH 4 auch: <i>Nymphaea alba</i> , <i>Utricularia</i> spp., <i>Sphagnum</i> spp., <i>Potamogeton polygonifolius</i> , <i>Sparganium natans</i>
2,8 – 3,5	1,5–3,0	> 1,6 <= 15	sehr hoch ES I	<i>Ochromonas</i> / <i>Chlamydomonas</i> / <i>Scourfieldia</i>	<i>Cephalodella</i> cf. <i>hoodi</i> <i>Elosa worallii</i> <i>Brachionus urceolaris</i>	<i>Juncus bulbosus</i> , <i>Eleocharis acicularis</i>
2,6 < 2,8	3–4	> 15 <= 30	extrem ES II	<i>Ochromonas</i> / <i>Chlamydomonas</i> / Euglenophyceen	<i>Cephalodella</i> cf. <i>hoodi</i> <i>Elosa worallii</i>	<i>Juncus bulbosus</i>
< 2,6	> 4	> 30	extrem ES III	s. o.	s. o.	–

Fischarten. Sie bilden damit eine wichtige Grundlage für die Durchführung von Besatzmaßnahmen und die fischereiliche Leitbildentwicklung in der Bergbaufolgelandschaft. Sie sind darüber hinaus von grundlegender Bedeutung für die Beurteilung von Rückversauerungsprozessen in Bergbauseen, mit denen aufgrund der schwachen Pufferung und bei unzureichender Nachsorge zu rechnen ist. Von diesen Prozessen sind Fische besonders betroffen, da diese Organismengruppe sich nur dann etablieren kann, wenn die pH-Werte im circumneutralen Bereich stabilisiert werden können. Das gilt insbesondere für die Kleine Maräne als Leitart der künftigen nährstoffarmen Tagebauseen mit großem und sauerstoffreichem Hypolimnion.

Die Leitbildszenarien beinhalten bewusst auch wertende Aussagen über die Ausprägung von Nutzungsfunktionen. Diese sollen das Nutzungspotential des Szenarios verdeutlichen und können je nach Bedarf erweitert oder eingeschränkt werden. Eine synthetische Bewertung der Naturhaushaltsfunktionen oder gar eine synthetische Bewertung von Naturhaushalts- und Nutzungsfunktionen ist nicht sinnvoll. Eine für die Sanierung sehr wichtige Information, die den Wert von Gewässern der Bergbaufolgelandschaften mit bestimmt, ist der Zeithorizont, der zum Erreichen des Szenarios erforderlich ist. Eine Abschätzung der Dynamik zum Entwicklungsziel hin ist daher Bestandteil der Szenarien. Die bisherigen Erfahrungen belegen, dass es letztlich eine Abstimmung zwischen allen anthropozentrisch bedeutsamen Funktionen, inklusive der für den Naturschutz relevanten Funktionen ist, die zu einer akzeptierten abgestimmten Gesamtbewertung und damit zum festgelegten Leitbild führt.

3.2 Ökologische Bewertung

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie (Europäische Union 2000) fordert auch die Klassifizierung und Bewertung des Gewässerzustands künstlicher Gewässer über 50 ha. Dazu gehören neben Talsperren, Baggerseen und Teichen mindestens 112 Tagebauseen. Die Gewässer der Bergbaufolgelandschaft werden zumindest in ihrer Ausprägung als naturnahe, aber extrem saure Seen, einen eigenständigen, außerhalb der Bergbaufolgelandschaft nicht existierenden, Gewässertypus bilden. Die Gewässer sind durch die geogen saure Wasserchemie geprägt mit entsprechenden ökologischen Folgen für Besiedlung und Stoffumsätze.

Da die Eutrophierung weltweit das Hauptproblem von Standgewässern ist, beruhen die bekannten Bewertungsverfahren (OECD 1982, LAWA 1998, LAWA 2014) auf einer mehr oder weniger detaillierten Erfassung des trophischen Istzustands. Die sauren Bergbaugewässer sind aber nur in Ausnahmefällen trophisch geschädigt. Ihr Problem ist die säurebedingte z.T. völlig andere Ausprägung von traditionellen Güteparametern. Sie zeigen in ihren Besiedlungs- und Aktivitätsmustern gravierende Abweichungen von typischen eutrophierten oder auch mesotrophen Seen. Extrem saure Bedingungen führen zu einer Armut an Kohlenstoff und Phosphor. Eine Bioregulation über die Menge des verfügbaren Kohlenstoffs kommt außerhalb der Bergbaufolgelandschaften in unseren Breiten nicht vor. Legt man die Intensität der Primärproduktion als das Kriterium der Stoffwechselintensität in Seen zugrunde, ergeben sich aufgrund der hydrogeologischen und geochemischen Spezifik Grenzen in der Anwendung der o. g. Richtlinien.

Die Bedeutung der Ergebnisse bisheriger limnologischer Untersuchungen liegt vor allem in der systematischen Einordnung der

Tab. 6: Abgrenzung vom höchsten und guten ökologischen Potential mittels der Biodiversitäts-Indices für Phytoplankton in sauren Tagebauseen. Untere Grenzwerte (Shannon-Index und Evenness) zwischen dem höchsten, guten und mäßigen ökologischen Potential für die ökologische Bewertung anhand der Phytoplanktonzönose.

Bewertungsgrenze	Shannon-Index Hs	Evenness Es „Hilfsgröße“
sehr gut / gut	1,5	0,6
gut / mäßig	1,0	0,4

Tagebauseen nach chemischen und biologischen Gewässergütekriterien, die als wesentliche Grundlage für eine weitere Bearbeitung im Sinne der Implementierung der EU-Wasserrahmenrichtlinie angesehen werden kann (Tab. 5). Das betrifft insbesondere die biologischen Qualitätsparameter Phytoplankton, Phytobenthos, Makrophyten und Fische. Die tierische Besiedlung des Gewässerbodens (Makrozoobenthos) ist bislang unzureichend erforscht. Die EU-Wasserrahmenrichtlinie fordert die Einbeziehung verschiedener biologischer Qualitätskomponenten zur Bewertung von Gewässern. Während die Anwendung der Verfahren für Phytoplankton, Makrophyten und Phytobenthos als Anzeiger von Degradationen durch Eutrophierung bereits Standard in allen Bundesländern ist, werden Bewertungen von Seen durch die Qualitätskomponenten Makrozoobenthos nach MILLER et al. (2012) und Fische nach RITTERBUSCH et al. (2011) bisher seltener vorgenommen. Derzeit wird die Trophie als Hauptbelastung angesehen, so dass für das operative WRRL-Monitoring die Überwachung der auf die Belastung am empfindlichsten reagierenden Qualitätskomponente ausreichend ist.

Abweichend von der Bewertung neutraler Seen erfolgt die Bewertung saurer Tagebauseen mit Hilfe des Phytoplanktons nicht nur anhand der Biomasse, sondern auch unter Berücksichtigung der Biodiversität (LESSMANN & NIXDORF 2009, LAWA 2015). Hierbei werden das höchste und das gute ökologische Potential für saure Bergbauseen anhand des Shannon-Index und mittels der Evenness als Hilfsgröße ermittelt (Tab. 6). Der Shannon-Index berücksichtigt sowohl die Zahl der vorkommenden Arten als auch die Verteilung der Individuen bzw. der Biomasse auf die Gesamtheit. Der Shannon-Index H_s beschreibt den mittleren Grad der Ungewissheit, eine bestimmte Art unter allen Arten bei zufälliger Stichprobenahme anzutreffen.

Der Evenness-Wert erlaubt eine Aussage darüber, ob der Wert des Shannon-Index aufgrund einer hohen Taxazahl oder durch die gleichmäßige Verteilung der Individuen bzw. der Biomasse auf wenige Taxa zustande gekommen ist. Bei der Evenness wird der Shannon-Index in Relation zum maximal möglichen Diversitätswert gesetzt, der sich bei gleicher Taxazahl,

aber unter größtmöglicher Gleichverteilung der Taxa auf die Gesamtbiovolumina, ergeben würde. Das heißt, auch bei niedriger Artenzahl ist die Evenness hoch, wenn die vorkommenden Arten ähnlich häufig sind und nicht eine Art ein Massenvorkommen zeigt.

Die Bewertung für die Entwicklung von Bergbauseen wurde für das Phytoplankton 2009 im Rahmen der von der LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) beauftragten Entwicklung von Bewertungssystemen von natürlichen und künstlichen Seen gegeben (MISCHKE et al. 2015). Bislang sind ca. 500 Seen im Rahmen der UBA-Studie „Dokumentation von Tagebauseen Deutschlands“ (NIXDORF et al. 2001) erfasst worden. Eine Aktualisierung für 38 Tagebauseen Deutschlands wurde seitens des Umweltbundesamtes für das Jahr 2015 als Projekt vergeben, dessen Ergebnisse in NIXDORF et al. (2016) dokumentiert sind. Ein Ergebnis dieser Studie ist, dass die meisten neutralen Tagebauseen ein gutes ökologisches Potential erreichen. Einige Seen in Sachsen verfehlen dieses Ziel aufgrund der Überschreitung von Umweltqualitätsnormen durch flussgebietspezifische Schadstoffe bzw. in Bayern aufgrund von Unzulänglichkeiten bei der Bewertung saurer Seen. Hier wird eine Überarbeitung der Bewertungsrichtlinien für Makrophyten und Phytobenthos in sauren Tagebauseen vorgeschlagen.

Literatur

- BAUCH, G. (1955): Norddeutsche fischereiliche Seentypen. – Archiv für Hydrobiologie Supplement **22**: 278–285
- BTU Cottbus (1998): Verbundvorhaben Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft: Erarbeitung von Leitbildern und Handlungskonzepten für die verantwortliche Gestaltung und nachhaltige Entwicklung ihrer naturnahen Bereiche. – LENAB-Abschlussbericht TP 3: 110 S. + 112 S. Anhang
- DENEKE, R. (2000): Review on rotifers and crustaceans in highly acidic environments of pH-values ≤ 3 . – Hydrobiologia **433**: 167–172
- DOEGE, A. (2008): Rote Liste Armleuchteralgen Sachsens – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Dresden: 20 S.

- EUROPÄISCHE UNION (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327 vom 22. Dezember 2000
- GUTOWSKI, A., K. VAN DE WEYER, G. HOFMANN & A. DOEGE (2011): Makrophyten und Phyto-benthos. Indikatoren für den ökologischen Gewässerzustand. – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Dresden: 184 S.
- HENRIKSON, L. & H. G. OSCARSON (1981): Corixids (Hemiptera-Heteroptera), the new top-predators in acidified lakes. – Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie **21**: 1616–1620
- KÖHLER, J., J. GELBRECHT & M. PUSCH (Hrsg.) (2002): Die Spree – Zustand, Probleme und Entwicklungsmöglichkeiten. – Reihe "Limnologie aktuell", Bd. 10. Verlag Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung; Stuttgart: 384 S.
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) (1998): Gewässerbewertung – Stehende Gewässer. Vorläufige Richtlinie für eine Erstbewertung von natürlich entstandenen Seen nach trophischen Kriterien. – Kulturbuch-Verlag; Berlin: 74 S.
- LAWA (2014): Trophieklassifikation von Seen. Richtlinie zur Ermittlung des Trophie-Index nach LAWA für natürliche Seen, Baggerseen, Talsperren und Speicher. – Kulturbuch-Verlag; Berlin: 34 S.
- LAWA (2015): Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens mit Phytoplankton für saure Bergbaufolgeseen und Integration in das PhytoSeeWRRL-Verfahren und Bewertungstool, Prüfung und Dokumentation der Übereinstimmung mit der Europäischen Interkalibration. – Projektskizze O 1.15 – Länderfinanzierungsprogramm Wasser und Boden 2015
- LEBMANN, D. & B. NIXDORF (1998): Morphologie, hydrochemische Klassifizierung und Phytoplanktonbesiedlung von Tageauseen der Lausitz. – GBL-Gemeinschaftsvorhaben (Grundwasser-güteentwicklung in den Braunkohlegebieten der neuen Länder) **5**: 195–201
- LEBMANN, D. & B. NIXDORF (2000): Acidification Control of the Phytoplankton Diversity, Spatial Distribution and Trophy in Mining Lakes. – Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie **27**: 2208–2211
- LEBMANN, D. & B. NIXDORF (2009): Konzeption zur Ermittlung des ökologischen Potenzials von sauren Bergbauseen. – Brandenburgische Technische Universität Cottbus. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/BTU_Abschlussbericht_ockPotsaureBBSeen.pdf
- MILER, O., M. BRAUNS, J. BÖHMER & M. PUSCH (2012): Praxistest des Verfahrens zur Bewertung von Seen mittels Makrozoobenthos. – Endbericht des LAWA-Projekts Nr. O 5.10. Im Auftrag der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“; 27 S. + Anhang
- MISCHKE, U., U. RIEDMÜLLER, E. HOEHN, R. DENEKE & B. NIXDORF (2015): Handbuch für die Seenbewertung mittels Plankton – Phyto-See-Index (Teil A) und PhytoLoss-Modul Zooplankton (Teil B). S. 1–143
- MÜLLER, H. (1966): Eine fischereiliche Seenklassifizierung Norddeutschlands und ihre limnologische Grundlagen. – Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie **16**: 1145–1160
- NIXDORF, B. (2001): Limnologie/Fischerei. – In: Wissenschaftliche Begleitung der ostdeutschen Braunkohlesanierung. Forschungsprojekte 1994 bis 2000. Eigenverlag der LMBV mbH; Berlin: 193–216
- NIXDORF, B., M. HEMM, A. SCHLUNDT, M. KAPFER & H. KRUMBECK, (2001): Tageauseen in Deutschland – ein Überblick. – Umweltbundesamt Texte 35/01
- NIXDORF, B., D. LEBMANN, B. GRÜNBERG & J. RÜCKER (2015): Wasserlandschaft. – In: Kulturland Brandenburg e.V.: Landschaft im Wandel – land auf – land ab. – Koehler & Amelang; Leipzig: 123–129
- NIXDORF, B., D. LEBMANN & C.E.W. STEINBERG (2003): The importance of chemical buffering for pelagic and benthic colonization in acidic waters. – Water, Air, and Soil Pollution **3**: 27–46
- NIXDORF, B., J. RAMM & K. VAN DE WEYER (2016): Übersicht zur ökologischen Situation ausgewählter Tageauseen des Braunkohlebergbaus in Deutschland. – Umweltbundesamt – Bericht Projektnummer 50777
- OECD (1982): Eutrophication of Waters – Monitoring, assessment and control. Paris: 154 S.
- PIETSCH, W. (1973): Vegetationsentwicklung und Gewässergeneese in den Tageauseen des Lausitzer Braunkohlen-Reviers. – Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung **13**: 187–217

- PIETSCH, W. (1979): Klassifizierung und Nutzungsmöglichkeiten der Tagebaugewässer des Lausitzer Braunkohlen-Revieres. – Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung **19**: 187–215
- RITTERBUSCH, D., M. SCHUBERT & U. BRÄMICK (2011): Interkalibrierung und Fortentwicklung der fischbasierten Seen- und Fließgewässerbewertung gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie. – LAWA-Projekt O5.11 im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“, 82 S.
- RÜMMLER, F. (2010): Ansätze zur fischereilichen Nutzung von Braunkohletageauseen und Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. – In: Tagungsband „Entwicklungen und Perspektiven in der Wasserwirtschaft“ der DWA Landesverbandstagung Nord-Ost und Sachsen/Thüringen, 2.–3.6.2010, Leipzig Vol. Issue: 79–100
- SCHULZ, D. (2013): Rote Liste und Artenliste Sachsens – Farn- und Samenpflanzen. – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; Dresden: 304 S.
- WEYER, K. van de, J. NEUMANN, W. PIETSCH, J. PÄZOLT & P. TIGGES (2009): Die Makrophyten des Senftenberger Sees. – Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg **18**: 88–95
- WIEGLEB, G., U. BRÖRING, J. MRZLJAK & F. SCHULZ (2000): Naturschutz in Bergbaufolgelandschaften: Landschaftsanalyse und Leitbildentwicklung. – Physica-Verlag; Heidelberg: 381 S.
- WÖLLMANN, K., R. DENEKE, B. NIXDORF & G. PACKROFF (2000): Dynamics of planktonic food webs in three mining lakes across a pH gradient (pH 2-4). – Hydrobiologia **433**: 3–14

<http://www.lmbv.de/index.php/Flutungsstand.html>

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Brigitte Nixdorf
BTU Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Gewässerschutz
Seestr. 45
15526 Bad Saarow
E-Mail: nixdorf@b-tu.de

Dr. Klaus van de Weyer
lanaplan GbR
Lobbericher Str. 5
41334 Nettetal
E-Mail: klaus.vdweyer@lanaplan.de

Dr. Dieter Leßmann
BTU Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Gewässerschutz
Postfach 101344
03013 Cottbus
E-Mail: lessmann@b-tu.de

Manuskripteingang	31.3.2014
aktualisiert und überarbeitet	14.5.2016
Manuskriptannahme	4.6.2016
Erschienen	28.10.2016